

TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

Un enfoque práctico

Tercera edición

YUNUS A. ÇENGEL

INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

La termodinámica trata de la *cantidad* de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro y no hace referencia a *cuánto* durará ese proceso. Pero en la ingeniería a menudo estamos interesados en la *rapidez* o *razón* de esa transferencia, la cual constituye el tema de la ciencia de la *transferencia de calor*.

Se inicia este capítulo con un repaso de los conceptos fundamentales de la termodinámica, mismos que forman el armazón para entender la transferencia de calor. En primer lugar, se presenta la relación entre el calor y otras formas de energía y se repasa el balance de energía. A continuación, se presentan los tres mecanismos básicos de la transferencia de calor: la conducción, la convección y la radiación, y se discute la conductividad térmica. La *conducción* es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes, menos energéticas, como resultado de la interacción entre ellas. La *convección* es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido. La *radiación* es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Se cierra este capítulo con una discusión acerca de la transferencia simultánea de calor.

OBJETIVOS

Cuando el lector termine de estudiar este capítulo, debe ser capaz de:

- Entender cómo están relacionadas entre sí la termodinámica y la transferencia de calor
- Distinguir la energía térmica de las otras formas de energía, así como la transferencia de calor de las otras formas de transferencia de energía
- Realizar balances generales de energía y balances de energía superficial
- Comprender los mecanismos básicos de transferencia de calor: la conducción, la convección y la radiación, así como la ley de Fourier de la transferencia de calor por conducción, la ley de Newton del enfriamiento y la ley de Stefan-Boltzman de la radiación
- Identificar los mecanismos de transferencia de calor que en la práctica ocurren de manera simultánea
- Darse cuenta del costo asociado a las pérdidas de calor, y
- Resolver diversos problemas de transferencia de calor que se encuentran en la práctica.



CONTENIDO

- 1-1 Termodinámica y transferencia de calor 2
- 1-2 Transferencia de calor en la ingeniería 4
- 1-3 Calor y otras formas de energía 6
- 1-4 Primera ley de la termodinámica 11
- 1-5 Mecanismos de transferencia de calor 17
- 1-6 Conducción 17
- 1-7 Convección 25
- 1-8 Radiación 27
- 1-9 Mecanismos simultáneos de transferencia de calor 30
- 1-10 Técnica de resolución de problemas 35

Tema de interés especial:

Comodidad térmica 40

Resumen 46

Bibliografía y lecturas sugeridas 47

Problemas 47

1-1 ■ TERMODINÁMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR

Con base en la experiencia, se sabe que una bebida enlatada fría dejada en una habitación se entibia y una bebida enlatada tibia que se deja en un refrigerador se enfría. Esto se lleva a cabo por la transferencia de *energía* del medio caliente hacia el frío. La transferencia de energía siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y esa transferencia se detiene cuando ambos alcanzan la misma temperatura.

El lector recordará, por lo que sabe de termodinámica, que la energía existe en varias formas. En este texto se está interesado sobre todo en el **calor**, que es la *forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura*. La ciencia que trata de la determinación de las *razones* de esa transferencia es la **transferencia de calor**.

El lector se puede preguntar por qué necesitamos abordar un estudio detallado acerca de la transferencia de calor. Después de todo, se puede determinar la cantidad de transferencia de calor para cualquier sistema que pase por cualquier proceso, con la sola aplicación del análisis termodinámico. La razón es que la termodinámica se interesa en la *cantidad* de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro, y no indica *cuánto tiempo* transcurrirá. Un análisis termodinámico sencillamente nos dice cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico con el fin de satisfacer el principio de conservación de la energía.

En la práctica tiene más interés la razón de la transferencia de calor (transferencia de calor por unidad de tiempo) que la cantidad de este último. Por ejemplo, es posible determinar la cantidad de calor transferida de una jarra o *termo* conforme el café caliente que está en su interior se enfría de 90°C hasta 80°C con sólo un análisis termodinámico. Pero a un usuario típico o al diseñador de una de estas jarras le interesa principalmente *cuánto tiempo pasará* antes de que el café caliente que esté en el interior se enfríe hasta 80°C , y un análisis termodinámico no puede responder esta pregunta. La determinación de las razones de transferencia del calor hacia un sistema y desde éste y, por tanto, los tiempos de enfriamiento o de calentamiento, así como de la variación de la temperatura, son el tema de la *transferencia de calor* (figura 1-1).

La termodinámica trata de los estados de equilibrio y de los cambios desde un estado de equilibrio hacia otro. Por otra parte, la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que falta el equilibrio térmico y, por tanto, existe un fenómeno de *no equilibrio*. Por lo tanto, el estudio de la transferencia de calor no puede basarse sólo en los principios de la termodinámica. Sin embargo, las leyes de la termodinámica ponen la estructura para la ciencia de la transferencia de calor. En la *primera ley* se requiere que la razón de la transferencia de energía hacia un sistema sea igual a la razón de incremento de la energía de ese sistema. En la *segunda ley* se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente (figura 1-2). Esto se asemeja a un automóvil estacionado sobre un camino inclinado que debe moverse hacia abajo de la pendiente, en la dirección que decrezca la elevación, cuando se suelten sus frenos. También es análogo a la corriente eléctrica que fluye en la dirección de la menor tensión o al fluido que se mueve en la dirección que disminuye la presión total.

El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una *diferencia de temperatura*. No puede haber transferencia neta de calor entre dos medios que están a la misma temperatura. La diferencia de temperatura es la *fuerza impulsora* para la transferencia de calor, precisamente como la *diferencia de tensión* es la fuerza impulsora para el flujo de corriente eléctrica y la *diferencia de presión* es la fuerza impulsora para el flujo de fluidos. La

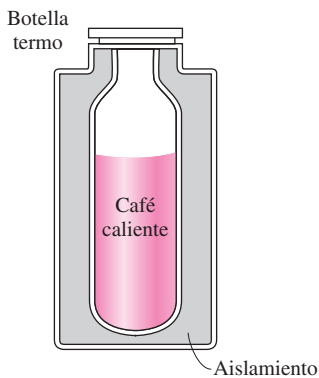


FIGURA 1-1

Normalmente estamos interesados en cuánto tiempo tarda en enfriarse el café caliente que está en un *termo* hasta cierta temperatura, lo cual no se puede determinar sólo a partir de un análisis termodinámico.

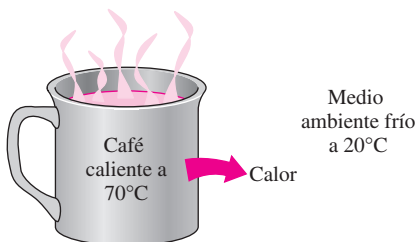


FIGURA 1-2

El calor fluye en la dirección de la temperatura decreciente.

velocidad de la transferencia de calor en cierta dirección depende de la magnitud del *gradiente de temperatura* (la diferencia de temperatura por unidad de longitud o la razón de cambio de la temperatura en esa dirección). A mayor gradiente de temperatura, mayor es la razón de la transferencia de calor.

Áreas de aplicación de la transferencia de calor

Es común encontrar la transferencia de calor en los sistemas de ingeniería y otros aspectos de la vida y no es necesario ir muy lejos para ver algunas de sus áreas de aplicación. De hecho, no es necesario ir a alguna parte. El cuerpo humano está emitiendo calor en forma constante hacia sus alrededores y la comodidad humana está íntimamente ligada con la razón de este rechazo de calor. Tratamos de controlar esta razón de transferencia de calor al ajustar nuestra ropa a las condiciones ambientales.

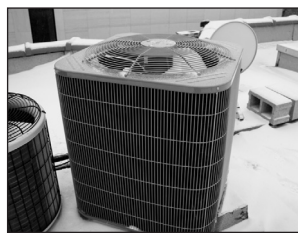
Muchos aparatos domésticos comunes están diseñados, en su conjunto o en parte, mediante la aplicación de los principios de la transferencia de calor. Algunos ejemplos caen en el dominio de las aplicaciones eléctricas o del uso del gas: el sistema de calefacción y acondicionamiento de aire, el refrigerador y congelador, el calentador de agua, la plancha e, incluso, la computadora, la TV y el reproductor de DVD. Por supuesto, los hogares eficientes respecto al uso de la energía se diseñan de manera que puedan minimizar la pérdida de calor, en invierno, y la ganancia de calor, en verano. La transferencia de calor desempeña un papel importante en el diseño de muchos otros aparatos, como los radiadores de los automóviles, los colectores solares, diversos componentes de las plantas generadoras de energía eléctrica e, incluso, la nave espacial (figura 1-3). El espesor óptimo del aislamiento de las paredes y techos de las casas, de los tubos de agua caliente o de vapor de agua o de los calentadores de agua se determina, una vez más, a partir de un análisis de la transferencia de calor que considere los aspectos económicos.

Fundamentos históricos

El calor siempre se ha percibido como algo que produce una sensación de tibieza y se podría pensar que su naturaleza es una de las primeras cosas com-



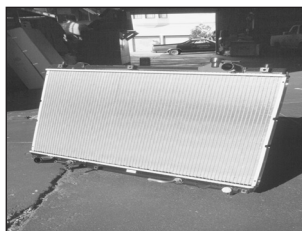
El cuerpo humano



Sistemas de acondicionamiento del aire



Aviones



Radiadores de automóviles



Planta generadora de energía eléctrica

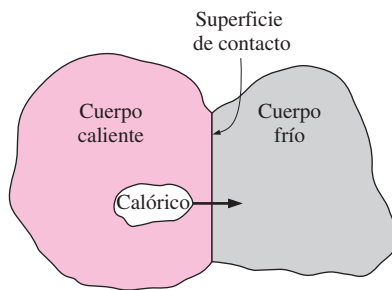


Sistemas de refrigeración

FIGURA 1-3

Algunas áreas de aplicación de la transferencia de calor.

A/C unit, fridge, radiator: © The McGraw-Hill Companies, Inc./Jill Braaten, photographer; Plane: © Vol. 14/PhotoDisc; Humans: © Vol. 121/PhotoDisc; Power plant: © Corbis Royalty Free

**FIGURA 1-4**

A principios del siglo XIX se concebía el calor como un fluido invisible llamado *calórico* que fluía de los cuerpos más calientes hacia los más fríos.

prendidas por la humanidad. Pero fue hacia mediados del siglo XIX cuando tuvimos una verdadera comprensión física de la naturaleza del calor, gracias al desarrollo en esa época de la **teoría cinética**, en la cual se considera a las moléculas como bolas diminutas que están en movimiento y que, por tanto, poseen energía cinética. El calor entonces se define como la energía asociada con el movimiento aleatorio de los átomos y moléculas. Aun cuando en el siglo XVIII y a principios del XIX se sugirió que el calor es la manifestación del movimiento en el nivel molecular (llamada la *fuerza viva*), la visión prevaleciente en ese sentido hasta mediados del siglo XIX se basaba en la **teoría del calórico** propuesta por el químico francés Antoine Lavoisier (1743-1794), en 1789. La teoría del calórico afirma que el calor es una sustancia semejante a un fluido, llamada **calórico**, que no tiene masa, es incoloro, inodoro e insípido y se puede verter de un cuerpo a otro (figura 1-4). Cuando se agregaba calórico a un cuerpo, su temperatura aumentaba, y cuando se quitaba, la temperatura de ese cuerpo disminuía. Cuando un cuerpo no podía contener más calórico, de manera muy semejante a cuando en un vaso de agua no se puede disolver más sal o azúcar, se decía que el cuerpo estaba saturado con calórico. Esta interpretación dio lugar a los términos *líquido saturado* o *vapor saturado* que todavía se usan en la actualidad.

La teoría del calórico fue atacada pronto después de su introducción. Ella sostenía que el calor es una sustancia que no se podía crear ni destruir. Sin embargo, se sabía que se puede generar calor de manera indefinida frotándose las manos o frotando entre sí dos trozos de madera. En 1798 el estadounidense Benjamin Thompson (Conde de Rumford) (1753-1814) demostró en sus estudios que el calor se puede generar en forma continua a través de la fricción. La validez de la teoría del calórico también fue desafiada por otros científicos. Pero fueron los cuidadosos experimentos del inglés James P. Joule (1818-1889), publicados en 1843, los que finalmente convencieron a los escépticos de que, después de todo, el calor no era una sustancia y, por consiguiente, pusieron a descansar a la teoría del calórico. Aunque esta teoría fue totalmente abandonada a mediados del siglo XIX, contribuyó en gran parte al desarrollo de la termodinámica y de la transferencia de calor.

1-2 ■ TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA INGENIERÍA

El equipo de transferencia de calor —como los intercambiadores de calor, las calderas, los condensadores, los radiadores, los calentadores, los hornos, los refrigeradores y los colectores solares— está diseñado tomando en cuenta el análisis de la transferencia de calor. Los problemas de esta ciencia que se encuentran en la práctica se pueden considerar en dos grupos: 1) de *capacidad nominal* y 2) de *dimensionamiento*. Los problemas de capacidad nominal tratan de la determinación de la razón de la transferencia de calor para un sistema existente a una diferencia específica de temperatura. Los problemas de dimensionamiento tratan con la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una razón determinada para una diferencia específica de temperatura.

Un aparato o proceso de ingeniería puede estudiarse *en forma experimental* (realización de pruebas y toma de mediciones) o *en forma analítica* (mediante el análisis o la elaboración de cálculos). El procedimiento experimental tiene la ventaja de que se trabaja con el sistema físico real, y la cantidad deseada se determina por medición, dentro de los límites del error experimental. Sin embargo, este procedimiento es caro, tardado y, con frecuencia, impráctico. Además, el sistema que se esté analizando puede incluso no existir. Por ejemplo, por lo regular, los sistemas completos de calefacción y de plomería de un

edificio deben dimensionarse a partir de las especificaciones dadas *antes* de que el edificio se construya en realidad. El procedimiento analítico (que incluye el procedimiento numérico) tiene la ventaja de que es rápido y barato, pero los resultados obtenidos están sujetos a la exactitud de las suposiciones, de las aproximaciones y de las idealizaciones establecidas en el análisis. En los estudios de ingeniería, es frecuente que se logre un buen término medio al reducir los posibles diseños a unos cuantos, por medio del análisis, y verificando después en forma experimental los hallazgos.

Elaboración de modelos en la transferencia de calor

Las descripciones de la mayor parte de los problemas científicos comprenden ecuaciones que relacionan entre sí los cambios de algunas variables clave. Comúnmente, entre menor es el incremento elegido en las variables cambiantes, más general y exacta es la descripción. En el caso límite de cambios infinitesimales o diferenciales en las variables, se obtienen ecuaciones diferenciales que proporcionan formulaciones matemáticas precisas para los principios y las leyes físicos, representando las razones de cambio como derivadas. Por lo tanto, se usan las ecuaciones diferenciales para investigar una amplia variedad de problemas en las ciencias y la ingeniería (figura 1-5). Sin embargo, muchos problemas que se encuentran en la práctica se pueden resolver sin recurrir a las ecuaciones diferenciales y a las complicaciones asociadas con ellas.

El estudio de los fenómenos físicos comprende dos pasos importantes. En el primero se identifican todas las variables que afectan los fenómenos, se hacen suposiciones y aproximaciones razonables y se estudia la interdependencia de dichas variables. Se invocan las leyes y principios físicos pertinentes y el problema se formula en forma matemática. La propia ecuación es muy ilustrativa, ya que muestra el grado de dependencia de algunas variables con respecto a las otras y la importancia relativa de diversos términos. En el segundo paso el problema se resuelve usando un procedimiento apropiado y se interpretan los resultados.

De hecho, muchos procesos que parecen ocurrir de manera aleatoria y sin orden son gobernados por algunas leyes físicas visibles o no tan visibles. Se adviertan o no, las leyes están allí, rigiendo de manera coherente y predecible lo que parecen ser sucesos ordinarios. La mayor parte de tales leyes están bien definidas y son bien comprendidas por los científicos. Esto hace posible predecir el curso de un suceso antes de que ocurra en realidad, o bien, estudiar matemáticamente diversos aspectos de un suceso sin ejecutar experimentos caros y tardados. Aquí es donde se encuentra el poder del análisis. Se pueden obtener resultados muy exactos para problemas prácticos con más o menos poco esfuerzo, utilizando un modelo matemático adecuado y realista. La preparación de los modelos de ese tipo requiere un conocimiento adecuado de los fenómenos naturales que intervienen y de las leyes pertinentes, así como de un juicio sólido. Es obvio que un modelo no realista llevará a resultados inexactos y, por tanto, inaceptables.

Un analista que trabaje en un problema de ingeniería con frecuencia se encuentra en la disyuntiva de elegir entre un modelo muy exacto, pero complejo, y uno sencillo, pero no tan exacto. La selección correcta depende de la situación que se enfrente. La selección correcta suele ser el modelo más sencillo que da lugar a resultados adecuados. Por ejemplo, el proceso de hornear papas o de asar un trozo redondo de carne de res en un horno se puede estudiar analíticamente de una manera sencilla al considerar la papa o el asado como una esfera sólida que tenga las propiedades del agua (figura 1-6). El modelo es bastante sencillo, pero los resultados obtenidos son suficientemente exactos para la mayor parte de los fines prácticos. En otro ejemplo sencillo,

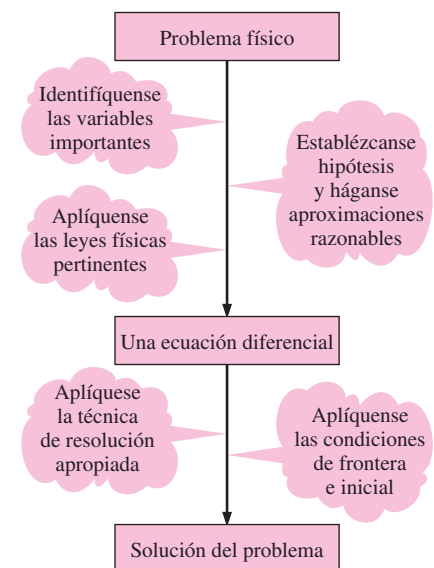


FIGURA 1-5

Modelado matemático de los problemas físicos.

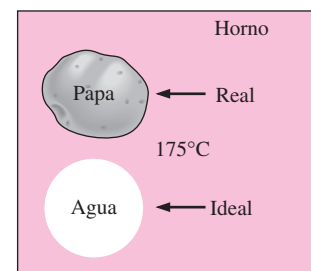


FIGURA 1-6

La elaboración de modelos es una herramienta poderosa en la ingeniería que proporciona gran visión y sencillez a costa de algo de exactitud.

cuando analizamos las pérdidas de calor de un edificio, con el fin de seleccionar el tamaño correcto de un calentador, se determinan las pérdidas de calor en las peores condiciones que se puedan esperar y se selecciona un horno que suministrará calor suficiente para compensar tales pérdidas. A menudo se tiende a elegir un horno más grande como previsión a alguna futura ampliación o sólo para suministrar un factor de seguridad. Un análisis muy sencillo resultará adecuado en este caso.

Al seleccionar el equipo de transferencia de calor es importante considerar las condiciones reales de operación. Por ejemplo, al comprar un intercambiador de calor que manejará agua dura, se debe considerar que, con el paso del tiempo, se formarán algunos depósitos de calcio sobre las superficies de transferencia, causando incrustación y, por consiguiente, una declinación gradual en el rendimiento. Se debe seleccionar el intercambiador de calor tomando en cuenta la operación en esta situación adversa, en lugar de en las condiciones iniciales.

La preparación de modelos muy exactos, pero complejos, no suele ser tan difícil. Pero no sirven de mucho a un analista si son muy difíciles y requieren de mucho tiempo para resolverse. En lo mínimo, el modelo debe reflejar las características esenciales del problema físico que representa. Existen muchos problemas significativos del mundo real que se pueden analizar con un modelo sencillo. Pero siempre se debe tener presente que los resultados obtenidos a partir de un análisis son tan exactos como las suposiciones establecidas en la simplificación del problema. Por lo tanto, la solución no debe aplicarse a situaciones para las que no se cumplen las suposiciones originales.

Una solución que no es bastante coherente con la naturaleza observada del problema indica que el modelo matemático que se ha usado es demasiado burdo. En ese caso, hay que preparar un modelo más realista mediante la eliminación de una o más de las suposiciones cuestionables. Esto dará por resultado un problema más complejo que, por supuesto, es más difícil de resolver. Por tanto, cualquier solución para un problema debe interpretarse dentro del contexto de su formulación.

1-3 ■ CALOR Y OTRAS FORMAS DE ENERGÍA

La energía puede existir en numerosas formas, como térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, y su suma constituye la **energía total** E (o e en términos de unidad de masa) de un sistema. Las formas de energía relacionadas con la estructura molecular de un sistema y con el grado de la actividad molecular se conocen como **energía microscópica**. La suma de todas las formas microscópicas de energía se llama **energía interna** de un sistema y se denota por U (o u en términos de unidad de masa).

La unidad internacional de energía es el *joule* (J) o el *kilojoule* ($\text{kJ} = 1\,000\text{ J}$). En el sistema inglés, la unidad de energía es la *unidad térmica británica* (Btu, *British thermal unit*), que se define como la energía necesaria para elevar en 1°F la temperatura de 1 lbm de agua a 60°F . Las magnitudes del kJ y de la Btu son casi idénticas ($1\text{ Btu} = 1.055056\text{ kJ}$). Otra unidad bien conocida de energía es la *caloría* ($1\text{ cal} = 4.1868\text{ J}$), la cual se define como la energía necesaria para elevar en 1°C la temperatura de 1 gramo de agua a 14.5°C .

Se puede considerar la energía interna como la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas. La parte de la energía interna de un sistema que está asociada con la energía cinética de las moléculas se conoce como **energía sensible** o **calor sensible**. La velocidad promedio y el grado de actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura. Por consiguiente, en temperaturas más elevadas, las moléculas poseen una energía cinética más alta y, como resultado, el sistema tiene una energía interna también más alta.

La energía interna también se asocia con las fuerzas que ejercen entre sí las moléculas de un sistema. Estas fuerzas ligan a las moléculas mutuamente y,

como sería de esperar, son más fuertes en los sólidos y más débiles en los gases. Si se agrega energía suficiente a las moléculas de un sólido o de un líquido, vencerán estas fuerzas moleculares y, simplemente, se separarán pasando el sistema a ser gas. Éste es un proceso de *cambio de fase* y, debido a esta energía agregada, un sistema en fase gaseosa se encuentra en un nivel más alto de energía interna que si estuviera en fase sólida o líquida. La energía interna asociada con la fase de un sistema se llama **energía latente** o **calor latente**.

Los cambios mencionados en el párrafo anterior pueden ocurrir sin un cambio en la composición química de un sistema. La mayor parte de los problemas de transferencia de calor caen en esta categoría y no es necesario poner atención en las fuerzas que ligan los átomos para reunirlos en una molécula. La energía interna asociada con los enlaces atómicos en una molécula se llama **energía química** (o **de enlace**), en tanto que la energía interna asociada con los enlaces en el interior del núcleo del propio átomo se llama **energía nuclear**. Las energías química o nuclear se absorben o liberan durante las reacciones químicas o nucleares, respectivamente.

En el análisis de los sistemas que comprenden el flujo de fluidos, con frecuencia se encuentra la combinación de las propiedades u y Pv . En beneficio de la sencillez y por conveniencia, a esta combinación se le define como **entalpía** h . Es decir, $h = u + Pv$, en donde el término Pv representa la *energía de flujo* del fluido (también llamada *trabajo de flujo*), que es la energía necesaria para empujar un fluido y mantener el flujo. En el análisis de la energía de los fluidos que fluyen, es conveniente tratar la energía de flujo como parte de la energía del fluido y representar la energía microscópica de una corriente de un fluido por la entalpía h (figura 1-7).

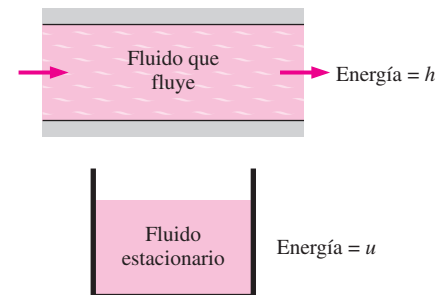


FIGURA 1-7

La *energía interna* u representa la energía microscópica de un fluido que no está fluyendo, en tanto que la *entalpía* h representa la energía microscópica de un fluido que fluye.

Calores específicos de gases, líquidos y sólidos

Es posible que el lector recuerde que un **gas ideal** se define como un gas que obedece la relación

$$Pv = RT \quad \text{o bien,} \quad P = \rho RT \quad (1-1)$$

en donde P es la presión absoluta, v es el volumen específico, T es la temperatura termodinámica (o absoluta), ρ es la densidad y R es la constante de gas. En forma experimental, se ha observado que la relación antes dada del gas ideal proporciona una aproximación muy cercana al comportamiento P - v - T de los gases reales, a bajas densidades. A presiones bajas y temperaturas elevadas, la densidad de un gas disminuye y éste se comporta como un gas ideal. En el rango de interés práctico, muchos gases comunes, como el aire, el nitrógeno, el oxígeno, el helio, el argón, el neón y el criptón, e incluso gases más pesados, como el bióxido de carbono, pueden tratarse como gases ideales, con error despreciable (con frecuencia, menor de 1%). No obstante, los gases densos, como el vapor de agua en las plantas termoeléctricas y el vapor del refrigerante en los refrigeradores, no siempre deben tratarse como gases ideales, ya que suelen existir en un estado cercano a la saturación.

Puede ser que el lector también recuerde que el **calor específico** se define como la *energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia* (figura 1-8). En general, esta energía depende de la manera en que se ejecuta el proceso. Suele tenerse interés en dos tipos de calores específicos: el calor específico a volumen constante, c_v , y el calor específico a presión constante, c_p . El **calor específico a volumen constante**, c_v , se puede concebir como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia mientras el volumen se

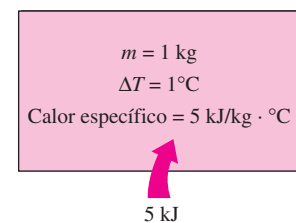
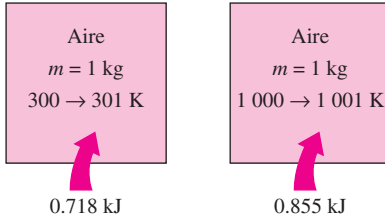
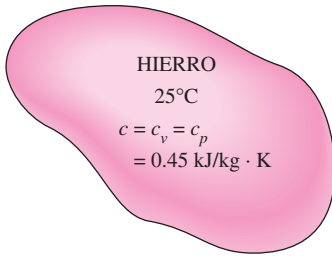


FIGURA 1-8

El calor específico es la energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado, de una manera específica.

**FIGURA 1-9**

El calor específico de una sustancia cambia con la temperatura.

**FIGURA 1-10**

Los valores de c_v y c_p de las sustancias incompresibles son idénticos y se denotan por c .

mantiene constante. La energía requerida para hacer lo mismo cuando la presión se mantiene constante es el **calor específico a presión constante**, c_p . El calor específico a presión constante, c_p , es mayor que c_v porque, en esta condición, se permite que el sistema se expanda y porque la energía para este trabajo de expansión también debe suministrarse al sistema. Para los gases ideales, estos calores específicos están relacionados entre sí por $c_p = c_v + R$.

Una unidad común para los calores específicos es el $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ o $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. Advierta que estas dos unidades son *idénticas*, ya que $\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(\text{K})$, y un cambio de 1°C en la temperatura es equivalente a un cambio de 1 K. Asimismo,

$$1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \equiv 1 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C} \equiv 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \equiv 1 \text{ J/g} \cdot \text{K}$$

En general, los calores específicos de una sustancia dependen de dos propiedades independientes, como la temperatura y la presión. Sin embargo, para un *gas ideal* sólo dependen de la *temperatura* (figura 1-9). A bajas presiones todos los gases reales se aproximan al comportamiento del gas ideal y, por lo tanto, sus calores específicos sólo dependen de la temperatura.

Los cambios diferenciales en la energía interna u y la entalpía h de un gas ideal se pueden expresar en términos de los calores específicos como

$$du = c_v dT \quad \text{y} \quad dh = c_p dT \quad (1-2)$$

Los cambios finitos en la energía interna y la entalpía de un gas ideal durante un proceso se pueden expresar aproximadamente usando valores de los calores específicos a la temperatura promedio, como

$$\Delta u = c_{v, \text{prom}} \Delta T \quad \text{y} \quad \Delta h = c_{p, \text{prom}} \Delta T \quad (\text{J/g}) \quad (1-3)$$

o bien,

$$\Delta U = mc_{v, \text{prom}} \Delta T \quad \text{y} \quad \Delta H = mc_{p, \text{prom}} \Delta T \quad (\text{J}) \quad (1-4)$$

en donde m es la masa del sistema.

Una sustancia cuyo volumen específico (o densidad específica) no cambia con la temperatura o la presión se conoce como **sustancia incompresible**. Los volúmenes específicos de los sólidos y los líquidos permanecen constantes durante un proceso y, por tanto, se pueden aproximar como sustancias incompresibles sin mucho sacrificio en la exactitud.

Los calores específicos a volumen constante y a presión constante son idénticos para las sustancias incompresibles (figura 1-10). Por lo tanto, para los sólidos y los líquidos, se pueden quitar los subíndices en c_v y c_p y estos dos calores específicos se pueden representar por un solo símbolo, c . Es decir, $c_p \equiv c_v \equiv c$. También se pudo deducir este resultado a partir de las definiciones físicas de calores específicos a volumen constante y a presión constante. En el apéndice se dan los calores específicos de varios gases, líquidos y sólidos comunes.

Los calores específicos de las sustancias incompresibles sólo dependen de la temperatura. Por lo tanto, el cambio en la energía interna de sólidos y líquidos se puede expresar como

$$\Delta U = mc_{\text{prom}} \Delta T \quad (\text{J}) \quad (1-5)$$

en donde C_{prom} es el calor específico promedio evaluado a la temperatura promedio. Note que el cambio en la energía interna de los sistemas que permanecen en una sola fase (líquido, sólido o gas) durante el proceso se puede determinar con mucha facilidad usando los calores específicos promedio.

Transferencia de la energía

La energía se puede transferir hacia una masa dada, o desde ésta, por dos mecanismos: *calor* Q y *trabajo* W . Una interacción energética es transferencia de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura. De lo contrario, es trabajo. Tanto un pistón que sube, como una flecha rotatoria y un alambre eléctrico que crucen las fronteras del sistema, están asociados con interacciones de trabajo. El trabajo realizado *por unidad de tiempo* se llama **potencia** y se denota por \dot{W} . La unidad de potencia es el W o el hp (1 hp = 746 W). Los motores de automóviles y las turbinas hidráulicas, de vapor y de gas producen trabajo; las compresoras, bombas y mezcladoras consumen trabajo. Advierta que la energía de un sistema disminuye conforme realiza trabajo y aumenta si se realiza trabajo sobre él.

En la vida diaria con frecuencia se hace referencia a las formas latente y sensible de la energía interna como **calor** y se habla del contenido de calor de los cuerpos (figura 1-11). Sin embargo, en la termodinámica a esas formas de energía se les suele mencionar como **energía térmica**, con el fin de impedir que se tenga una confusión con la *transferencia de calor*.

El término *calor* y las frases asociadas, como *flujo de calor*, *adición de calor*, *rechazo de calor*, *absorción de calor*, *ganancia de calor*, *pérdida de calor*, *almacenamiento de calor*, *generación de calor*, *calentamiento eléctrico*, *calor latente*, *calor del cuerpo* y *fuerza de calor*, son de uso común hoy en día y el intento de reemplazar *calor* en estas frases por *energía térmica* sólo tuvo un éxito limitado. Estas frases están profundamente arraigadas en nuestro vocabulario y las usan tanto la gente común como los científicos sin que se tengan confusiones. Por ejemplo, la frase *calor del cuerpo* se entiende que quiere dar a entender el *contenido de energía térmica* de un cuerpo. Del mismo modo, se entiende que por *flujo de calor* se quiere decir la *transferencia de energía térmica*, no el flujo de una sustancia semejante a un fluido llamada *calor*, aun cuando esta última interpretación incorrecta, basada en la teoría del calórico, es el origen de esta frase. Asimismo, la transferencia de calor hacia un sistema con frecuencia se menciona como *adición de calor* y la transferencia de calor hacia afuera de un sistema como *rechazo de calor*.

Manteniéndose alineados con la práctica actual, llamaremos a la energía térmica *calor* y a la transferencia de energía térmica *transferencia de calor*. La cantidad de calor transferido durante el proceso se denota por Q . La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama **razón de transferencia de calor** y se denota por \dot{Q} . El punto arriba representa la derivada respecto al tiempo, o “por unidad de tiempo”. La velocidad de transferencia de calor, \dot{Q} , tiene la unidad J/s, lo cual es equivalente a W.

Cuando se cuenta con la *razón* de transferencia de calor, \dot{Q} , entonces se puede determinar la cantidad total de transferencia de calor Q durante un intervalo de tiempo Δt a partir de

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (\text{J}) \quad (1-6)$$

siempre que se conozca la variación de \dot{Q} con el tiempo. Para el caso especial de $\dot{Q} = \text{constante}$, la ecuación anterior se reduce a

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (\text{J}) \quad (1-7)$$

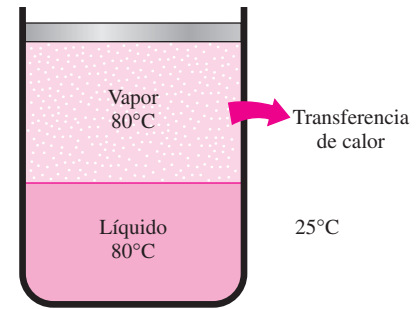


FIGURA 1-11

Las formas sensible y latente de energía interna se pueden transferir como resultado de una diferencia de temperatura y se mencionan como *calor* o *energía térmica*.

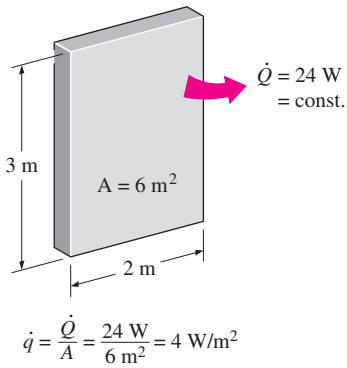


FIGURA 1-12

El flujo de calor es la transferencia de calor *por unidad de tiempo y por unidad de área*, y es igual a $\dot{q} = \dot{Q}/A$ cuando \dot{Q} es uniforme sobre el área A .

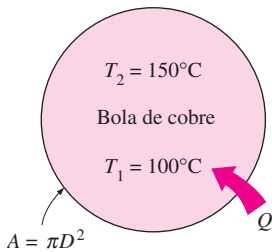


FIGURA 1-13

Esquema para el ejemplo 1-1.

La razón de transferencia del calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia se llama **flujo de calor** y el flujo promedio de calor se expresa como (figura 1-12)

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-8)$$

en donde A es el área de transferencia de calor. En unidades inglesas, la unidad de flujo de calor es $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2$. Note que el flujo de calor puede variar con el tiempo así como con la posición sobre una superficie.

EJEMPLO 1-1 Calentamiento de una bola de cobre

Una bola de cobre de 10 cm de diámetro se va a calentar desde 100°C hasta una temperatura promedio de 150°C , en 30 minutos (figura 1-13). Tomando la densidad y el calor específico promedios del cobre en este rango de temperatura como $\rho = 8\,950 \text{ kg/m}^3$ y $c_p = 0.395 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, respectivamente, determine a) la cantidad total de transferencia de calor a la bola de cobre, b) la razón promedio de transferencia del calor a la bola y c) el flujo promedio de calor.

SOLUCIÓN La bola de cobre se va a calentar desde 100°C hasta 150°C . Se van a determinar la transferencia total de calor, la razón promedio de transferencia del calor y el flujo promedio de calor.

Suposición Se pueden usar las propiedades constantes para el cobre a la temperatura promedio.

Propiedades La densidad y el calor específico promedios del cobre se dan como $\rho = 8\,950 \text{ kg/m}^3$ y $c_p = 0.395 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Análisis a) La cantidad de calor transferida a la bola de cobre es sencillamente el cambio en su energía interna y se determina a partir de

Transferencia de energía al sistema = Aumento de energía del sistema

$$Q = \Delta U = mc_{\text{prom}}(T_2 - T_1)$$

en donde

$$m = \rho V = \frac{\pi}{6} \rho D^3 = \frac{\pi}{6} (8\,950 \text{ kg/m}^3)(0.1 \text{ m})^3 = 4.686 \text{ kg}$$

Sustituyendo

$$Q = (4.686 \text{ kg})(0.395 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(150 - 100)^\circ\text{C} = \mathbf{92.6 \text{ kJ}}$$

Por lo tanto, es necesario transferir 92.6 kJ de calor a la bola de cobre para calentarla de 100°C hasta 150°C .

b) Normalmente la razón de transferencia del calor durante un proceso cambia con el tiempo. Sin embargo, se puede determinar la razón *promedio* de transferencia del calor al dividir la cantidad total de esta transferencia entre el intervalo de tiempo. Por lo tanto,

$$\dot{Q}_{\text{prom}} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{92.6 \text{ kJ}}{1\,800 \text{ s}} = 0.0514 \text{ kJ/s} = \mathbf{51.4 \text{ W}}$$

c) El flujo de calor se define como la transferencia de calor por unidad de tiempo por unidad de área, o sea, la razón de transferencia del calor por unidad de área. Por lo tanto, en este caso, el flujo promedio de calor es

$$\dot{q}_{\text{prom}} = \frac{\dot{Q}_{\text{prom}}}{A} = \frac{\dot{Q}_{\text{prom}}}{\pi D^2} = \frac{51.4 \text{ W}}{\pi (0.1 \text{ m})^2} = 1636 \text{ W/m}^2$$

Discusión Note que el flujo de calor puede variar con la ubicación sobre una superficie. El valor antes calculado es el flujo promedio de calor sobre toda la superficie de la bola.

1-4 ■ PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La **primera ley de la termodinámica**, también conocida como **principio de conservación de la energía**, expresa que *en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar las formas*. Por lo tanto, toda pequeña cantidad de energía debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El principio de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue: *El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso*. Es decir,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que entra en el} \\ \text{sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que sale del} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{energía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right) \quad (1-9)$$

Dado que la energía se puede transferir hacia un sistema, o hacia afuera de éste, por medio de *calor*, *trabajo* y *flujo de masa*, y que la energía total de un sistema simple compresible consta de las energías interna, cinética y potencial, el **balance de energía** para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de} \\ \text{energía por calor, trabajo} \\ \text{y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio en las energías} \\ \text{interna, cinética,} \\ \text{potencial, etc.}}} \quad (\text{J}) \quad (1-10)$$

o bien, en la **forma de razones**, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{ent}} - \dot{E}_{\text{sal}}}_{\substack{\text{Velocidad de la transferencia} \\ \text{neta de energía por calor,} \\ \text{trabajo y masa}}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\substack{\text{Velocidad del cambio en las} \\ \text{energías interna, cinética,} \\ \text{potencial, etc.}}} \quad (\text{W}) \quad (1-11)$$

La energía es una propiedad y el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el estado del sistema. Por lo tanto, el cambio en la energía de un sistema es cero ($\Delta E_{\text{sistema}} = 0$) si el estado de ese sistema no cambia durante el proceso, entonces el proceso es estacionario. En este caso, el balance de energía se reduce a (figura 1-14)

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{ent}}}_{\substack{\text{Razón de transferencia neta} \\ \text{de energía, hacia adentro,} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\dot{E}_{\text{sal}}}_{\substack{\text{Razón de transferencia neta} \\ \text{de energía, hacia afuera,} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} \quad (1-12)$$

Estado estacionario, forma de razones:

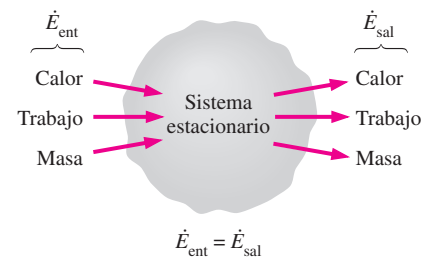


FIGURA 1-14

En operación estable, la velocidad de transferencia de energía hacia un sistema es igual a la velocidad de transferencia de energía hacia afuera de ese sistema.

En ausencia de efectos significativos eléctricos, magnéticos, de movimiento, gravitatorios y de tensión superficial (es decir, para sistemas compresibles simples

estacionarios), el cambio en la *energía total* de un sistema durante un proceso es sencillamente el cambio en su *energía interna*; es decir, $\Delta E_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{sistema}}$.

En el análisis de la transferencia de calor, es usual tener interés únicamente en las formas de energía que se pueden transferir como resultado de una diferencia de temperatura; es decir, el calor o energía térmica. En esos casos resulta conveniente escribir un **balance de calor** y tratar la conversión de las energías nuclear, química, mecánica y eléctrica hacia energía térmica como *generación de calor*. En ese caso, el *balance de energía* se puede expresar como

$$\underbrace{Q_{\text{ent}} - Q_{\text{sal}}}_{\text{Transferencia neta de calor}} + \underbrace{E_{\text{gen}}}_{\text{Generación de calor}} = \underbrace{\Delta E_{\text{térmica, sistema}}}_{\text{Cambio en la energía térmica del sistema}} \quad (\text{J}) \quad (1-13)$$

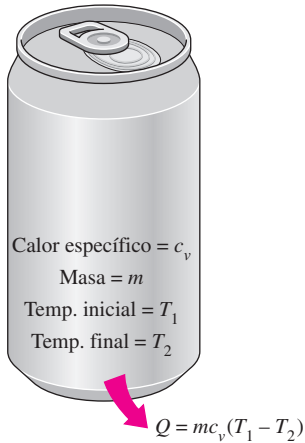


FIGURA 1-15

En ausencia de cualesquiera interacciones de trabajo, el cambio en el contenido de energía interna de un sistema cerrado es igual a la transferencia neta de calor.

Balance de energía para sistemas cerrados (masa fija)

Un sistema cerrado consta de una *masa fija*. La energía total E para la mayor parte de los sistemas que se encuentran en la práctica consiste en la energía interna U . Éste es en especial el caso para los sistemas estacionarios, ya que no comprenden cambios en la velocidad o elevación durante el proceso. En ese caso, la relación del balance de energía se reduce a

$$\text{Sistema cerrado estacionario: } E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = \Delta U = mc_v \Delta T \quad (\text{J}) \quad (1-14)$$

en donde se expresa el cambio en la energía interna en términos de la masa m , el calor específico a volumen constante c_v , y el cambio en la temperatura, ΔT , del sistema. Cuando el sistema sólo comprende transferencia de calor y ninguna interacción de trabajo cruza su frontera, la relación del balance de energía se reduce todavía más hasta (figura 1-15)

$$\text{Sistema cerrado estacionario, sin trabajo: } Q = mc_v \Delta T \quad (\text{J}) \quad (1-15)$$

donde Q es la cantidad neta de la transferencia de calor que entra o sale del sistema. La anterior es la forma de la relación del balance de energía que se usará con más frecuencia al tratar con una masa fija.

Balance de energía para sistemas de flujo estacionario

Un gran número de aparatos de ingeniería, como los calentadores de agua y los radiadores de los automóviles, implica flujo de masa, hacia adentro y hacia afuera de un sistema, y se consideran como *volúmenes de control*. La mayor parte de los volúmenes de control se analizan en condiciones estacionarias de operación. El término *estacionario* significa *ningún cambio con el tiempo* en una ubicación específica. Lo opuesto a estacionario es *no estacionario* o *transitorio*. Asimismo, el término *uniforme* implica *ningún cambio con la posición* en toda una superficie o región en un tiempo específico. Estos significados son coherentes con su uso cotidiano [novia estable (estacionaria), distribución uniforme, etcétera]. El contenido total de energía de un volumen de control durante un *proceso de flujo estacionario* permanece constante ($E_{\text{VC}} = \text{constante}$). Es decir, el cambio en la energía total del volumen de control durante un proceso de este tipo es cero ($\Delta E_{\text{VC}} = 0$). Por tanto, la cantidad de energía que entra en un volumen de control en todas las formas (calor, trabajo, transferencia de masa) para un proceso de flujo estacionario debe ser igual a la cantidad de energía que sale de él.

La cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de un aparato de flujo, por unidad de tiempo, se llama **gasto de masa** y se denota por \dot{m} . Un fluido puede fluir hacia adentro o hacia afuera de un volumen de control a

través de tubos o ductos. El gasto de masa de un fluido que fluye en un tubo o ducto es proporcional al área de la sección transversal A_c de ese tubo o ducto, la densidad ρ y la velocidad \mathcal{V} del fluido. El gasto de masa a través de un área diferencial dA_c se puede expresar como $\delta \dot{m} = \rho \mathcal{V}_n dA_c$, en donde \mathcal{V}_n es la componente de la velocidad perpendicular a dA_c . El gasto de masa a través de toda el área de la sección transversal se obtiene por integración sobre A_c .

A menudo se puede considerar, en forma aproximada, que el flujo de un fluido por un tubo o ducto es *unidimensional*. Es decir, se puede suponer que las propiedades varían sólo en una dirección (la del flujo). Como resultado, se supone que todas las propiedades son uniformes en la sección transversal perpendicular a la dirección del flujo y también se supone que las propiedades tienen *valores promedio en masa* sobre toda la sección transversal. En la aproximación de flujo unidimensional, el gasto de masa de un fluido que fluye en un tubo o ducto se puede expresar como (figura 1-16)

$$\dot{m} = \rho \mathcal{V} A_c \quad (\text{kg/s}) \quad (1-16)$$

en donde ρ es la densidad del fluido, \mathcal{V} es la velocidad promedio del mismo en la dirección del flujo y A_c es el área de la sección transversal del tubo o ducto.

El volumen de un fluido que fluye por un tubo o ducto por unidad de tiempo se llama **gasto volumétrico** \dot{V} y se expresa como

$$\dot{V} = \mathcal{V} A_c = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1-17)$$

Note que el gasto de masa de un fluido por un tubo o ducto permanece constante durante el flujo estacionario. Sin embargo, éste no es el caso para el gasto volumétrico, a menos que la densidad del fluido permanezca constante.

Para un sistema de flujo estacionario con una entrada y una salida, la velocidad del flujo de masa hacia adentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad del flujo de masa hacia afuera de él; es decir, $\dot{m}_{\text{ent}} = \dot{m}_{\text{sal}} = \dot{m}$. Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son despreciables, que es el caso más común, y no se tiene interacción de trabajo, el balance de energía para tal sistema de flujo estacionario se reduce a (figura 1-17)

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \quad (\text{kJ/s}) \quad (1-18)$$

en donde \dot{Q} es la velocidad de la transferencia neta de calor hacia adentro o hacia afuera del volumen de control. La anterior es la forma de relación de balance de energía que se usará con la mayor frecuencia para los sistemas de flujo estacionario.

Balance de energía en la superficie

Como se mencionó al inicio del capítulo, el calor se transfiere por los mecanismos de conducción, convección y radiación y, a menudo, el calor cambia de vehículos a medida que se transfiere de un medio a otro. Por ejemplo, el calor conducido hasta la superficie exterior de la pared de una casa en invierno es transferido por convección, por el aire frío del exterior, conforme es irradiado hacia los alrededores fríos. En esos casos puede ser necesario seguir el rastro de las interacciones energéticas en la superficie y esto se hace aplicando el principio de conservación de la energía a la superficie.

Una superficie no contiene volumen ni masa y, por tanto, tampoco energía. Por lo mismo, una superficie se puede concebir como un sistema ficticio cuyo contenido de energía permanece constante durante un proceso (precisamente como un sistema de estado estacionario o de flujo estacionario). Entonces el balance de energía para una superficie se puede expresar como

$$\text{Balance de energía en la superficie: } \dot{E}_{\text{ent}} = \dot{E}_{\text{sal}} \quad (1-19)$$

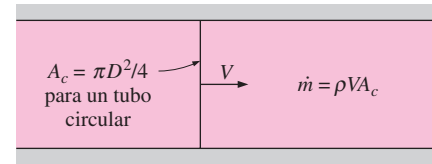


FIGURA 1-16

El gasto de masa de un fluido en una sección transversal es igual al producto de la densidad de ese fluido, la velocidad promedio del mismo y el área de la sección transversal.

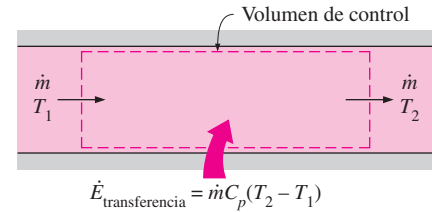
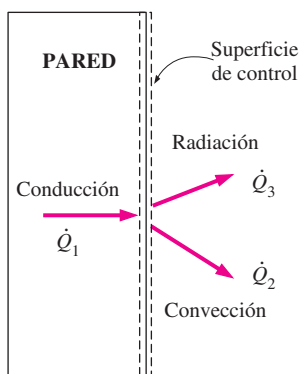
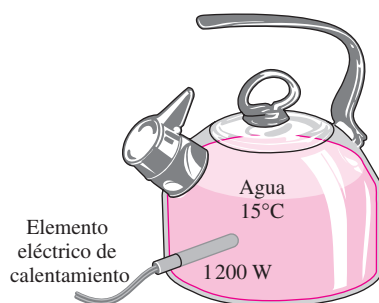


FIGURA 1-17

En condiciones estacionarias, la velocidad neta de transferencia de energía hacia un fluido en un volumen de control es igual a la velocidad de incremento en la energía de la corriente de fluido que fluye a través de ese volumen.

**FIGURA 1-18**

Interacciones energéticas en la superficie exterior de la pared de una casa.

**FIGURA 1-19**

Esquema para el ejemplo 1-2.

Esta relación es válida tanto para condiciones estacionarias como transitorias y el balance de energía en la superficie no comprende generación de calor puesto que una superficie no tiene volumen. En la figura 1-18 el balance de energía para la superficie exterior, por ejemplo, se puede expresar como

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 \quad (1-20)$$

donde \dot{Q}_1 es la conducción a través de la pared hasta la superficie, \dot{Q}_2 es la convección de calor de la superficie hacia el aire del exterior y \dot{Q}_3 es la radiación neta de la superficie hacia los alrededores.

Cuando no se conocen las direcciones de las interacciones, se puede suponer que todas se dirigen hacia la superficie y el balance de energía en la superficie se puede expresar como $\sum \dot{E}_{\text{ent}} = 0$. Note que las interacciones en la dirección opuesta finalizarán con valores negativos balanceando esta ecuación.

EJEMPLO 1-2 Calentamiento de agua en una tetera eléctrica

Se van a calentar 1.2 kg de agua líquida, inicialmente a 15°C, hasta 95°C en una tetera equipada con un elemento eléctrico de calentamiento de 1 200 W en su interior (figura 1-19). La masa de la tetera es de 0.5 kg y tiene un calor específico promedio de 0.7 kJ/kg · °C. Tomando el calor específico del agua como 4.18 kJ/kg · °C y descartando cualquier pérdida de calor proveniente de la tetera, determine cuánto tiempo tardará en calentarse el agua.

SOLUCIÓN Se va a calentar agua líquida en una tetera eléctrica. Se va a determinar el tiempo de calentamiento.

Suposiciones 1 La pérdida de calor proveniente de la tetera es despreciable. 2 Se pueden usar propiedades constantes tanto para la tetera como para el agua.

Propiedades Los calores específicos promedio se dan como de 0.7 kJ/kg · °C, para la tetera, y de 4.18 kJ/kg · °C, para el agua.

Análisis Se toma la tetera y el agua en ella como el sistema, el cual es cerrado (masa fija). En este caso, el balance de energía se puede expresar como

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

$$E_{\text{ent}} = \Delta U_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{agua}} + \Delta U_{\text{tetera}}$$

Entonces la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura del agua y la de la tetera desde 15°C hasta 95°C es

$$\begin{aligned} E_{\text{ent}} &= (mc\Delta T)_{\text{agua}} + (mc\Delta T)_{\text{tetera}} \\ &= (1.2 \text{ kg})(4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(95 - 15)^\circ\text{C} + (0.5 \text{ kg})(0.7 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(95 - 15)^\circ\text{C} \\ &= 429.3 \text{ kJ} \end{aligned}$$

La unidad eléctrica de calentamiento de 1 200 W suministrará energía a razón de 1.2 kW, o sea, 1.2 kJ por segundo. Por lo tanto, el tiempo necesario para que este calentador suministre 429.3 kJ de calor se determina a partir de

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{\text{Energía total transferida}}{\text{Velocidad de transferencia de la energía}} = \frac{E_{\text{ent}}}{\dot{E}_{\text{transferencia}}} = \frac{429.3 \text{ kJ}}{1.2 \text{ kJ/s}} = 358 \text{ s} \\ &= \mathbf{6.0 \text{ min}} \end{aligned}$$

Discusión En realidad, tomará más de 6 minutos realizar este proceso de calentamiento, ya que es inevitable alguna pérdida de calor en el curso del mismo. Igualmente, las unidades del calor específico $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ y $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ son equivalentes y pueden intercambiarse.

EJEMPLO 1-3 Pérdida de calor en los ductos de calefacción en un sótano

Una sección de 5 m de largo de un sistema de calefacción de una casa pasa a través de un espacio no calentado en el sótano (figura 1-20). La sección transversal del ducto rectangular del sistema de calefacción es de $20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$. El aire caliente entra en el ducto a 100 kPa y 60°C , a una velocidad promedio de 5 m/s . La temperatura del aire en el ducto cae hasta 54°C como resultado de la pérdida de calor hacia el espacio frío en el sótano. Determine la razón de la pérdida de calor del aire en el ducto hacia el sótano en condiciones estacionarias. Asimismo, determine el costo de esta pérdida de calor por hora si la casa se calienta por medio de un calefactor de gas natural que tiene una eficiencia de 80% y el costo del gas natural en esa zona es de 0.60 dólar/therm ($1 \text{ therm} = 100\,000 \text{ Btu} = 105\,500 \text{ kJ}$).

SOLUCIÓN La temperatura del aire en el ducto de calefacción de una casa cae como resultado de la pérdida de calor hacia el espacio frío en el sótano. Se van a determinar la razón de la pérdida de calor del aire caliente y su costo.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación. 2 El aire se puede tratar como un gas ideal con propiedades constantes a la temperatura ambiente.

Propiedades El calor específico a presión constante del aire a la temperatura promedio de $(54 + 60)/2 = 57^\circ\text{C}$ es de $1.007 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (tabla A-15).

Análisis Se toma la sección del sótano del sistema de calefacción como nuestro sistema, el cual es de flujo estacionario. Se puede determinar la razón de la pérdida de calor del aire en el ducto a partir de

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

donde \dot{m} es el gasto de masa y ΔT es la caída en la temperatura. La densidad del aire en las condiciones de entrada es

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{100 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(60 + 273)\text{K}} = 1.046 \text{ kg/m}^3$$

El área de la sección transversal del ducto es

$$A_c = (0.20 \text{ m})(0.25 \text{ m}) = 0.05 \text{ m}^2$$

Entonces el gasto de masa de aire que pasa por el ducto y la razón de pérdida de calor quedan

$$\dot{m} = \rho \dot{V} A_c = (1.046 \text{ kg/m}^3)(5 \text{ m/s})(0.05 \text{ m}^2) = 0.2615 \text{ kg/s}$$

y

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{pérdida}} &= \dot{m} C_p (T_{\text{ent}} - T_{\text{sal}}) \\ &= (0.2615 \text{ kg/s})(1.007 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(60 - 54)^\circ\text{C} \\ &= \mathbf{1.58 \text{ kJ/s}} \end{aligned}$$

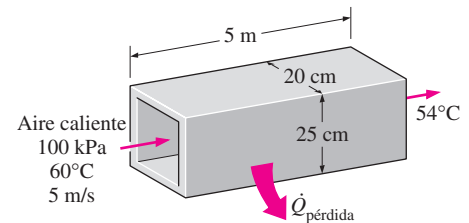


FIGURA 1-20

Esquema para el ejemplo 1-3.

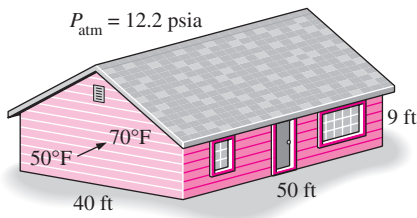


FIGURA 1-21

Esquema para el ejemplo 1-4.

o sea, 5 688 kJ/h. El costo de esta pérdida de calor para el propietario de la casa es

$$\begin{aligned}\text{Costo de la pérdida de calor} &= \frac{(\text{Razón de la pérdida de calor}) \times (\text{Costo unitario de la entrada de energía})}{\text{Eficiencia del calefactor}} \\ &= \frac{(5\,688 \text{ kJ/h})(0.60 \text{ dólar/therm}) \left(\frac{1 \text{ therm}}{105\,500 \text{ kJ}} \right)}{0.80} \\ &= \mathbf{0.108 \text{ dólar/h}}\end{aligned}$$

Discusión La pérdida de calor por los ductos de calefacción en el sótano le está costando al propietario de la casa 10.8 centavos de dólar por hora. Suponiendo que el calentador opera 2 000 horas durante la temporada de calefacción, el costo anual de esta pérdida de calor totaliza 216 dólares. La mayor parte de este dinero se puede ahorrar aislando los ductos de calefacción en las zonas no calentadas.

EJEMPLO 1-4 Calefacción eléctrica de una casa ubicada a gran altitud

Considere una casa que tiene un espacio de piso de 2 000 ft² y una altura promedio de 9 ft y que se encuentra a 5 000 ft sobre el nivel del mar en donde la presión atmosférica estándar es de 12.2 psia (figura 1.21). Inicialmente, la casa está a una temperatura uniforme de 50°F. Ahora se enciende el calefactor eléctrico y funciona hasta que la temperatura del aire en la casa se eleva hasta un valor promedio de 70°F. Determine la cantidad de energía transferida al aire suponiendo que *a*) la casa es hermética al aire y, por tanto, no hay fugas de éste durante el proceso de calentamiento y *b*) algo de aire se escapa por las grietas conforme el aire caliente que está en la casa se expande a presión constante. Determine también el costo de este calor para cada caso, si el precio de la electricidad en esa zona es de 0.075 dólar/kWh.

SOLUCIÓN El aire en la casa se calienta por medio de un calentador eléctrico. Se debe determinar la cantidad y el costo de la energía transferida al aire, para los casos de volumen constante y presión constante.

Suposiciones 1 El aire se puede considerar un gas ideal con propiedades constantes. 2 La pérdida de calor desde la casa durante el curso del calentamiento es despreciable. 3 El volumen ocupado por los muebles y otras cosas es despreciable.

Propiedades Los calores específicos del aire a la temperatura promedio de $(50 + 70)/2 = 60^\circ\text{F}$ son $c_p = 0.240 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ y $c_v = c_p - R = 0.171 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ (tablas A-11 y A-15I).

Análisis El volumen y la masa del aire en la casa son

$$\begin{aligned}V &= (\text{Área de piso})(\text{Altura}) = (2\,000 \text{ ft}^2)(9 \text{ ft}) = 18\,000 \text{ ft}^3 \\ m &= \frac{PV}{RT} = \frac{(12.2 \text{ psia})(18\,000 \text{ ft}^3)}{(0.3704 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lbm} \cdot \text{R})(50 + 460)\text{R}} = 1\,162 \text{ lbm}\end{aligned}$$

a) La cantidad de energía transferida al aire a volumen constante es sencillamente el cambio en su energía interna y se determina a partir de

$$\begin{aligned}E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} &= \Delta E_{\text{sistema}} \\ E_{\text{ent, volumen constante}} &= \Delta U_{\text{aire}} = mC_v \Delta T \\ &= (1\,162 \text{ lbm})(0.171 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F})(70 - 50)^\circ\text{F} \\ &= \mathbf{3\,974 \text{ Btu}}\end{aligned}$$

A un costo unitario de 0.075 dólar/kWh, el costo total de esta energía es

$$\begin{aligned}\text{Costo de la energía} &= (\text{Cantidad de energía})(\text{Costo unitario de la energía}) \\ &= (3\,974 \text{ Btu})(0.075 \text{ dólar/kWh})\left(\frac{1 \text{ kWh}}{3\,412 \text{ Btu}}\right) \\ &= \mathbf{0.087 \text{ dólar}}\end{aligned}$$

b) La cantidad de energía transferida al aire a presión constante es el cambio en su entalpía y se determina a partir de

$$\begin{aligned}E_{\text{ent, presión constante}} &= \Delta H_{\text{aire}} = mc_p \Delta T \\ &= (1\,162 \text{ lbm})(0.240 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F})(70 - 50)^\circ\text{F} \\ &= \mathbf{5\,578 \text{ Btu}}\end{aligned}$$

A un costo unitario de 0.075 dólar/kWh, el costo total de esta energía es

$$\begin{aligned}\text{Costo de la energía} &= (\text{Cantidad de energía})(\text{Costo unitario de la energía}) \\ &= (5\,578 \text{ Btu})(0.075 \text{ dólar/kWh})\left(\frac{1 \text{ kWh}}{3\,412 \text{ Btu}}\right) \\ &= \mathbf{0.123 \text{ dólar}}\end{aligned}$$

Discusión En el primer caso, elevar la temperatura del aire en esta casa, de 50°F hasta 70°F, cuesta alrededor de 9 centavos de dólar y, en el segundo, 12 centavos. La segunda respuesta es más realista, ya que todas las casas tienen grietas, en especial alrededor de las puertas y ventanas, y, en esencia, la presión dentro de la casa permanece constante en el curso del proceso de calentamiento. Por lo tanto, en la práctica, se aplica el segundo enfoque. Sin embargo, esta óptica conservadora predice un tanto en exceso la cantidad de energía que se usa, puesto que algo del aire se escapa a través de las grietas antes de calentarse hasta 70°F.

1-5 ■ MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En la sección 1-1 se definió el **calor** como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la *cantidad* de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que trata de la determinación de las *razones* de esas transferencias de energía es la *transferencia de calor*. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: *conducción*, *convección* y *radiación*. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja. Enseguida se da una breve descripción de cada modo. En los capítulos posteriores de este texto se da un estudio más detallado de estos modos.

1-6 ■ CONDUCCIÓN

La **conducción** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las *co-*

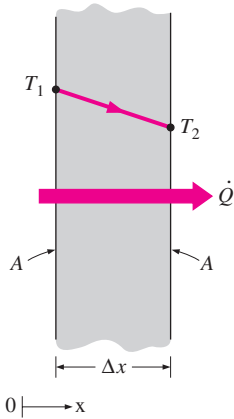


FIGURA 1-22

Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A .

lisiones y a la *difusión* de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las *vibraciones* de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los *electrones libres*. Por ejemplo, llegará el momento en que una bebida enlatada fría en un cuarto cálido se caliente hasta la temperatura ambiente como resultado de la transferencia de calor por conducción, del cuarto hacia la bebida, a través del aluminio.

La *rapidez* o *razón* de la conducción de calor a través de un medio depende de la *configuración geométrica* de éste, su *espesor* y el *material* de que esté hecho, así como de la *diferencia de temperatura* a través de él. Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con fibra de vidrio (un material aislante) se reduce la razón de la pérdida de calor de ese tanque. Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la pérdida de calor. También se conoce que un tanque de agua caliente perderá calor a mayor rapidez cuando se baja la temperatura del cuarto en donde se aloja. Además, entre más grande sea el tanque, mayor será el área superficial y, por consiguiente, la razón de la pérdida de calor.

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la figura 1-22. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$. Los experimentos han demostrado que la razón de la transferencia de calor, \dot{Q} , a través de la pared se *duplica* cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor; pero se *reduce a la mitad* cuando se duplica el espesor L de la pared. Por tanto, se concluye que *la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa*; es decir,

$$\text{Razón de conducción del calor} \propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

o bien,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (1-21)$$

en donde la constante de proporcionalidad k es la **conductividad térmica** del material, que es una *medida de la capacidad de un material para conducir calor* (figura 1-23). En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (1-22)$$

la cual se llama **ley de Fourier de la conducción del calor**, en honor de J. Fourier, quien la expresó por primera vez en su texto sobre transferencia de calor en 1822. Aquí, dT/dx es el **gradiente de temperatura**, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T - x (la razón de cambio de T con respecto a x), en la ubicación x . La relación antes dada indica que la razón de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x . El *signo negativo* en la ecuación 1-22 garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva.

El área A de transferencia de calor siempre es *normal* (o perpendicular) a la dirección de esa transferencia. Por ejemplo, para la pérdida de calor a través de una pared de 5 m de largo, 3 m de alto y 25 cm de espesor, el área de transferencia de calor es $A = 15 \text{ m}^2$. Note que el espesor de la pared no tiene efecto sobre A (figura 1-24).

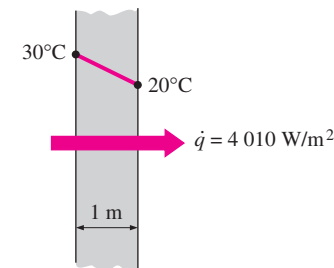
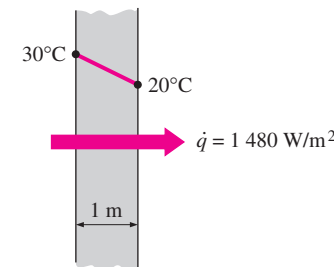
a) Cobre ($k = 401 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)b) Silicio ($k = 148 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)

FIGURA 1-23

La razón de conducción del calor a través de un sólido es directamente proporcional a su conductividad térmica.

EJEMPLO 1-5 Costo de la pérdida de calor a través de un techo

El techo de una casa calentada eléctricamente tiene 6 m de largo, 8 m de ancho y 0.25 m de espesor y está hecha de una capa plana de concreto cuya conductividad térmica es $k = 0.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (figura 1-25). Las temperaturas de las superficies interior y exterior se miden como de 15°C y 4°C , respectivamente, durante un periodo de 10 horas. Determine a) la razón de la pérdida de calor a través del techo esa noche y b) el costo de esa pérdida de calor para el propietario de la casa, si el costo de la electricidad es de 0.08 dólar/kWh.

SOLUCIÓN Las superficies interior y exterior del techo plano de concreto de una casa calentada eléctricamente se mantienen a temperaturas especificadas durante una noche. Se van a determinar la pérdida de calor a través del techo esa noche y su costo.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación durante toda la noche dado que las temperaturas de las superficies del techo permanecen constantes a los valores especificados. 2 Se pueden usar propiedades constantes para el techo.

Propiedades La conductividad térmica del techo se da como $k = 0.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$.

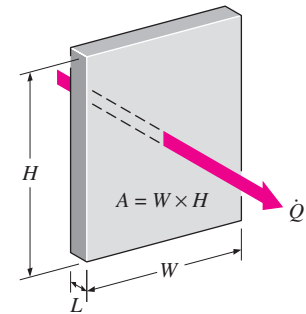
Análisis a) Nótese que la transferencia de calor a través del techo es por conducción y que el área de éste es $A = 6 \text{ m} \times 8 \text{ m} = 48 \text{ m}^2$, la razón de la transferencia de calor en estado estacionario a través del techo se determina por

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C})(48 \text{ m}^2) \frac{(15 - 4)^\circ\text{C}}{0.25 \text{ m}} = \mathbf{1\,690 \text{ W} = 1.69 \text{ kW}}$$

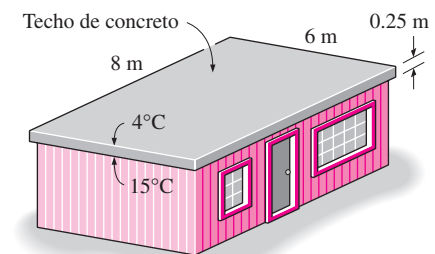
b) La cantidad de pérdida de calor a través del techo durante un periodo de 10 h y su costo se determinan a partir de

$$\begin{aligned} Q &= \dot{Q} \Delta t = (1.69 \text{ kW})(10 \text{ h}) = 16.9 \text{ kWh} \\ \text{Costo} &= (\text{Cantidad de energía})(\text{Costo unitario de la energía}) \\ &= (16.9 \text{ kWh})(0.08 \text{ dólar/kWh}) = \mathbf{1.35 \text{ dólares}} \end{aligned}$$

Discusión El costo para el propietario de la casa de la pérdida de calor a través del techo esa noche fue de 1.35 dólares. La factura total por calefacción de la casa será mucho mayor ya que, en estos cálculos, no se consideran las pérdidas de calor a través de las paredes.

**FIGURA 1-24**

En el análisis de la conducción del calor, A representa el área *perpendicular* a la dirección de transferencia de calor.

**FIGURA 1-25**

Esquema para el ejemplo 1-5.

Conductividad térmica

Se ha visto que los diferentes materiales almacenan calor en forma diferente y se ha definido la propiedad de calor específico C_p como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica. Por ejemplo, $C_p = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, para el agua, y $C_p = 0.45 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, para el hierro, a la temperatura ambiente, indica que el agua puede almacenar casi 10 veces más energía que el hierro por unidad de masa. Del mismo modo, la conductividad térmica k es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. Por ejemplo, $k = 0.607 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, para el agua, y $k = 80.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, para el hierro, a la temperatura ambiente, indica que el hierro conduce el calor más de 100 veces más rápido que el agua. Por tanto, se dice que el agua es mala conductora del calor en relación con el hierro, aun cuando el agua es un medio excelente para almacenar energía térmica.

La ecuación 1-21 para la razón de la transferencia de calor por conducción, en condiciones estacionarias, también se puede concebir como la ecuación de definición para la conductividad térmica. Por tanto, la **conductividad térmica**

TABLA 1-1

Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente

Material	k , W/m · °C*
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

*Multiplíquese por 0.5778 para convertir a Btu/h · ft · °F.

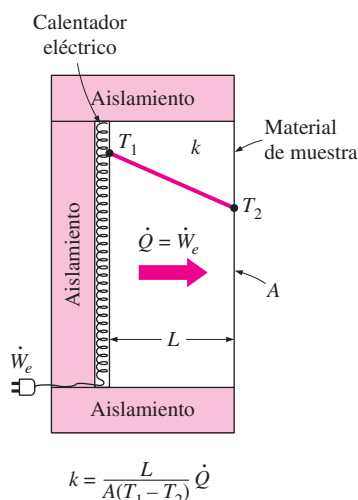


FIGURA 1-26

Aparato experimental sencillo para determinar la conductividad térmica de un material.

ca de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un *aislante*. En la tabla 1-1 se dan las conductividades térmicas de algunos materiales comunes a la temperatura ambiente. La conductividad térmica del cobre puro a la temperatura ambiente es $k = 401 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, lo cual indica que una pared de cobre de 1 m de espesor conducirá el calor a razón de 401 W por m^2 de área por $^\circ\text{C}$ de diferencia de temperatura a través de ella. Note que los materiales como el cobre y la plata, que son buenos conductores eléctricos, también lo son del calor y tienen valores elevados de conductividad térmica. Los materiales como el caucho, la madera y la espuma de estireno son malos conductores del calor y tienen valores bajos de conductividad térmica.

Se puede calentar una capa de material de espesor y área conocidos, desde uno de sus lados, por medio de un calentador de resistencia eléctrica de potencia conocida. Si las superficies exteriores del calentador están bien aisladas, todo el calor generado por la resistencia se transferirá a través del material cuya conductividad se va a determinar. Entonces, midiendo las dos temperaturas de las superficies del material cuando se llega al estado estacionario de la transferencia y sustituyéndolas en la ecuación 1-21 junto con otras cantidades conocidas se obtiene la conductividad térmica (figura 1-26).

Las conductividades térmicas de los materiales varían sobre un amplio intervalo, como se muestra en la figura 1-27. Las conductividades térmicas de los gases varían en un factor de 10^4 con respecto a las de los metales puros como el cobre. Note que los cristales y metales puros tienen las conductividades térmicas más elevadas, y los gases y los materiales aislantes, las más bajas.

La temperatura es una medida de las energías cinéticas de las partículas, como las moléculas o los átomos de una sustancia. En un líquido o gas, la energía cinética de las moléculas se debe a su movimiento aleatorio de traslación, así como a sus movimientos de vibración y rotación. Cuando chocan dos moléculas que poseen energías cinéticas diferentes, parte de la energía cinética de la molécula más energética (la de temperatura más elevada) se transfiere a la menos energética (la de temperatura más baja), de manera muy semejante a cuando chocan dos bolas elásticas de la misma masa a diferentes velocidades, parte de la energía cinética de la bola más rápida se transfiere a la más lenta. Entre más alta es la temperatura, más rápido se mueven las moléculas, mayor es el número de las colisiones y mejor es la transferencia de calor.

La *teoría cinética* de los gases predice, y los experimentos lo confirman, que la conductividad térmica de los gases es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura termodinámica T e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa molar M . Por lo tanto, la conductividad térmica de un gas crece al aumentar la temperatura y al disminuir la masa molar. De modo que no es sorprendente que la conductividad térmica del helio ($M = 4$) sea mucho más elevada que la del aire ($M = 29$) y la del argón ($M = 40$).

En la tabla A-16 se da una lista de conductividades térmicas de gases a la presión de 1 atm. Sin embargo, también se pueden usar a presiones diferentes de 1 atm, ya que la conductividad térmica de los gases es *independiente de la presión* en un amplio rango de presiones encontradas en la práctica.

El mecanismo de conducción del calor en un *líquido* se complica por el hecho de que las moléculas están más cercanas entre sí y ejercen un campo de fuerzas intermoleculares más intenso. Las conductividades térmicas de los líquidos suelen encontrarse entre las de los sólidos y las de los gases. Normalmente, la conductividad térmica de una sustancia alcanza su valor máximo en

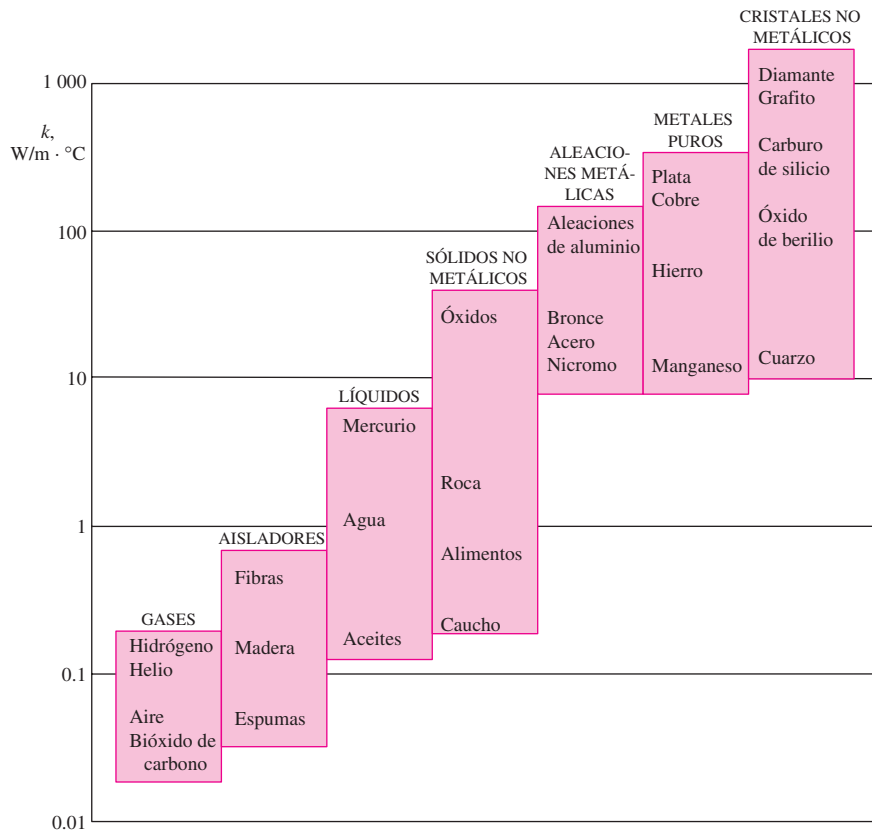


FIGURA 1-27

Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente.

la fase sólida y el mínimo en la fase gaseosa. A diferencia de los gases, las conductividades térmicas de la mayor parte de los líquidos decrecen al incrementarse la temperatura, constituyendo el agua una notable excepción. Como los gases, la conductividad de los líquidos disminuye al aumentar la masa molar. Los metales líquidos como el mercurio y el sodio presentan conductividades térmicas elevadas y resultan muy apropiados para usarse cuando se desea una gran razón de transferencia de calor hacia un líquido, como en las plantas nucleares de generación eléctrica.

En los *sólidos* la conducción del calor se debe a dos efectos: las *ondas reticulares de vibración* inducidas por los movimientos de vibración de las moléculas, colocadas en posiciones más o menos fijas de una manera periódica conocida como red cristalina, y la energía transportada por medio del *flujo libre de electrones* en el sólido (figura 1-28). La conductividad térmica de un sólido se obtiene al sumar la componente reticular y la electrónica. Las conductividades térmicas más o menos elevadas de los metales puros se deben principalmente a la componente electrónica. La componente reticular de la conductividad térmica depende con intensidad de la manera en que las moléculas están dispuestas. Por ejemplo, el diamante, que es un sólido cristalino intensamente ordenado, tiene la conductividad térmica conocida más elevada a la temperatura ambiente.

A diferencia de los metales, los cuales son buenos conductores de la electricidad y el calor, los *sólidos cristalinos*, como el diamante y los semiconductores como el silicio, son buenos conductores del calor pero malos conductores eléctricos. Como resultado, esos materiales encuentran un uso muy amplio en la industria electrónica. A pesar de su precio más elevado, se usan sumideros de calor de diamante en el enfriamiento de componentes electrónicos sensibles debido a la excelente conductividad térmica del mismo. Los aceites y

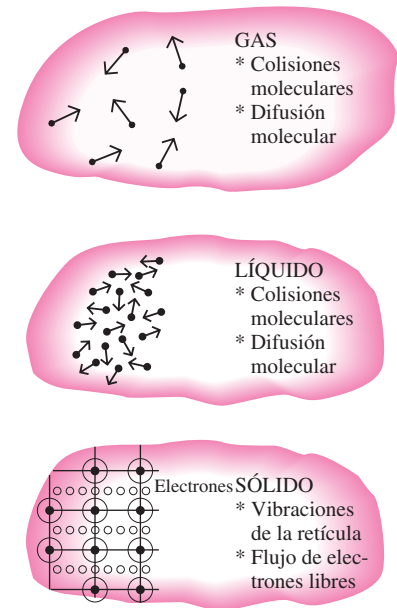


FIGURA 1-28

Los mecanismos de conducción de calor en las diferentes fases de una sustancia.

TABLA 1-2

La conductividad térmica de una aleación suele ser mucho más baja que la de cualesquiera de los dos metales de los cuales está compuesta

Metal puro o aleación	k , W/m · °C, a 300 K
Cobre	401
Níquel	91
Constantano (55% Cu, 45% Ni)	23
Cobre	401
Aluminio	237
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	52

TABLA 1-3

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura

T , K	Cobre	Aluminio
100	482	302
200	413	237
300	401	237
400	393	240
600	379	231
800	366	218

selladores de silicio son de uso común en el empaque de componentes electrónicos porque proporcionan tanto un buen contacto térmico como un buen aislamiento eléctrico.

Los metales puros tienen altas conductividades térmicas y se pensaría que las *aleaciones metálicas* también deben tener altas conductividades. Se esperaría que una aleación de dos metales con conductividades térmicas k_1 y k_2 tenga una conductividad k entre k_1 y k_2 . Pero no es así. La conductividad térmica de una aleación de dos metales suele ser mucho más baja que la de cualquiera de ellos, como se muestra en la tabla 1-2. Incluso, en un metal puro, pequeñas cantidades de moléculas “extrañas” que por sí mismas sean buenas conductoras perturban de manera grave la transferencia de calor en ese metal. Por ejemplo, la conductividad térmica del acero que contenga sólo 1% de cromo es 62 W/m · °C, en tanto que las conductividades térmicas del hierro y el cromo son 83 y 95 W/m · °C, respectivamente.

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura (tabla 1-3). La variación de la conductividad térmica sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativa para otros, como se muestra en la figura 1-29. Las conductividades térmicas de ciertos sólidos exhiben incrementos sorprendentes a temperaturas cercanas al cero absoluto, cuando estos sólidos se convierten en *superconductores*. Por ejemplo, la conductividad del cobre alcanza un valor máximo de alrededor de 20 000 W/m · °C a 20 K, la cual es alrededor de 50 veces mayor a la correspondiente a la temperatura ambiente. En las tablas A-3 a A-16, se dan las conductividades térmicas y otras propiedades térmicas de diversos materiales.

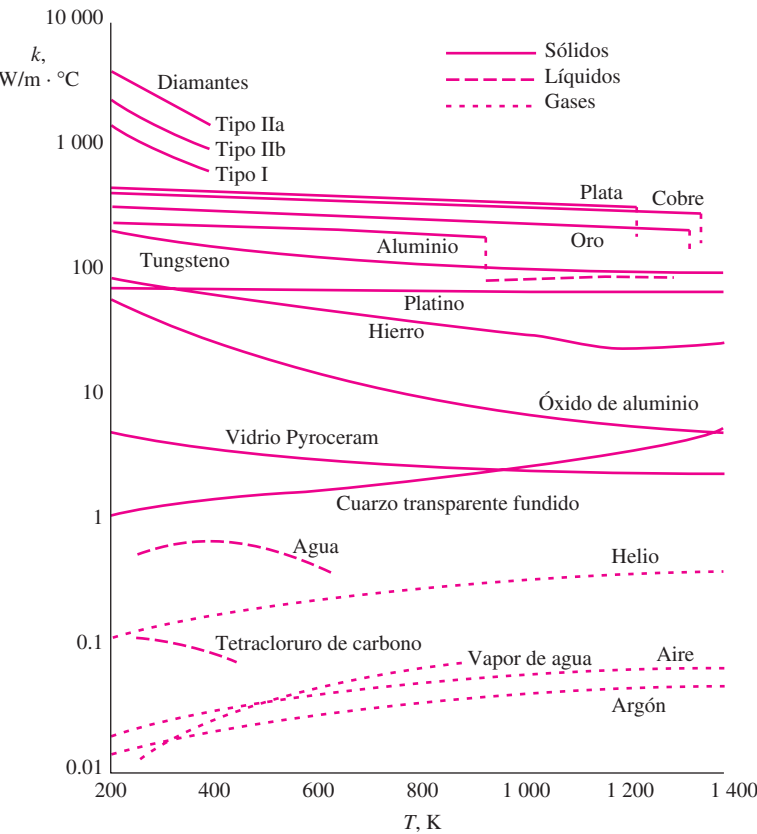


FIGURA 1-29

Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura (tomado de White, Ref. 10).

La dependencia con respecto a la temperatura de la conductividad térmica causa complejidad considerable en el análisis de la conducción. Por lo tanto, es práctica común evaluar la conductividad térmica k a la *temperatura promedio* y tratarla como *constante* en los cálculos.

En el análisis de la transferencia de calor normalmente se supone que un material es *isotrópico*; es decir, tiene propiedades uniformes en todas direcciones. Esta suposición es realista para la mayor parte de los materiales, excepto para aquellos que exhiben características estructurales diferentes en direcciones diferentes, como los materiales compuestos laminados y la madera. Por ejemplo, la conductividad térmica de la madera a través de la fibra es diferente a la que se tiene en sentido paralelo a esa fibra.

Difusividad térmica

El producto ρc_p , que se encuentra con frecuencia en el análisis de la transferencia de calor, se llama **capacidad calorífica** de un material. Tanto el calor específico c_p como la capacidad calorífica ρc_p representan la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Pero c_p la expresa *por unidad de masa*, en tanto que ρc_p la expresa *por unidad de volumen*, como se puede advertir a partir de sus unidades $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ y $\text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, respectivamente.

Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la **difusividad térmica**, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-23)$$

Note que la conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica ρc_p representa cuánta energía almacena un material por unidad de volumen. Por lo tanto, la difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el *calor conducido* a través del material y el *calor almacenado* por unidad de volumen. Es obvio que un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido todavía más.

En la tabla 1-4 se dan las difusividades térmicas de algunos materiales comunes a 20°C . Note que la difusividad térmica va desde $\alpha = 0.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, para el agua, hasta $174 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, para la plata, la cual es una diferencia de más de mil veces. Note también que las difusividades térmicas de la carne de res y del agua son las mismas. Esto no es sorprendente, ya que la carne así como los vegetales y las frutas frescos están constituidos en su mayor parte por agua y, por tanto, poseen las propiedades térmicas de ésta.

TABLA 1-4

Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente

Material	$\alpha, \text{m}^2/\text{s}^*$
Plata	149×10^{-6}
Oro	127×10^{-6}
Cobre	113×10^{-6}
Aluminio	97.5×10^{-6}
Hierro	22.8×10^{-6}
Mercurio (l)	4.7×10^{-6}
Mármol	1.2×10^{-6}
Hielo	1.2×10^{-6}
Concreto	0.75×10^{-6}
Ladrillo	0.52×10^{-6}
Suelo macizo (seco)	0.52×10^{-6}
Vidrio	0.34×10^{-6}
Lana de vidrio	0.23×10^{-6}
Agua (l)	0.14×10^{-6}
Carne de res	0.14×10^{-6}
Madera (roble)	0.13×10^{-6}

*Multiplíquese por 10.76 para convertir a ft^2/s .

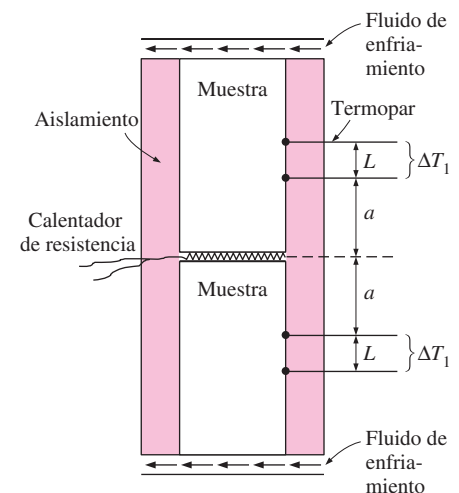


FIGURA 1-30

Aparato para medir la conductividad térmica de un material, usando dos muestras idénticas y un calentador de resistencia delgada (ejemplo 1-6).

EJEMPLO 1-6 Medición de la conductividad térmica de un material

Una manera común de medir la conductividad térmica de un material es colocar, como en un emparedado, un calentador eléctrico, constituido por una hoja térmica, entre dos muestras idénticas del material, como se muestra en la figura 1-30. El espesor del calentador de resistencia, incluyendo su cubierta, la cual está hecha de goma delgada de silicio, suele ser menor de 0.5 mm. Un fluido circulante, como agua del grifo, mantiene los extremos expuestos de las muestras a temperatura constante. Las superficies laterales de las muestras es-

tán bien aisladas para garantizar que la transferencia de calor a través de las muestras sea unidimensional. Se empotran dos termopares en cada una de las muestras, separados cierta distancia L , y en un termómetro diferencial se lee la caída de temperatura, ΔT , a través de esta distancia a lo largo de cada muestra. Cuando se alcanzan condiciones estacionarias de operación, la razón total de transferencia de calor a través de las dos muestras se vuelve igual a la potencia eléctrica suministrada por el calentador, la cual se determina al multiplicar la corriente eléctrica por la tensión.

En cierto experimento se usan muestras cilíndricas con un diámetro de 5 cm y una longitud de 10 cm. Los dos termopares de las muestras están colocados con una separación de 3 cm. Después de los procesos transitorios iniciales, se observa que el calentador eléctrico consume 0.4 A a 110 V y en los dos termómetros diferenciales se lee una diferencia de temperatura de 15°C. Determine la conductividad térmica de la muestra.

SOLUCIÓN Se va a determinar la conductividad térmica de un material asegurando una conducción unidimensional de calor y midiendo las temperaturas cuando se alcanzan las condiciones estacionarias de operación.

Suposiciones **1** Existen condiciones estacionarias de operación, ya que las lecturas de temperatura no cambian con el tiempo. **2** Las pérdidas de calor por las superficies laterales del aparato son despreciables dado que están bien aisladas y, por tanto, todo el calor generado por el calentador es conducido a través de las muestras. **3** El aparato posee simetría térmica.

Análisis La potencia eléctrica consumida por el calentador de resistencia y que se convierte en calor es

$$\dot{W}_e = VI = (110 \text{ V})(0.4 \text{ A}) = 44 \text{ W}$$

La razón del flujo de calor a través de cada muestra es

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \dot{W}_e = \frac{1}{2} \times (44 \text{ W}) = 22 \text{ W}$$

ya que, debido a la simetría, sólo la mitad del calor generado fluirá a través de cada muestra. Leer la misma diferencia de temperatura de uno a otro lado de la misma distancia en cada una de las muestras también confirma que el aparato posee simetría térmica. El área de transferencia de calor es perpendicular a la dirección del flujo de éste, la cual, en este caso, es el área de la sección transversal del cilindro:

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \pi (0.05 \text{ m})^2 = 0.001963 \text{ m}^2$$

Puesto que la temperatura cae en 15°C en una distancia de 3 cm en la dirección del flujo del calor, la conductividad térmica de la muestra se determina como

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{L} \rightarrow k = \frac{\dot{Q}L}{A \Delta T} = \frac{(22 \text{ W})(0.03 \text{ m})}{(0.001963 \text{ m}^2)(15^\circ\text{C})} = \mathbf{22.4 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Discusión Quizá el lector se está preguntando si en realidad se necesita usar dos muestras en el aparato, dado que las mediciones en la segunda muestra no dan información adicional. Parece como que se puede reemplazar una de ellas por un aislamiento. De hecho, no se necesita la segunda muestra; sin embargo, permite verificar las mediciones de temperatura en la primera y proporciona simetría térmica, lo cual reduce el error experimental.

EJEMPLO 1-7 Conversión entre el SI y las unidades inglesas

Un ingeniero que trabaja en el análisis de la transferencia de calor de un edificio de ladrillos, en unidades inglesas, necesita la conductividad térmica del la-

drillo. Pero el único valor que puede hallar en sus manuales es $0.72 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, lo cual está en unidades SI. Para empeorar las cosas, el ingeniero no cuenta con un factor directo de conversión entre los dos sistemas de unidades para la conductividad térmica. ¿Puede usted ayudarlo?

SOLUCIÓN La situación que encara este ingeniero no es única y, a menudo, la mayor parte de los ingenieros se encuentran en una posición semejante. Una persona debe tener mucho cuidado durante la conversión de unidades para no caer en algunas trampas comunes y evitar algunas equivocaciones costosas. Aun cuando la conversión de unidades es un proceso sencillo, requiere el mayor de los cuidados y un razonamiento cuidadoso.

Los factores de conversión para W y m son directos y se dan en las tablas de conversión como

$$1 \text{ W} = 3.41214 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ m} = 3.2808 \text{ ft}$$

Pero la conversión de $^\circ\text{C}$ a $^\circ\text{F}$ no es tan sencilla y puede convertirse en una fuente de error si no se tiene cuidado. Quizá lo primero que viene a la mente es reemplazar $^\circ\text{C}$ por $(^\circ\text{F} - 32)/1.8$, ya que $T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F}) - 32]/1.8$. Pero esto es erróneo puesto que el $^\circ\text{C}$ en la unidad $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ significa *por cambio en $^\circ\text{C}$ en la temperatura*. Dado que un cambio de 1°C en la temperatura corresponde a 1.8°F , el factor de conversión apropiado que debe usarse es

$$1^\circ\text{C} = 1.8^\circ\text{F}$$

Sustituyendo, se obtiene

$$1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{3.41214 \text{ Btu/h}}{(3.2808 \text{ ft})(1.8^\circ\text{F})} = 0.5778 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$$

el cual es el factor deseado de conversión. Por lo tanto, la conductividad térmica del ladrillo en unidades inglesas es

$$\begin{aligned} k_{\text{ladrillo}} &= 0.72 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \\ &= 0.72 \times (0.5778 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}) \\ &= \mathbf{0.42 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}} \end{aligned}$$

Discusión Note que el valor de la conductividad térmica de un material en unidades inglesas es más o menos la mitad del que se da en unidades SI (figura 1-31). Note también que se redondea el resultado a dos cifras significativas (igual que en el valor original), ya que expresar el resultado con más cifras significativas (como 0.4160, en lugar de 0.42) daría a entender falsamente un valor más exacto que el original.

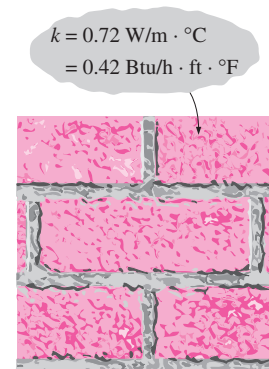


FIGURA 1-31

El valor de la conductividad térmica en unidades inglesas se obtiene al multiplicar el valor en unidades SI por 0.5778.

1-7 ■ CONVECCIÓN

La **convección** es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la *conducción* y el *movimiento de fluidos*. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia.

Considere el enfriamiento de un bloque caliente al soplar aire frío sobre su superficie superior (figura 1-32). La energía se transfiere primero a la capa de aire

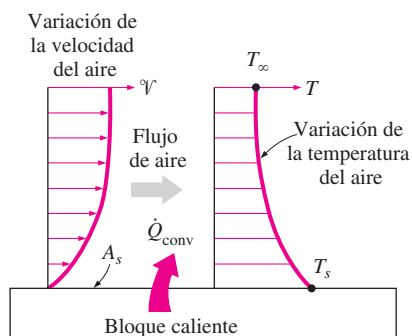


FIGURA 1-32

Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección.

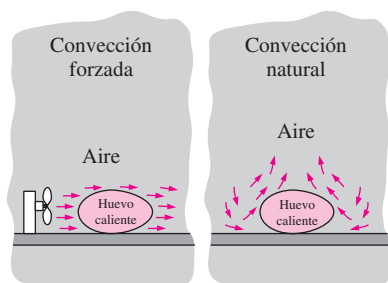


FIGURA 1-33

Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural.

TABLA 1-5

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Tipo de convección	h , $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Convección libre de gases	2–25
Convección libre de líquidos	10–1 000
Convección forzada de gases	25–250
Convección forzada de líquidos	50–20 000
Ebullición y condensación	2 500–100 000

*Multiplíquese por 0.176 para convertir a $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$.

adyacente al bloque, por conducción. Enseguida, esta energía es acarreada alejándola de la superficie, por convección; es decir, por los efectos combinados de la conducción dentro del aire, que se debe al movimiento aleatorio de moléculas de éste, y del movimiento masivo o macroscópico de ese aire que remueve el aire calentado cercano a la superficie y lo reemplaza por otro más frío.

La convección recibe el nombre de **convección forzada** si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es **convección natural** (o **libre**) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido (figura 1-33). Por ejemplo, en ausencia de un ventilador, la transferencia de calor del bloque caliente de la figura 1-31 será por convección natural, ya que, en este caso, cualquier movimiento en el aire se deberá a la elevación del aire más caliente (y, por tanto, más ligero) cercano a la superficie y la caída del más frío (y, por tanto, más pesado) para llenar su lugar. La transferencia de calor entre el bloque y el aire circundante será por conducción si la diferencia de temperatura entre el aire y el bloque no es suficientemente grande como para vencer la resistencia de ese aire al movimiento y, por consiguiente, para iniciar corrientes naturales de convección.

Los procesos de transferencia de calor que comprenden *cambio de fase* de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la *transferencia de calor por convección* es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la **ley de Newton del enfriamiento** como

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (1-24)$$

en donde h es el *coeficiente de transferencia de calor por convección*, en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ o $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. Note que en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. En la tabla 1-5 se dan valores típicos de h .

Algunos no consideran a la convección como un mecanismo fundamental de transferencia del calor ya que, en esencia, es conducción de calor en presencia de un movimiento de fluido. Pero todavía se necesita dar un nombre a este fenómeno combinado, a menos que se desee seguir refiriéndose a él como “conducción con movimiento de fluido”. Por tanto, resulta práctico reconocer a la convección como un mecanismo separado de transferencia del calor, a pesar de los argumentos válidos en contra.

EJEMPLO 1-8

Medición del coeficiente de transferencia de calor por convección

Un alambre eléctrico de 2 m de largo y 0.3 cm de diámetro se extiende a través de un cuarto a 15°C , como se muestra en la figura 1-34. Se genera calor en

el alambre como resultado de un calentamiento por resistencia y se mide la temperatura de la superficie de ese alambre como 152°C en operación estacionaria. Asimismo, se miden la caída de tensión y la corriente eléctrica que pasa por el alambre, resultando ser 60 V y 1.5 A, respectivamente. Descartando cualquier transferencia de calor por radiación, determine el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie exterior del alambre y el aire que se encuentra en el cuarto.

SOLUCIÓN Se va a determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección de un alambre calentado eléctricamente hacia el aire, midiendo las temperaturas cuando se alcanzan las condiciones estacionarias de operación y la potencia eléctrica consumida.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación, ya que las lecturas de la temperatura no cambian con el tiempo. 2 La transferencia de calor por radiación es despreciable.

Análisis Cuando se alcanzan las condiciones estacionarias de operación, la razón de la pérdida de calor del alambre será igual a la rapidez de generación de calor que resulta del calentamiento por resistencia; es decir,

$$\dot{Q} = \dot{E}_{\text{generado}} = \mathbf{VI} = (60 \text{ V})(1.5 \text{ A}) = 90 \text{ W}$$

El área superficial del alambre es

$$A_s = \pi DL = \pi(0.003 \text{ m})(2 \text{ m}) = 0.01885 \text{ m}^2$$

La ley de Newton del enfriamiento para la transferencia de calor por convección se expresa como

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Descartando cualquier transferencia de calor por radiación y, por tanto, suponiendo que toda la pérdida de calor del alambre ocurre por convección, el coeficiente de transferencia de calor por convección se determina como

$$h = \frac{\dot{Q}_{\text{conv}}}{A_s(T_s - T_{\infty})} = \frac{90 \text{ W}}{(0.01885 \text{ m}^2)(152 - 15)^{\circ}\text{C}} = \mathbf{34.9 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Discusión Note que el sencillo planteamiento que acaba de describirse se puede usar para determinar coeficientes promedio de transferencia de calor desde diversas superficies en el aire. Asimismo, se puede eliminar la transferencia de calor por radiación manteniendo las superficies circundantes a la temperatura del alambre.

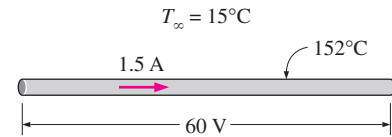


FIGURA 1-34

Esquema para el ejemplo 1-8.

1-8 ■ RADIACIÓN

La **radiación** es la energía emitida por la materia en forma de *ondas electromagnéticas* (o *fotones*) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un *medio interventor*. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra.

En los estudios de transferencia de calor es de interés la *radiación térmica*, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica.

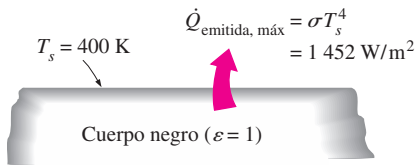


FIGURA 1-35

La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica.

TABLA 1-6

Emisividades de algunos materiales a 300 K

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92–0.97
Pavimento de asfalto	0.85–0.93
Ladrillo rojo	0.93–0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82–0.92
Suelo	0.93–0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92–0.96

La radiación es un *fenómeno volumétrico* y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un *fenómeno superficial* para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la **ley de Stefan-Boltzmann** como

$$\dot{Q}_{\text{emitida, máx}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (1-25)$$

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4$ es la *constante de Stefan-Boltzmann*. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama **cuerpo negro** y la radiación emitida por éste es la **radiación del cuerpo negro** (figura 1-35). La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (1-26)$$

en donde ϵ es la **emisividad** de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \epsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\epsilon = 1$. En la tabla 1-6, se dan las emisividades de algunas superficies.

Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su **absortividad** α , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Como la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él. Es decir, un cuerpo negro es un absorbente perfecto ($\alpha = 1$) del mismo modo que es un emisor perfecto.

En general, tanto ϵ como α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La **ley de Kirchhoff** de la radiación afirma que la emisividad y la absortividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. En muchas aplicaciones prácticas, las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud, y la absortividad promedio de una superficie se considera igual a su emisividad promedio. La razón a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de (figura 1-36)

$$\dot{Q}_{\text{absorbida}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incidente}} \quad (\text{W}) \quad (1-27)$$

donde $\dot{Q}_{\text{incidente}}$ es la razón a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absortividad de la superficie. Para las superficies opacas (no transparentes), la parte de la radiación incidente no absorbida por la superficie se refleja.

La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia *neta* de calor por radiación. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está *ganando* energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está *perdiendo* energía por radiación. En general, la determinación de la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies es un asunto complicado, ya que depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación.

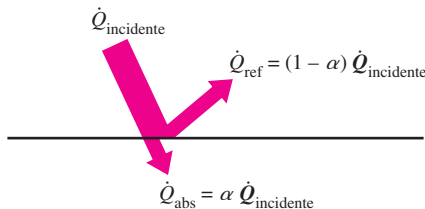


FIGURA 1-36

Absorción de la radiación incidente sobre una superficie opaca de absortividad α .

Cuando una superficie de emisividad ε y área superficial A_s , a una *temperatura termodinámica* T_s , está por *completo encerrada* por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura termodinámica T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por (figura 1-37)

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad (\text{W}) \quad (1-28)$$

En este caso especial la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación.

La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde ésta, rodeada por un gas como el aire, ocurre *paralela* a la conducción (o convección, si se tiene un movimiento masivo del gas) entre esa superficie y el gas. Por tanto, la transferencia total de calor se determina al *sumar* las contribuciones de los dos mecanismos de transferencia. Por sencillez y conveniencia esto se lleva a cabo con frecuencia mediante la definición de un **coeficiente combinado de transferencia de calor**, $h_{\text{combinado}}$, que incluye los efectos tanto de la convección como de la radiación. Entonces, la razón *total* de transferencia de calor hacia una superficie, o desde ésta, por convección y radiación se expresa como

$$\dot{Q}_{\text{total}} = h_{\text{combinado}} A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{W}) \quad (1-29)$$

Note que, en esencia, el coeficiente combinado de transferencia de calor es un coeficiente de transferencia de calor por convección modificado para incluir los efectos de la radiación.

La radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero despreciable con relación a la convección forzada. Por tanto, en las aplicaciones de convección forzada se suele descartar la radiación, en especial cuando las superficies que intervienen tienen emisividades bajas y temperaturas de bajas a moderadas.

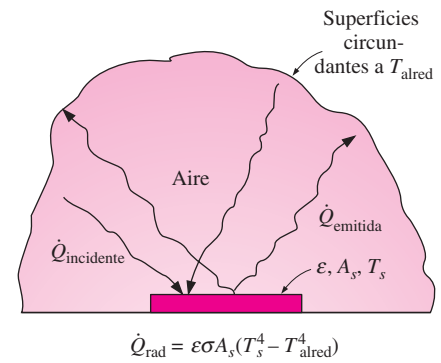


FIGURA 1-37

Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan.

EJEMPLO 1-9 Efecto de la radiación sobre la comodidad térmica

Es una experiencia común sentir “escalofrío” en invierno y “bochorno” en el verano en nuestras casas, incluso cuando el ajuste del termostato se mantiene igual. Esto se debe al llamado “efecto de radiación”, resultante del intercambio de calor por radiación entre nuestros cuerpos y las superficies circundantes de las paredes y el techo.

Considere una persona que está parada en un cuarto mantenido a 22°C en todo momento. Se observa que las superficies interiores de las paredes, pisos y el techo de la casa se encuentran a una temperatura promedio de 10°C, en invierno, y de 25°C, en verano. Determine la razón de transferencia de calor por radiación entre esta persona y las superficies circundantes, si el área superficial expuesta y la temperatura promedio de la superficie exterior de ella son de 1.4 m² y 30°C, respectivamente (figura 1-38).

SOLUCIÓN Se van a determinar las razones de transferencia de calor por radiación entre una persona y las superficies circundantes que están a temperaturas específicas en verano y en invierno.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación. 2 No se considera la transferencia de calor por convección. 3 La persona está por completo rodeada por las superficies interiores del cuarto. 4 Las superficies circundantes están a una temperatura uniforme.

Propiedades La emisividad de una persona es $\varepsilon = 0.95$ (tabla 1-6).

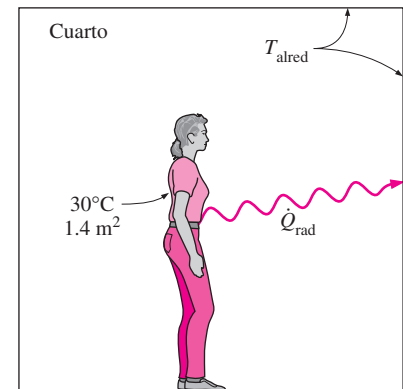


FIGURA 1-38

Esquema para el ejemplo 1-9.

Análisis Las razones netas de transferencia de calor por radiación del cuerpo hacia las paredes, techo y piso, en invierno y en verano, son

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad, invierno}} &= \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred, invierno}}^4) \\ &= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.4 \text{ m}^2) \\ &\quad \times [(30 + 273)^4 - (10 + 273)^4] \text{ K}^4 \\ &= \mathbf{152 \text{ W}}\end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad, verano}} &= \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred, verano}}^4) \\ &= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.4 \text{ m}^2) \\ &\quad \times [(30 + 273)^4 - (25 + 273)^4] \text{ K}^4 \\ &= \mathbf{40.9 \text{ W}}\end{aligned}$$

Discusión Nótese que, en los cálculos de la radiación, deben usarse *temperaturas termodinámicas* (es decir, *absolutas*). Asimismo, obsérvese que la razón de la pérdida de calor de la persona, por radiación, es casi cuatro veces más grande en invierno de lo que es en verano, lo cual explica el “frío” que sentimos en aquella temporada, incluso si el ajuste del termostato se mantiene igual.

1-9 ■ MECANISMOS SIMULTÁNEOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se mencionó que existen tres mecanismos de transferencia de calor, pero no pueden existir simultáneamente los tres en un medio. Por ejemplo, la transferencia de calor sólo ocurre por conducción en los *sólidos opacos*, pero por conducción y radiación en los *sólidos semitransparentes*. Por tanto, un sólido puede comprender conducción y radiación pero no convección. Sin embargo, un sólido puede presentar transferencia de calor por convección y/o radiación en sus superficies expuestas a un fluido o a otras superficies. Por ejemplo, las superficies exteriores de un trozo frío de roca se calentarán en un medio ambiente más caliente, como resultado de la ganancia de calor por convección (del aire) y la radiación (del Sol o de las superficies circundantes más calientes). Pero las partes interiores de la roca se calentarán a medida que el calor se transfiere hacia la región interior de ella por conducción.

La transferencia de calor es por conducción y, posiblemente, por radiación en un *fluido estático* (sin movimiento masivo del fluido) y por convección y radiación en un *fluido que fluye*. En ausencia de radiación, la transferencia de calor a través de un fluido es por conducción o convección, dependiendo de la presencia de algún movimiento masivo de ese fluido. La convección se puede concebir como conducción y movimiento del fluido combinados, y la conducción en un fluido se puede concebir como un caso especial de convección en ausencia de algún movimiento de ese fluido (figura 1-39).

Por tanto, cuando se trata con la transferencia de calor a través de un *fluido*, se tiene *conducción o convección*, pero no las dos. Asimismo, los gases son prácticamente transparentes a la radiación, excepto por algunos gases que se sabe absorben radiación con gran fuerza en ciertas longitudes de onda. El ozono, por ejemplo, absorbe intensamente la radiación ultravioleta. Pero, en la mayor parte de los casos, un gas entre dos superficies sólidas no interfiere con la radiación y actúa de manera efectiva como el vacío. Por otra parte, los líquidos suelen ser fuertes absorbentes de radiación.

Por último, la transferencia de calor a través del *vacío* sólo se produce por radiación, ya que la conducción o la convección requieren de la presencia de un medio material.

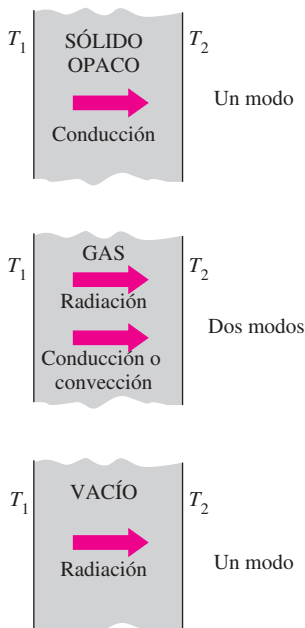


FIGURA 1-39

Aun cuando se tienen tres mecanismos de transferencia de calor, un medio sólo puede comprender dos de ellos simultáneamente.

EJEMPLO 1-10 Pérdida de calor de una persona

Considere una persona que está parada en un cuarto con brisa a 20°C. Determine la razón total de transferencia de calor desde esta persona, si el área superficial expuesta y la temperatura promedio de la superficie exterior de ella son de 1.6 m² y 29°C, respectivamente, y el coeficiente de transferencia de calor por convección es de 6 W/m² · °C (figura 1-40).

SOLUCIÓN Se va a determinar la razón total de transferencia de calor desde una persona, tanto por convección como por radiación, hacia el aire y superficies circundantes que se encuentran a las temperaturas especificadas.

Suposiciones **1** Existen condiciones estacionarias de operación. **2** La persona está por completo rodeada por las superficies interiores del cuarto. **3** Las superficies circundantes están a la misma temperatura que el aire en el cuarto. **4** La conducción del calor hacia el piso, a través de los pies, es despreciable.

Propiedades La emisividad de una persona es $\varepsilon = 0.95$ (tabla 1-6).

Análisis La transferencia de calor entre la persona y el aire del cuarto es por convección (en lugar de por conducción), ya que se puede concebir que el aire que se encuentra en la vecindad de la piel o de la ropa se calienta y sube, como resultado de la transferencia de calor del cuerpo, iniciándose corrientes naturales de convección. Parece que, en este caso, el valor determinado en forma experimental para la razón de la transferencia de calor por convección es 6 W por unidad de área superficial (m²) por unidad de diferencia de temperatura (en K o °C) entre la persona y el aire alejado de ella. Por lo que la razón de la transferencia de calor de la persona al aire del cuarto es

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{conv}} &= hA_s(T_s - T_\infty) \\ &= (6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})(1.6 \text{ m}^2)(29 - 20)^\circ\text{C} \\ &= 86.4 \text{ W}\end{aligned}$$

La persona también pierde calor por radiación hacia las superficies de las paredes circundantes. En este caso, por sencillez, considere la temperatura de las superficies de las paredes, techo y piso como iguales a la del aire, pero reconozca que éste no es necesariamente el caso. Estas superficies pueden estar a una temperatura superior o inferior a la promedio del aire del cuarto, dependiendo de las condiciones en el exterior y de la estructura de las paredes. Considerando que el aire no interviene con la radiación y que la persona está por completo encerrada por las superficies circundantes, la razón neta de la transferencia de calor por radiación de la persona hacia las paredes, techo y piso circundantes es

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad}} &= \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \\ &= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.6 \text{ m}^2) \\ &\quad \times [(29 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \text{ K}^4 \\ &= 81.7 \text{ W}\end{aligned}$$

Nótese que deben usarse temperaturas *termodinámicas* en los cálculos de la radiación. Asimismo, obsérvese que se usó el valor de la emisividad para la piel y la ropa a la temperatura ambiente, ya que no se espera que la emisividad cambie de manera significativa a una temperatura ligeramente más elevada.

Entonces, la razón de la transferencia total de calor del cuerpo se determina al sumar estas dos cantidades:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = (86.4 + 81.7) \text{ W} \cong \mathbf{168 \text{ W}}$$

Discusión La transferencia de calor sería mucho más elevada si la persona no estuviera vestida, ya que la temperatura de la superficie expuesta sería más al-

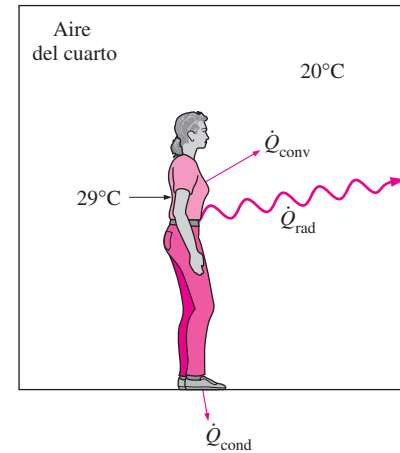


FIGURA 1-40

Transferencia de calor desde la persona descrita en el ejemplo 1-10.

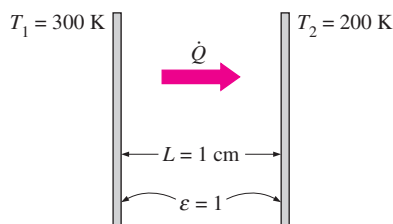


FIGURA 1-41

Esquema para el ejemplo 1-11.

EJEMPLO 1-11**Transferencia de calor entre dos placas isotérmicas**

Considere la transferencia de calor en estado estacionario entre dos placas paralelas que se encuentran a las temperaturas constantes de $T_1 = 300 \text{ K}$ y $T_2 = 200 \text{ K}$ y están separadas una distancia $L = 1 \text{ cm}$, como se muestra en la figura 1-41. Suponiendo que las superficies son negras (emisividad $\varepsilon = 1$), determine la razón de transferencia de calor entre las placas por unidad de área superficial, suponiendo que el espacio entre ellas está *a)* lleno con aire atmosférico, *b)* vacío, *c)* lleno con aislamiento de uretano y *d)* lleno con superaislamiento que tiene una conductividad térmica aparente de $0.00002 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$.

SOLUCIÓN Se va a determinar la razón de transferencia de calor entre dos placas grandes paralelas, a las temperaturas especificadas, para cuatro casos diferentes.

Suposiciones **1** Existen condiciones estacionarias de operación. **2** No se tienen corrientes de convección natural en el aire entre las placas. **3** Las superficies son negras y, por tanto, $\varepsilon = 1$.

Propiedades La conductividad térmica a la temperatura promedio de 250 K es $k = 0.0219 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ para el aire (tabla A-11), $0.026 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ para el aislamiento de uretano (tabla A-6) y $0.00002 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ para el superaislamiento.

Análisis *a)* Las razones de transferencia de calor por conducción y por radiación entre las placas, a través de la capa de aire, son

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.0219 \text{ W/m} \cdot \text{K})(1 \text{ m}^2) \frac{(300 - 200) \text{ K}}{0.01 \text{ m}} = 219 \text{ W}$$

y

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{rad}} &= \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \\ &= (1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1 \text{ m}^2)[(300 \text{ K})^4 - (200 \text{ K})^4] = 369 \text{ W} \end{aligned}$$

Por lo tanto,

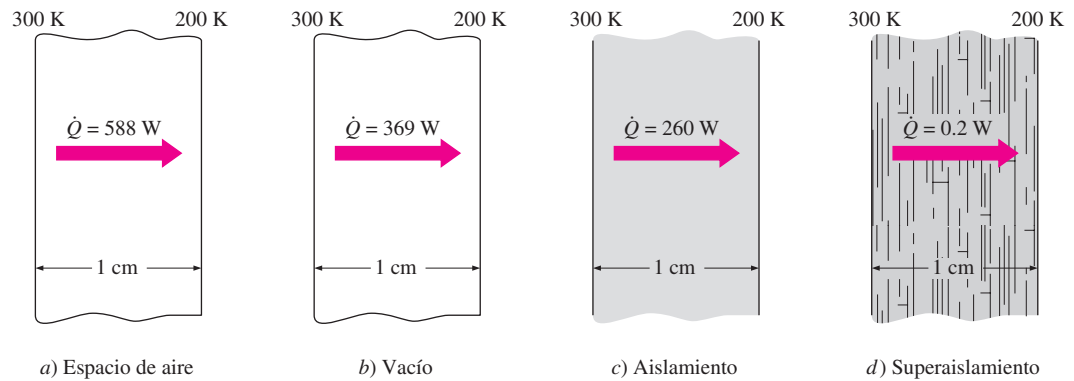
$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = 219 + 369 = \mathbf{588 \text{ W}}$$

En realidad, la razón de transferencia de calor será más alta debido a las corrientes de convección natural que es muy probable ocurran en el espacio de aire entre las placas.

b) Cuando se vacía el espacio de aire entre las placas, no habrá conducción ni convección y la única transferencia de calor entre las placas será por radiación. Por lo tanto,

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{rad}} = \mathbf{369 \text{ W}}$$

c) Un material sólido opaco colocado entre las dos placas bloquea la transferencia de calor por radiación directa entre ellas. Asimismo, la conductividad térmica

**FIGURA 1-42**

Diferentes maneras de reducir la transferencia de calor entre dos placas isotérmicas y su efectividad.

ca de un material aislante toma en cuenta la transferencia de calor por radiación que puede estar ocurriendo a través de los huecos vacíos en ese material. La razón de transferencia de calor a través del aislamiento de uretano es

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.026 \text{ W/m} \cdot \text{K})(1 \text{ m}^2) \frac{(300 - 200)\text{K}}{0.01 \text{ m}} = \mathbf{260 \text{ W}}$$

Note que la transferencia de calor a través del material de uretano es menor que la ocurrida a través del aire, determinada en a), aun cuando la conductividad térmica del aislamiento es más elevada que la del aire. Esto se debe a que el aislamiento bloquea la radiación en tanto que el aire la transmite.

d) Las capas del superaislamiento impiden cualquier transferencia de calor por radiación directa entre las placas. Sin embargo, sí ocurre la transferencia de calor por radiación entre las láminas de superaislamiento y la conductividad térmica aparente de éste toma en cuenta este efecto. Por lo tanto,

$$\dot{Q}_{\text{total}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.00002 \text{ W/m} \cdot \text{K})(1 \text{ m}^2) \frac{(300 - 200)\text{K}}{0.01 \text{ m}} = \mathbf{0.2 \text{ W}}$$

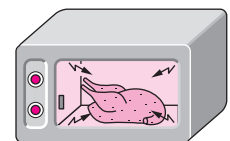
la cual es $\frac{1}{845}$ de la correspondiente al vacío. Los resultados de este ejemplo se resumen en la figura 1-42 para ponerlos en perspectiva.

Discusión En este ejemplo se demuestra la efectividad de los superaislamientos y ello explica por qué son los que se eligen en aplicaciones críticas, a pesar de su elevado costo.

EJEMPLO 1-12 Transferencia de calor en los hornos convencionales y de microondas

El cocimiento rápido y eficiente de los hornos de microondas los hace uno de los aparatos esenciales en las cocinas modernas (figura 1-43). Discuta los mecanismos de transferencia de calor asociados con la cocción de un pollo en los hornos de microondas y convencionales, y explique por qué la cocción en un horno de microondas es más eficiente.

SOLUCIÓN En un horno de microondas los alimentos se cuecen al absorber la energía de radiación electromagnética generada por el tubo de microondas, conocido como magnetrón. La radiación emitida por el magnetrón no es térmica,

**FIGURA 1-43**

Pollo cociéndose en un horno de microondas (ejemplo 1-12).

ya que su emisión no se debe a la temperatura del mismo; más bien, se debe a la conversión de energía eléctrica en radiación electromagnética a una longitud de onda específica. La longitud de onda de la radiación de microondas es tal que es *reflejada* por las superficies metálicas; *transmitida* por las cacerolas para cocinar hechas de vidrio, cerámica o plástico y *absorbida* y convertida en energía interna por las moléculas de los alimentos (en especial el agua, el azúcar y la grasa).

En un horno de microondas la *radiación* que choca contra el pollo es absorbida por la piel de éste y las partes exteriores. Como resultado, la temperatura del pollo se eleva en la piel y cerca de ésta. Enseguida, el calor es *conducido* hacia el interior del pollo desde sus partes exteriores. Por supuesto, algo del calor absorbido por la superficie exterior del pollo se pierde hacia el aire que está en el horno por *convección*.

En un horno convencional primero se calienta el aire que está en el horno hasta la temperatura deseada por medio de un elemento de calentamiento, eléctrico o de gas. Este precalentamiento puede tardar varios minutos. Entonces el calor se transfiere del aire a la piel del pollo por *convección natural*, en la mayor parte de los hornos, o por *convección forzada*, en los más recientes, en los que se utiliza un ventilador. El movimiento del aire en los hornos de convección incrementa el coeficiente de transferencia de calor por convección y, por tanto, disminuye el tiempo de cocción. Enseguida, el calor es *conducido* hacia el interior del pollo desde sus partes exteriores, como en los hornos de microondas.

En los hornos de microondas se reemplaza el lento proceso de transferencia de calor por convección de los hornos convencionales por la transferencia instantánea de calor por radiación. Como resultado, en los hornos de microondas se transfiere la energía hacia los alimentos a plena capacidad en el momento en que se encienden y, por tanto, cuecen más rápido al mismo tiempo que consumen menos energía.

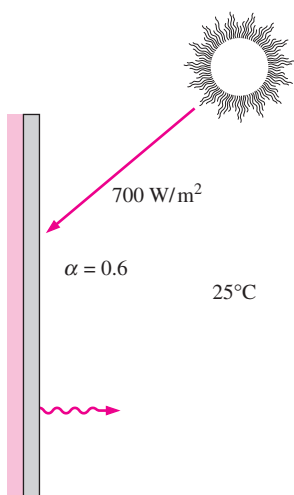


FIGURA 1-44

Esquema para el ejemplo 1-13.

EJEMPLO 1-13 Calentamiento de una placa por energía solar

Una placa metálica delgada está aislada en la parte posterior y expuesta a la radiación solar en la superficie del frente (figura 1-44). La superficie expuesta de la placa tiene una absorptividad de 0.6, para la radiación solar. Si la radiación solar incide sobre la placa a una rapidez de 700 W/m^2 y la temperatura del aire circundante es de 25°C , determine la temperatura de la superficie de la placa cuando la pérdida de calor por convección y radiación es igual a la energía absorbida por la propia placa. Suponga que el coeficiente combinado de transferencia de calor por convección y radiación es de $50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

SOLUCIÓN El lado posterior de la delgada placa metálica está aislado y el lado del frente está expuesto a la radiación solar. Se va a determinar la temperatura de la superficie de la placa cuando se estabiliza.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación. 2 La transferencia de calor a través del lado aislado de la placa es despreciable. 3 El coeficiente de transferencia de calor permanece constante.

Propiedades Se da la absorptividad solar de la placa como $\alpha = 0.6$.

Análisis La absorptividad solar de la placa es 0.6 y, por tanto, el 60% de la radiación solar incidente sobre la placa es absorbida de manera continua. Como resultado, la temperatura de la placa se elevará y aumentará la diferencia de temperatura entre ella y los alrededores. Esta diferencia creciente de temperatura causará que se incremente la razón de la pérdida de calor de la placa hacia los alrededores. En algún punto, la razón de la pérdida de calor de la placa

será igual a la de la energía solar absorbida, y la temperatura de la placa ya no cambiará. La temperatura de la placa cuando se establece la operación estacionaria se determina a partir de

$$\dot{E}_{\text{ganada}} = \dot{E}_{\text{perdida}} \quad \text{o} \quad \alpha A_s \dot{q}_{\text{incidente, solar}} = h_{\text{combinado}} A_s (T_s - T_{\infty})$$

Despejando T_s y sustituyendo, se determina la temperatura de la superficie de la placa como

$$T_s = T_{\infty} + \alpha \frac{\dot{q}_{\text{incidente, solar}}}{h_{\text{combinado}}} = 25^{\circ}\text{C} + \frac{0.6 \times (700 \text{ W/m}^2)}{50 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} = \mathbf{33.4^{\circ}\text{C}}$$

Discusión Note que las pérdidas de calor impedirán que la temperatura de la placa se eleve por encima de 33.4°C . Asimismo, el coeficiente combinado de transferencia de calor considera los efectos tanto de convección como de radiación y, por tanto, es muy conveniente para usarse en los cálculos de transferencia de calor cuando se conoce su valor con razonable exactitud.

1-10 ■ TÉCNICA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

El primer paso en el aprendizaje de cualquier ciencia es captar los fundamentos y adquirir un conocimiento sólido de ella. El paso siguiente es dominar los fundamentos al poner a prueba este conocimiento. Lo anterior se lleva a cabo al resolver problemas significativos del mundo real. La resolución de esos problemas, en especial los complicados, requiere una rutina sistemática. Mediante el uso de un procedimiento paso a paso, un ingeniero puede reducir la resolución de un problema complicado en la resolución de una serie de problemas sencillos (figura 1-45). Cuando aborde un problema, se recomienda que utilice los pasos siguientes tan celosamente como sea posible. Esto le ayudará a evitar algunas de las trampas comunes asociadas con la resolución de problemas.

Paso 1: Enunciado del problema

Con sus propias palabras exprese con brevedad el problema, la información clave que se le proporciona y las cantidades que debe hallar. Esto equivale a asegurarse de que comprende el problema y los objetivos antes de que intente resolverlo.

Paso 2: Esquema

Dibuje un esquema realista del sistema físico que interviene y haga una lista de la información pertinente sobre la figura. El esquema no tiene que ser tan elaborado, sólo debe asemejarse al sistema real y mostrar las características claves. Indique cualesquiera interacciones de energía y de masa con los alrededores. Hacer una lista de la información dada sobre el esquema ayuda a ver el problema completo de una vez.

Paso 3: Suposiciones y aproximaciones

Enúnciense cualesquiera suposiciones y aproximaciones apropiadas que se establezcan con el fin de simplificar el problema y hacer posible una solución. Justifíquense las suposiciones cuestionables. Supónganse valores razonables para las cantidades faltantes que sean necesarias. Por ejemplo, a falta de datos específicos acerca de la presión atmosférica, se puede tomar como 1 atm. Sin embargo, se debe resaltar en el análisis que la presión atmosférica decrece al

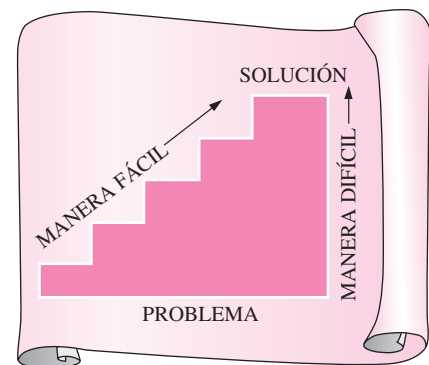


FIGURA 1-45

Un procedimiento paso a paso puede simplificar mucho la resolución de problemas.

<input type="radio"/>	Dado: Temperatura del aire en Denver
<input type="radio"/>	Debe hallarse: Densidad del aire
	Información faltante: Presión atmosférica
	Hipótesis #1: Tómese $P = 1$ atm (Inadecuado. Se ignora el efecto de la altitud. Causará un error de más de 15%.)
<input type="radio"/>	Hipótesis #2: Tómese $P = 0.83$ atm (Adecuado: sólo se ignoran pequeños efectos, como las condiciones atmosféricas.)
<input type="radio"/>	
<input type="radio"/>	

FIGURA 1-46
Las suposiciones que se hagan al resolver un problema de ingeniería deben ser razonables y justificables.

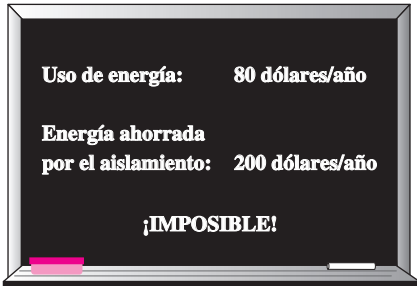


FIGURA 1-47
Se debe comprobar que los resultados obtenidos a partir de un análisis de ingeniería sean razonables.

aumentar la elevación. Por ejemplo, cae hasta 0.83 atm en Denver (elevación 1 610 m) (figura 1-46).

Paso 4: Leyes físicas

Aplique todas las leyes y principios físicos básicos pertinentes (como la conservación de la energía) y redúzcalos hasta su forma más sencilla aplicando las suposiciones establecidas. Sin embargo, en primer lugar debe identificarse con claridad la región a la cual se aplica la ley física.

Paso 5: Propiedades

Determinéanse las propiedades desconocidas necesarias para resolver el problema, con base en relaciones o tablas de propiedades. Hágase una lista de las propiedades por separado e indíquese su fuente, si se debe hacer.

Paso 6: Cálculos

Sustituya las cantidades conocidas en las relaciones simplificadas y realice los cálculos con el fin de determinar las incógnitas. Ponga atención particular en las unidades y las cancelaciones de éstas, y recuerde que una cantidad dimensional sin una unidad no tiene significado. Asimismo, no dé una sensación falsa de mucha precisión al copiar todos los dígitos de la pantalla de la calculadora; redondee los resultados hasta un número apropiado de cifras significativas (véase la pág. 39).

Paso 7: Razonamiento, verificación y discusión

Asegure las comprobaciones con el fin de que los resultados obtenidos sean razonables e intuitivos, y verifique la validez de las suposiciones cuestionables. Repita los cálculos que condujeron a valores no razonables. Por ejemplo, aislar un calentador de agua en el que se usa gas natural con valor de 80 dólares al año no puede dar por resultado un ahorro de 200 dólares anuales (figura 1-47).

Del mismo modo, señale el significado de los resultados y discuta sus implicaciones. Exprese las conclusiones a las que se puede llegar a partir de los resultados y cualesquiera recomendaciones que se puedan hacer con base en ellas. Haga énfasis en las limitaciones bajo las cuales los resultados son aplicables y tome precauciones contra cualesquiera malas interpretaciones y el uso de los resultados en situaciones en donde las suposiciones subyacentes pierden validez. Por ejemplo, si determinó que al envolver un calentador de agua con una camisa de aislamiento de 20 dólares reducirá el gasto de energía en 30 dólares al año, indique que el aislamiento se pagará por sí mismo con el costo de la energía que se ahorre en menos de un año. Sin embargo, indique también que en el análisis no se consideran las remuneraciones de la mano de obra y que lo anterior tendrá vigencia si instala el aislamiento por sí mismo.

Tenga en mente que usted presenta las soluciones a sus profesores y que cualquier análisis de ingeniería presentado a otros es una forma de comunicación. Por lo tanto, la nitidez, la organización, la integridad y la apariencia visual tienen la mayor importancia para obtener la efectividad máxima. Además, la nitidez también sirve como una gran herramienta de comprobación, ya que es muy fácil detectar errores y faltas de coherencia en un trabajo claro. La falta de cuidado y saltarse pasos para ahorrar tiempo a menudo termina costando más tiempo y ansiedad innecesaria.

El procedimiento que se acaba de describir se utiliza en los problemas resueltos como ejemplo, sin expresar en forma explícita cada paso. Para ciertos

problemas algunos de los pasos pueden no ser aplicables o ser innecesarios. Sin embargo, no se puede pasar por alto la importancia de un procedimiento lógico y ordenado para resolver los problemas. La mayor parte de las dificultades que se encuentran al resolver un problema no se deben a falta de conocimiento sino de coordinación. Se le recomienda intensamente que siga estos pasos en la resolución de problemas hasta que desarrolle un procedimiento que funcione mejor para usted.

Software para ingeniería

Quizá el lector se pregunte por qué estamos a punto de abordar un concienzudo estudio de los fundamentos de la transferencia de calor. Después de todo, casi todos los problemas que es probable se encuentren en la práctica se pueden resolver utilizando uno de los varios paquetes de software disponibles con facilidad en el mercado actual. Estos paquetes no sólo dan los resultados numéricos deseados, sino que también los proporcionan en la forma de gráficas a todo color para realizar presentaciones impresionantes. Hoy es inconcebible practicar la ingeniería sin utilizar alguno de estos paquetes. El tremendo poder de computación del que se dispone con sólo el toque de un botón es al mismo tiempo una bendición y una maldición. Es cierto que permite a los ingenieros resolver los problemas con facilidad y rapidez, pero también abre la puerta para los abusos y la falsa información. En las manos de personas con preparación deficiente estos paquetes de software son tan peligrosos como las armas poderosas y complicadas en las manos de soldados mal entrenados.

Pensar que una persona que puede usar los paquetes de software para ingeniería, sin el adiestramiento apropiado en los fundamentos, puede practicar esta disciplina es como pensar que una persona que puede usar una llave de tuercas es capaz de trabajar como mecánico de automóviles. Si fuera cierto que los estudiantes de ingeniería no necesitan todos los cursos fundamentales que están tomando porque prácticamente todo se puede hacer con rapidez y facilidad mediante las computadoras, entonces también sería cierto que los patrones ya no necesitarían contratar ingenieros con elevados salarios, ya que cualquier persona que sepa cómo usar un programa de procesamiento de textos también puede aprender cómo usar aquellos paquetes de software. Sin embargo, las estadísticas hacen ver que la demanda de ingenieros está creciendo, no está en declinación, a pesar de la disponibilidad de estos poderosos paquetes.

Siempre se debe recordar que todo el poder de computación y los paquetes de software para ingeniería de los que se dispone en la actualidad son *herramientas* que tienen significado sólo en las manos de los maestros. Tener el mejor programa de procesamiento de textos no hace que una persona sea un buen escritor, pero es evidente que la labor de un buen escritor será mucho más fácil y éste será más productivo (figura 1-48). Las calculadoras manuales no eliminaron la necesidad de enseñar a los niños cómo sumar o restar, y los complicados paquetes médicos de software no sustituyeron el adiestramiento en la escuela de medicina. Tampoco los paquetes de software de ingeniería reemplazarán la educación tradicional de ésta. Sencillamente causarán un desplazamiento en la profundidad con la que se imparten los cursos de matemáticas aplicadas a la física. Es decir, se dedicará más tiempo en el salón de clases para discutir los aspectos físicos de los problemas con mayor detalle y menos tiempo para la mecánica de los procedimientos de resolución.

Todas estas herramientas maravillosas y poderosas con las que se cuenta en la actualidad ponen una carga adicional sobre los ingenieros de hoy. Todavía deben contar con una comprensión completa de los fundamentos, desarrollar una “sensación” de los fenómenos físicos, ser capaces de poner los datos en la perspectiva apropiada y establecer juicios sólidos de ingeniería, precisamente como



FIGURA 1-48

Un excelente programa de procesamiento de textos no hace que una persona sea un buen escritor, sencillamente hace que un buen escritor sea mejor y más eficiente.

© Vol. 80/PhotoDisc

sus antecesores. Sin embargo, deben hacerlo mucho mejor y mucho más rápido, con el uso de modelos más realistas, debido a las poderosas herramientas de que disponen en la actualidad. Los ingenieros del pasado se apoyaban en los cálculos a mano, en las reglas de cálculo y, más tarde, en las calculadoras manuales y las computadoras. Ahora, se apoyan en los paquetes de software. El fácil acceso a un poder de ese tipo y la posibilidad de que una falsa comprensión o una mala interpretación cause grandes daños hace más importante en la actualidad que nunca tener un adiestramiento sólido en los fundamentos de la ingeniería. En este texto se hace un esfuerzo adicional para enfatizar el desarrollo de una comprensión intuitiva y física de los fenómenos naturales, en lugar de hacerlo sobre los detalles matemáticos de los procedimientos de resolución.

Solucionador de ecuación de ingeniería o Engineering Equation Solver (EES)

EES es un programa con el que se resuelven numéricamente sistemas de ecuaciones algebraicas o diferenciales, lineales o no lineales. Cuenta con una gran biblioteca de funciones de propiedades termofísicas, así como de funciones matemáticas, y permite al usuario suministrar datos adicionales de propiedades. A diferencia de algunos paquetes de software, con EES no se resuelven problemas de ingeniería; sólo se solucionan las ecuaciones suministradas por el usuario. Por lo tanto, éste debe entender el problema y formularlo mediante la aplicación de algunas leyes y relaciones físicas pertinentes. EES ahorra al usuario tiempo y esfuerzo considerables al resolver las ecuaciones matemáticas resultantes. Esto hace posible resolver problemas significativos de ingeniería que no son adecuados para los cálculos a mano, así como conducir estudios paramétricos con rapidez y de manera conveniente. EES es un programa muy poderoso y, sin embargo, intuitivo, por lo que es muy fácil usarlo, como se muestra en el ejemplo 1-14. El empleo y las capacidades de EES se explican en el apéndice 3, en el Online Learning Center.

EJEMPLO 1-14 Resolución de un sistema de ecuaciones con EES

La diferencia de dos números es 4 y la suma de sus cuadrados es igual a su suma más 20. Determine estos dos números.

SOLUCIÓN Se dan relaciones para la diferencia y la suma de los cuadrados de dos números. Deben determinarse éstos.

Análisis Se arranca el programa EES haciendo doble clic sobre su icono, se abre un nuevo archivo y se mecanografía lo siguiente sobre la pantalla en blanco que aparece:

$$\begin{aligned}x - y &= 4 \\ x^2 + y^2 &= x + y + 20\end{aligned}$$

lo cual es una expresión matemática exacta del enunciado del problema, denotando con x y y los números desconocidos. La solución para este sistema de dos ecuaciones no lineales con dos incógnitas se obtiene al hacer clic sobre el símbolo de “calculadora” de la barra de tareas. Esto da

$$x = 5 \quad y = 1$$

Discusión Note que todo lo que se hizo fue plantear el problema en la forma en que se haría sobre un papel; EES se encarga de todos los detalles matemá-

ticos de la resolución. Note también que las ecuaciones pueden ser lineales o no lineales y se pueden introducir en cualquier orden con las incógnitas en cualquiera de sus miembros. Los programas amigables para resolver ecuaciones, como el EES, permiten al usuario concentrarse en la física del problema, sin preocuparse por las complejidades matemáticas asociadas con la resolución del sistema resultante de ecuaciones.

Una observación sobre las cifras significativas

En los cálculos de ingeniería, la información dada no se conoce hasta más de un cierto número de cifras significativas. Como consecuencia, los resultados que se obtengan posiblemente no puedan determinarse hasta más cifras significativas. Dar los resultados con más cifras significativas da a entender que existe una mayor exactitud y debe evitarse.

Por ejemplo, considere un recipiente de 3.75 L lleno con gasolina cuya densidad es 0.845 kg/L y trate de determinar su masa. Es probable que el primer pensamiento venido a la mente sea multiplicar el volumen por la densidad para obtener 3.16875 kg para la masa, lo cual implica con falsedad que la masa determinada tiene precisión hasta seis cifras significativas. Sin embargo, en realidad la masa no puede precisarse hasta más de tres cifras significativas, ya que tanto el volumen como la densidad se proporcionan con tres cifras significativas. Por lo tanto, el resultado se debe redondear al mismo número de cifras significativas y se debe dar la masa como de 3.17 kg en lugar de lo que aparece en la pantalla de la calculadora. El resultado de 3.16875 kg sería correcto sólo si el volumen y la densidad se dieran como 3.75000 L y 0.845000 kg/L, respectivamente. El valor 3.75 implica que se tiene bastante confianza en que el volumen es exacto dentro de ± 0.01 L y no puede ser 3.74 o 3.76 L. Sin embargo, el volumen puede ser 3.746, 3.750, 3.753, etc., ya que todos se redondean a 3.75 L (figura 1-49). Resulta más apropiado conservar todos los dígitos durante los cálculos intermedios y realizar el redondeo en el paso final, ya que esto es lo que normalmente hará una computadora.

Al resolver problemas se supondrá que la información dada es exacta al menos hasta tres cifras significativas. Por lo tanto, si la longitud de un tubo se da como de 40 m, se supondrá que es de 40.0 m, para justificar el uso de tres dígitos significativos en los resultados finales. También debe tener presente que todos los valores determinados en forma experimental están sujetos a errores de medición que se reflejan en los resultados obtenidos. Por ejemplo, si la

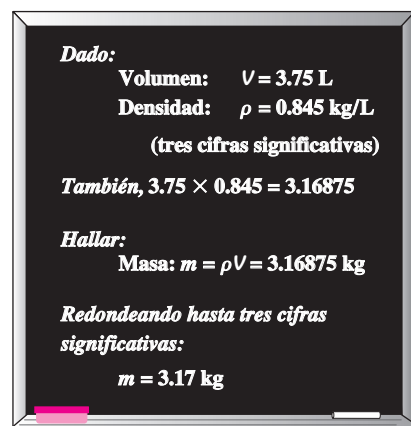


FIGURA 1-49

Un resultado con más cifras significativas que las de los datos que se dan implica falsamente una mayor exactitud.

densidad de una sustancia tiene una incertidumbre de 2%, entonces la masa determinada usando este valor de densidad también tendrá una incertidumbre de 2%.

También debe estar consciente de que, a veces, se introducen pequeños errores en forma intencional para evitar el problema de buscar datos más exactos. Por ejemplo, al tratar con agua líquida, sólo se usa el valor de $1\,000\text{ kg/m}^3$ para la densidad, que es la del agua pura a 0°C . Si se usa este valor a 75°C conducirá a un error de 2.5%, ya que la densidad a esta temperatura es de 975 kg/m^3 . Los minerales y las impurezas que están en el agua introducirán un error adicional. Al ser éste el caso, el lector no debe tener reservas en redondear los resultados finales hasta un número razonable de cifras significativas. Además, tener una incertidumbre de unas cuantas unidades en porcentaje en los resultados de los análisis de ingeniería suele ser la norma, no la excepción.

TEMA DE INTERÉS ESPECIAL*

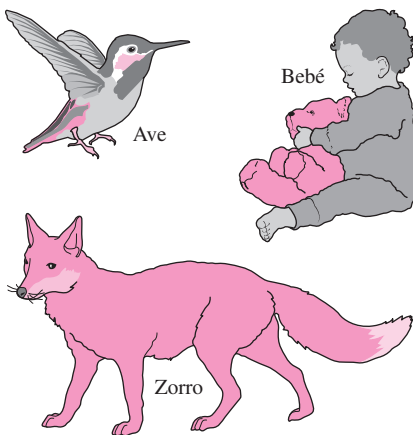


FIGURA 1-50

La mayoría de los animales vienen a este mundo con aislamiento integrado, pero los seres humanos venimos con una piel delicada.

Comodidad térmica

A diferencia de los animales como una zorra o un oso, que nacen con abrigos de piel integrados, los seres humanos venimos a este mundo con poca protección contra las condiciones ambientales severas (figura 1-50). Por lo tanto, se afirma que la búsqueda de la comodidad térmica se remonta hasta los principios de la historia humana. Se cree que los primeros seres humanos vivieron en cuevas que les proporcionaban refugio y protección contra las condiciones térmicas extremas. Es probable que el primer sistema de calentamiento usado fuera el *hogar abierto*, seguido por el fuego en moradas, mediante el uso de una *chimenea* para dar salida a los gases de la combustión. El concepto de *calefacción central* se remonta a la época de los romanos, quienes calentaban sus casas utilizando técnicas de construcción de piso doble y haciendo pasar los humos del fuego por la abertura entre las dos capas de piso. Los romanos también fueron los primeros en usar *ventanas transparentes* hechas de mica o de vidrio para mantener fuera a la lluvia y el viento pero dejar entrar la luz. La madera y el carbón mineral fueron las fuentes primarias de energía para calefacción, y se usaron el aceite y las velas para alumbrar. Las ruinas de casas con el frente hacia el sur indican que pronto, en la historia, se reconoció el valor del *calentamiento solar*.

El término **acondicionamiento del aire** suele usarse en sentido restringido para implicar el enfriamiento pero, en su sentido amplio, significa *acondicionar* el aire hasta tener el nivel deseado de calentamiento, enfriamiento, humidificación, deshumidificación, limpieza y desodorización. La finalidad del sistema de acondicionamiento del aire de un edificio es proporcionar una *comodidad térmica completa* para sus ocupantes. Por lo tanto, se necesita comprender los aspectos térmicos del *cuerpo humano* para diseñar un sistema eficaz de acondicionamiento del aire.

Los bloques de construcción de los organismos vivientes son las *células*, las cuales se asemejan a fábricas en miniatura que realizan diversas funciones necesarias para la supervivencia de los seres vivos. El cuerpo

* Esta sección se puede pasar por alto sin pérdida de continuidad.

humano contiene cerca de 100 mil billones de células con un diámetro promedio de 0.01 mm. En una célula típica ocurren miles de reacciones químicas cada segundo, durante las cuales algunas moléculas se dividen y se libera energía, y se forman algunas nuevas moléculas. El elevado nivel de actividad química de las células que mantiene la temperatura del cuerpo humano a 37.0°C (98.6°F), al mismo tiempo que realizan las funciones corporales necesarias, se llama **metabolismo**. En términos sencillos, el metabolismo se refiere al consumo de los alimentos, como los carbohidratos, las grasas y las proteínas. Los especialistas en nutrición suelen expresar el contenido de energía metabolizable de los alimentos en términos de la Caloría, con mayúscula. Una Caloría es equivalente a 1 Cal = 1 kcal = 4.1868 kJ.

La rapidez del metabolismo en el estado de reposo se llama *índice metabólico basal*, el cual es la velocidad de metabolismo requerida para conservar un organismo realizando las funciones corporales necesarias, como la respiración y la circulación sanguínea, en un nivel cero de actividad externa. El índice metabólico también se puede interpretar como la velocidad de consumo de energía por parte de un organismo. Para un *hombre promedio* (de 30 años de edad, 70 kg, 1.73 m de estatura, 1.8 m² de área superficial), el índice metabólico basal es de 84 W. Es decir, el organismo está convirtiendo la energía química de los alimentos (o de la grasa del cuerpo, si la persona no hubiera comido) en calor a razón de 84 J/s, el cual entonces se disipa hacia los alrededores. El índice metabólico crece con el *nivel de actividad* y puede decuplicar el índice metabólico basal cuando alguien está realizando un ejercicio extremo. Es decir, dos personas haciendo ejercicio pesado en un cuarto pueden liberar más energía hacia éste que un calentador de resistencia de 1 kW (figura 1-51). Un hombre promedio genera calor a razón de 108 W mientras está sentado leyendo, escribiendo, mecanografiando o escuchando una conferencia en un salón de clases. El índice metabólico máximo de un hombre promedio es de 1 250 W, a la edad de 20 años, y de 730 a los 70. Las velocidades promedio para las mujeres son inferiores en alrededor de 30%. Los índices metabólicos de los atletas entrenados pueden sobrepasar los 2 000 W.

En la tabla 1-7 se dan los índices metabólicos durante diversas actividades por unidad de área superficial del cuerpo. El **área superficial** de un cuerpo desnudo fue expresada por D. DuBois, en 1916, como

$$A_s = 0.202m^{0.425}h^{0.725} \quad (\text{m}^2) \quad (1-30)$$

en donde m es la masa del cuerpo en kg y h es la altura en m. La *ropa* incrementa el área superficial expuesta en hasta cerca de 50%. Los índices metabólicos que se dan en la tabla son suficientemente exactos para la mayor parte de los fines, pero se tiene una incertidumbre considerable en los niveles de elevada actividad. Se pueden determinar valores más exactos midiendo la velocidad del *consumo de oxígeno* en la respiración, que va desde alrededor de 0.25 L/min, para un hombre promedio en reposo, hasta más de 2 L/min durante el trabajo extremadamente pesado. Se puede suponer que toda la energía liberada durante el metabolismo se libera como *calor* (en las formas sensible o latente), puesto que el trabajo mecánico externo realizado por los músculos es muy pequeño. Además, el trabajo que se realiza durante la mayor parte de las actividades, como al caminar o hacer ejercicio en una bicicleta fija, llega el momento en que se convierte en calor a través de la fricción.

La comodidad del cuerpo humano depende principalmente de tres factores ambientales: la temperatura, la humedad relativa y el movimiento del

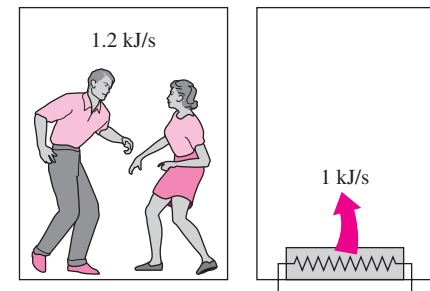


FIGURA 1-51

Dos personas bailando rápido emiten más calor hacia un cuarto que un calentador de resistencia de 1 kW.

TABLA 1-7

Índices metabólicos durante diversas actividades (tomado del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE, Ref. 1, Cap. 8, tabla 4)

Actividad	Índice metabólico* W/m ²
Reposo:	
Dormir	40
Reclinarse	45
Sentado, quieto	60
De pie, relajado	70
Caminar (a nivel):	
2 mph (0.89 m/s)	115
3 mph (1.34 m/s)	150
4 mph (1.79 m/s)	220
Actividades de oficina:	
Leer, sentado	55
Escribir	60
Mecanografiar	65
Archivar, sentado	70
Archivar, de pie	80
Caminar por allí	100
Levantar objetos/empacar	120
Conducir/volar:	
Automóvil	60–115
Avión, rutinario	70
Vehículo pesado	185
Actividades ocupacionales diversas:	
Cocinar	95–115
Limpiar la casa	115–140
Trabajo en máquinas:	
Ligero	115–140
Pesado	235
Manejar bultos de 50 kg	235
Trabajo de picar y palear	235–280
Actividades diversas de placer:	
Bailar, socialmente	140–255
Calistenia/ejercicio	175–235
Tenis, singles	210–270
Basquetbol	290–440
Lucha, en competencia	410–505

*Multiplíquese por 1.8 m² para obtener los índices metabólicos para un hombre promedio. Multiplíquese por 0.3171 para convertir en Btu/h · ft².

aire. La temperatura del medio ambiente es el índice sencillo más importante de la comodidad. Se ha realizado una investigación extensa sobre sujetos humanos con el fin de determinar la “**zona de comodidad térmica**” e identificar las condiciones en las que el cuerpo se siente cómodo en un medio. Se ha observado que la mayor parte de la gente vestida de manera normal, en reposo o realizando trabajo ligero, se siente cómoda en el rango de la *temperatura operativa* (muy aproximadamente, la temperatura promedio del aire y las superficies circundantes) de 23°C hasta 27°C, o bien, 73°F a 80°F (figura 1-52). Para la gente desnuda, este rango es de 29°C a 31°C. La humedad relativa también tiene un efecto considerable sobre la comodidad, ya que es una medida de la capacidad del aire para absorber humedad y, por tanto, afecta la cantidad de calor que un cuerpo puede disipar por evaporación. La humedad relativa elevada retarda el rechazo de calor por evaporación, en especial a altas temperaturas, y la baja humedad relativa lo acelera. El nivel deseable de *humedad relativa* se encuentra en el amplio rango de 30 a 70%, siendo el nivel más deseable el de 50%. La mayor parte de las personas no sienten calor ni frío en estas condiciones y el cuerpo no necesita activar alguno de los mecanismos de defensa con el fin de mantener su temperatura normal (figura 1-53).

Otro factor que tiene un efecto importante sobre la comodidad térmica es el **movimiento excesivo del aire** o **corriente de aire**, que causa un enfriamiento local no deseado del cuerpo humano. La corriente de aire es identificada por muchos como uno de los factores más molestos en los lugares de trabajo, los automóviles y los aviones. La experimentación de incomodidad por la corriente de aire es común entre las personas que usan ropa normal en interiores y que están realizando trabajo ligero sedentario y menos común entre aquellas con elevados niveles de actividad. La velocidad del aire debe mantenerse por debajo de 9 m/min (30 ft/min), en el invierno, y de 15 m/min (50 ft/min), en el verano, para minimizar la incomodidad por la corriente, en especial cuando el aire es frío. Un bajo nivel de movimiento del aire es deseable ya que remueve el bochorno, el aire húmedo que se acumula alrededor del cuerpo, y lo reemplaza con aire fresco. Por lo tanto, el movimiento del aire debe ser lo suficientemente fuerte para eliminar el calor y la humedad de la vecindad del cuerpo, pero tan suave como para no advertirse. El movimiento del aire a alta velocidad también causa incomodidad en el exterior. Por ejemplo, un medio ambiente a 10°C (50°F) con vientos de 48 km/h se siente tan frío como un medio ambiente a –7°C (20°F) con vientos de 3 km/h, debido al efecto de enfriamiento del movimiento del aire (el factor del viento).

Un buen sistema debe proporcionar *condiciones uniformes* en todo el espacio habitable para evitar la incomodidad causada por irregularidades como las *corrientes de aire*, la *radiación térmica asimétrica*, los *pisos calientes o fríos* y la *estratificación vertical de la temperatura*. La **radiación térmica asimétrica** es causada por las *superficies frías* de las ventanas grandes, las paredes no aisladas o los productos fríos, así como por las *superficies calientes* como los paneles radiantes para calefacción, de gas o eléctricos, colocados en las paredes o el techo, las paredes o techos de mampostería calentados por el Sol y la maquinaria caliente. La radiación asimétrica causa incomodidad por la exposición de lados diferentes del cuerpo a superficies con temperaturas diferentes y, por tanto, a distintas pérdidas o ganancias de calor por radiación. Una persona cuyo lado izquierdo está expuesto a una ventana fría, por ejemplo, sentirá como si estuviera perdiendo calor de ese lado (figura 1-54). Para lograr la comodidad térmica, la asimetría en la temperatura radiante no debe sobrepasar 5°C en

la dirección vertical y 10°C en la horizontal. Se puede minimizar el efecto desagradable de la asimetría en la radiación mediante la instalación de paneles de calefacción de tamaño apropiado, usando ventanas de hoja doble y colocando aislamiento generoso en las paredes y el techo.

El contacto directo con **superficies frías o calientes** también causa incomodidad en los pies. La temperatura del piso depende de la manera en que esté *construido* (si está directamente sobre el suelo o sobre la parte superior de un cuarto calentado, si está hecho de madera o de concreto, si se usó aislamiento, etc.) así como de la *cubierta usada para el piso*, como almohadillas, tapetes, alfombras y linóleo. Se sabe que una temperatura del piso de 23 a 25°C es cómoda para la mayor parte de la gente. La asimetría térmica del piso pierde su significado para las personas con calzado. Una manera eficaz y económica de elevar la temperatura del piso es usar paneles radiantes de calefacción en lugar de aumentar el ajuste del termostato. Otra condición no uniforme que causa incomodidad es la **estratificación de la temperatura** en un cuarto, que expone la cabeza y los pies a temperaturas diferentes. Para lograr la comodidad térmica, la diferencia de temperatura entre los niveles de la cabeza y los pies no debe exceder de 3°C. Este efecto se puede minimizar usando ventiladores.

Se debe notar que ningún ambiente térmico satisfará a todos. Sin importar lo que se haga, ciertas personas expresarán alguna incomodidad. La zona de comodidad térmica está basada en una tasa de 90% de aceptación. Es decir, se estima que un medio es cómodo si sólo 10% de las personas no están satisfechas con él. El metabolismo disminuye algo con la *edad*, pero no tiene efecto sobre la zona de comodidad. La investigación indica que no existe diferencia apreciable entre los medios preferidos por las personas viejas y jóvenes. Los experimentos también demuestran que los *hombres* y las *mujeres* prefieren casi el mismo ambiente. El índice de metabolismo de la mujer es algo inferior, pero esto se compensa por la temperatura de la piel y la pérdida por evaporación ligeramente inferiores. Asimismo, no existe variación significativa en la zona de comodidad de una parte del mundo a otra y de invierno a verano. Por lo tanto, se pueden usar las condiciones térmicas de comodidad *en todo el mundo* en cualquier temporada. Del mismo modo, las personas no pueden *aclimatarse* para preferir condiciones diferentes de comodidad.

En un **medio ambiente frío** la razón de pérdida de calor del cuerpo puede exceder la razón de generación de calor metabólico. El calor específico promedio del cuerpo humano es de 3.49 kJ/kg · °C y, por tanto, cada caída de 1°C en la temperatura del cuerpo corresponde a un déficit de 244 kJ en el contenido corporal de calor para un hombre promedio de 70 kg. Una caída de 0.5°C en la temperatura media del cuerpo causa una incomodidad notoria pero que es aceptable. Una caída de 2.6°C causa una incomodidad extrema. Una persona que esté durmiendo se despertará cuando su temperatura media corporal caiga en 1.3°C (lo cual normalmente representa una caída de 0.5°C en el interior del cuerpo y de 3°C en el área de la piel). La caída de la temperatura en las profundidades del cuerpo por debajo de 35°C puede dañar el mecanismo de regulación de la temperatura de éste, en tanto que una caída por debajo de 28°C puede ser fatal. Las personas sedentarias informaron sentirse *cómodas* a una *temperatura media de la piel* de 33.3°C, *incómodamente frías* a 31°C, *frías hasta tiritar* a 30°C y *extremadamente frías* a 29°C. Las personas que realizan trabajos pesados informaron sentirse cómodas a temperaturas mucho más bajas, lo cual muestra que el nivel de actividad afecta el desempeño y la comodidad humanos. Las extremidades del cuerpo, como las manos y los pies, es probable que

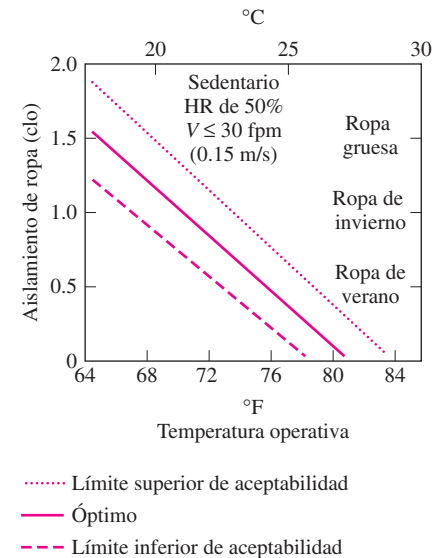


FIGURA 1-52

Efecto de la ropa sobre la temperatura ambiente que se siente cómoda (1 clo = 0.155 m² · °C/W = 0.880 ft² · °F · h/Btu) (tomado de la norma 55-1981 de la ASHRAE).



FIGURA 1-53

Medio térmicamente cómodo.

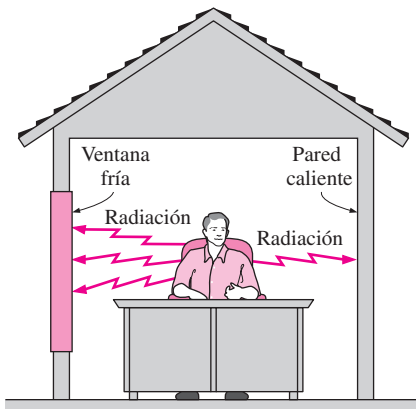


FIGURA 1-54

Las superficies frías causan pérdida excesiva de calor del cuerpo por radiación y, por tanto, incomodidad en ese lado del cuerpo.



FIGURA 1-55

La velocidad de generación de calor metabólico en reposo puede aumentar hasta seis veces durante la tiritera total en condiciones climáticas frías.

resulten afectadas con mayor facilidad por las condiciones atmosféricas frías y su temperatura es una mejor indicación de la comodidad y el desempeño. Se percibe que la piel de una mano a 20°C está incómodamente fría, a 15°C está en extremo fría y a 5°C está dolorosamente fría. Se puede realizar trabajo útil por medio de las manos, sin dificultad, mientras la temperatura de la piel de los dedos permanece arriba de 16°C (*Manual de fundamentos de la ASHRAE*, Ref. 1, capítulo 8).

La primera línea de defensa del cuerpo contra la pérdida excesiva de calor en un medio ambiente frío es *reducir la temperatura de la piel* y, de este modo, la razón de pérdida de calor; esto lo logra al estrechar las venas y disminuir el flujo sanguíneo. La medida disminuye la temperatura de los tejidos subyacentes a la piel, pero mantiene la temperatura corporal interior. La siguiente acción preventiva es incrementar la razón de *generación de calor metabólico* en el cuerpo al *tiritar*, a menos que la persona lo haga voluntariamente incrementando su nivel de actividad o poniéndose ropa adicional. La tiritera empieza con lentitud en pequeños grupos de músculos y puede duplicar la producción de calor metabólico del cuerpo en sus etapas iniciales. En el caso extremo de una tiritera total, la rapidez de producción de calor puede alcanzar hasta seis veces los niveles correspondientes al reposo (figura 1-55). Si esta medida también resulta inadecuada, la temperatura profunda del cuerpo empieza a *caer*. Las partes más alejadas del centro de éste, como las manos y los pies, se encuentran en el máximo peligro de sufrir daños en los tejidos.

En los **medios calientes** la razón de pérdida de calor del cuerpo puede hacerse más lenta que la de generación de calor metabólico. En esta ocasión el cuerpo activa los mecanismos opuestos. En primer lugar aumenta el *flujo de sangre* y, por tanto, el transporte de calor hacia la piel, causando que la temperatura de ésta y la de los tejidos subyacentes se eleve y se aproxime a la del interior del cuerpo. En condiciones de calor extremo, el *ritmo cardíaco* puede llegar hasta 180 latidos por minuto para mantener un suministro adecuado de sangre al cerebro y a la piel. A ritmos cardíacos más altos, la *eficiencia volumétrica* del corazón cae; debido al tiempo tan corto entre los latidos no puede llenarse por completo con sangre y cae el suministro sanguíneo hacia la piel y, lo que es más importante, al cerebro. Esto hace que la persona se desmaye como resultado de la *postración causada por el calor*. La deshidratación hace que el problema sea peor. Una cosa semejante sucede cuando una persona que trabaja muy duro durante un tiempo largo se detiene súbitamente. En este caso, la sangre que ha inundado la piel tiene dificultad para regresar al corazón porque los músculos relajados ya no fuerzan a esa sangre de regreso al corazón y, por consiguiente, se tiene menos flujo disponible para bombearlo al cerebro.

La siguiente línea de defensa es liberar agua de las glándulas sudoríparas y recurrir al *enfriamiento evaporativo*, si es que la persona no se quita algo de ropa y reduce el nivel de actividad (figura 1-56). El cuerpo puede mantener indefinidamente la temperatura de su centro a 37°C en este modo de enfriamiento evaporativo, incluso en medios a temperaturas más elevadas (tan altas como 200°C durante las pruebas militares de aguante), si la persona toma gran cantidad de líquidos para reaprovisionar sus reservas de agua y el aire ambiental está lo suficientemente seco como para permitir que el sudor se evapore en lugar de rodar hacia abajo de la piel. Si esta medida no resulta adecuada, el cuerpo tendrá que empezar a absorber calor metabólico y la temperatura profunda del cuerpo se elevará. Una persona puede tolerar una elevación en la temperatura de 1.4°C , sin incomodidad

importante, pero puede *desplomarse* cuando la elevación de la temperatura alcanza los 2.8°C . La gente se siente lenta y su eficiencia cae de manera considerable cuando la temperatura del centro del cuerpo se eleva por encima de 39°C . Una temperatura del centro del cuerpo por encima de 41°C puede dañar las proteínas hipotalámicas, lo que da por resultado el cese de la sudoración, una producción mayor de calor por tiritera y una *insolación* con daños irreversibles que constituyen una amenaza para la vida. Por encima de 43°C puede ocurrir la muerte.

Una temperatura superficial de 46°C causa dolor en la piel. Por lo tanto, el contacto directo con un bloque metálico a esta temperatura o superior es doloroso. Sin embargo, una persona puede permanecer en un cuarto a 100°C hasta por 30 min sin daños o dolor en la piel, debido a la resistencia por convección en la epidermis y al enfriamiento evaporativo. Incluso es posible poner nuestras manos dentro de un horno a 200°C , durante un corto tiempo, sin que salgan quemadas.

Otro factor que afecta la comodidad térmica, la salud y la productividad es la **ventilación**. Se puede proporcionar aire fresco del exterior a un edificio *en forma natural* o *por fuerza* mediante un sistema mecánico de ventilación. En el primer caso, lo cual es la norma en los edificios residenciales, la ventilación necesaria se suministra por *infiltración a través de las grietas y fugas* en el espacio habitado y abriendo las ventanas y puertas. La ventilación adicional necesaria en los cuartos de baño y las cocinas se suministra con *respiraderos con compuertas* o con *ventiladores de extracción*. Sin embargo, con este tipo de ventilación no controlada, el suministro de aire fresco será demasiado elevado, con desperdicio de energía, o demasiado bajo, causando una mala calidad del aire en el interior. Pero la práctica actual probablemente no sea buscar un cambio para los edificios residenciales, ya que no existe una protesta pública por el desperdicio de energía o la calidad del aire y, por tanto, es difícil justificar el costo y la complejidad de los sistemas de ventilación mecánica.

Los sistemas de ventilación mecánica forman parte de cualquier sistema de calefacción y acondicionamiento del aire en los *edificios comerciales*, suministrando la cantidad necesaria de aire fresco del exterior y distribuyéndolo de manera uniforme en todo el edificio. Esto no es sorprendente, ya que muchas habitaciones en los grandes edificios comerciales no cuentan con ventanas y, por tanto, dependen de la ventilación mecánica. Incluso los espacios con ventanas se encuentran en la misma situación, ya que dichas ventanas están herméticamente selladas y no se pueden abrir en la mayor parte de los edificios. No es una buena idea exagerar el tamaño del sistema de ventilación sólo para quedar en el “lado seguro”, ya que extraer aire del interior, calentado o enfriado, desperdicia energía. Por otra parte, también debe evitarse la reducción de las razones de ventilación por debajo del mínimo requerido, con el fin de conservar energía, de modo que la calidad del aire en el interior se pueda mantener en los niveles requeridos. En la tabla 1-8 se da una lista de los requisitos mínimos de aire fresco para ventilación. Los valores están basados en el control del CO_2 y otros contaminantes con un margen adecuado de seguridad, lo cual requiere que a cada persona se le suministren por lo menos 7.5 L/s (15 ft³/min) de aire fresco.

Otra función del sistema de ventilación mecánica es **limpiar** el aire, filtrándolo a medida que entra en el edificio. Se cuenta con varios tipos de filtros para este fin, dependiendo de los requisitos de limpieza y de la caída admisible de presión.

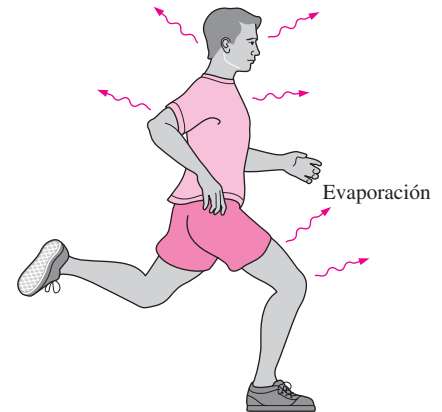


FIGURA 1-56

En los medios calientes un cuerpo puede disipar una gran cantidad de calor metabólico al transpirar, ya que el sudor absorbe el calor del cuerpo y se evapora.

TABLA 1-8

Requerimientos mínimos de aire fresco en los edificios (norma 62-1989 de la ASHRAE)

Aplicación	Requerimiento (por persona)	
	L/s	ft ³ /min
Salones de clases, bibliotecas, supermercados	8	15
Comedores, salas de conferencias, oficinas	10	20
Salas de hospital	13	25
Cuartos de hotel	15 (por cuarto)	30 (por cuarto)
Salas de descanso	30	60
Almacenes de ventas al menudeo	1.0–1.5 (por m ²)	0.2–0.3 (por ft ²)
Edificios residenciales	0.35 de cambio de aire por hora, pero no menos de 7.5 L/s (o 15 ft ³ /min) por persona	

RESUMEN

En este capítulo se presentaron y se discutieron los conceptos básicos de la transferencia de calor. La ciencia de la *termodinámica* trata de la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso de un estado de equilibrio hacia otro, en tanto que la ciencia de la *transferencia de calor* trata de la razón de esa transferencia, la cual es la cantidad de principal interés en el diseño y evaluación del equipo de transferencia de calor. La suma de todas las formas de energía de un sistema se llama *energía total* e incluye las energías interna, cinética y potencial. La *energía interna* representa la energía molecular de un sistema y consta de las formas sensible, latente, química y nuclear. Las formas sensible y latente de la energía interna se pueden transferir de un medio a otro como resultado de una diferencia de temperatura y se mencionan como *energía calorífica* o *térmica*. Por tanto, la *transferencia de calor* es el intercambio de las formas sensible y latente de la energía interna entre dos medios, como resultado de una diferencia de temperatura. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama *razón de transferencia del calor* y se denota por \dot{Q} . La razón de transferencia del calor por unidad de área se llama *flujo de calor*, \dot{q} .

Un sistema de masa fija recibe el nombre de *sistema cerrado* y uno que comprende transferencia de masa a través de sus fronteras es un *sistema abierto* o *volumen de control*. La *primera ley de la termodinámica* o el *balance de energía* para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Cuando un sistema cerrado estacionario comprende sólo transferencia de calor y no interacciones de trabajo a través de su frontera, la relación de balance de energía se reduce a

$$Q = mc_v \Delta T$$

en donde Q es la cantidad de transferencia neta de calor hacia el sistema o desde éste. Cuando el calor se transfiere con una rapidez constante de \dot{Q} , la cantidad de transferencia de calor durante un intervalo de tiempo Δt se puede determinar a partir de $Q = \dot{Q} \Delta t$.

En condiciones de estado estacionario y en ausencia de cualesquiera interacciones de trabajo, la relación de conservación de la energía para un volumen de control con una admisión y una salida, y con cambios despreciables en las energías cinética y potencial, se puede expresar como

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

donde $\dot{m} = \rho V A_c$ es el gasto de masa y \dot{Q} es la razón de transferencia neta de calor hacia afuera o hacia adentro del volumen de control.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. La *conducción* es la transferencia de calor de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las menos energéticas adyacentes, como resul-

tado de la interacción entre ellas, y es expresada por la *ley de Fourier de la conducción del calor* como

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}$$

donde k es la *conductividad térmica* del material, A es el *área* perpendicular a la dirección de la transferencia de calor y dT/dx es el *gradiente de temperatura*. La magnitud de la velocidad de conducción del calor a través de una capa plana de espesor L se expresa por

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{\Delta T}{L}$$

donde ΔT es la diferencia de temperatura de uno a otro lado de la capa.

La *convección* es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que se encuentran en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y del fluido en movimiento. La razón de la transferencia de calor por convección se expresa por la *ley de Newton del enfriamiento* como

$$\dot{Q}_{\text{convección}} = hA_s (T_s - T_{\infty})$$

donde h es el *coeficiente de transferencia de calor por convección*, en $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ o $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$, A_s es el *área superficial* a través de la cual tiene lugar esa transferencia, T_s es la *temperatura de la superficie* y T_{∞} es la *temperatura del fluido* suficientemente lejos de dicha superficie.

La *radiación* es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s es expresada por la *ley de Stefan-Boltzmann* como $\dot{Q}_{\text{emitido, máx}} = \sigma A_s T_s^4$, donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ o $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4$ es la *constante Stefan-Boltzmann*.

Cuando una superficie de emisividad ϵ y área superficial A_s , a una temperatura termodinámica T_s , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura termodinámica T_{alred} , separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4)$$

En este caso, la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación.

La razón a la cual una superficie absorbe radiación se determina a partir de $\dot{Q}_{\text{absorbido}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incidente}}$ en donde $\dot{Q}_{\text{incidente}}$ es la razón a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de esta última.