TRANSFERENCIA DE CALOR, CAPÍTULO 1
J. P. HOLMAN



Digitalizado por LIBROdot.com
http://www.librodot.com

TRANSFERENCIA DE CALOR

J. P. HOLMAN

Professor of Mechanical Engineering

Southern Methodist University

PREFACIO

Este libro presenta un tratado elemental de los principios de transferencia de calor. Como texto, contiene material suficiente para un curso de un semestre, y puede ser presentado en tercer año de ingeniería o posteriormente, dependiendo de los objetivos individuales del curso. El conocimiento de ecuaciones diferenciales ordinarias es conveniente para la comprensión apropiada del material. Aunque algunos conocimientos de mecánica de fluidos serán útiles en las discusiones sobre convección, éstos no son esenciales. Los conceptos sobre balances termodinámicos de energía, también son provechosos en los diferentes desarrollos analíticos.

La presentación del material sigue las líneas clásicas, discutiendo separadamente la conducción, la convección y la radiación, subrayándose que el mecanismo físico de transferencia de calor por convección, es uno de conducción a través de la capa de fluido estacionaria en la proximidad de la superficie de transferencia de calor. Se ha puesto énfasis a través de todo el libro sobre la comprensión física, mientras que al mismo tiempo se usan datos experimentales significativos en aquellas circunstancias que no permiten una solución analítica simple.

La conducción se trata desde el punto de vista analítico y numérico, de tal manera que el lector obtenga los beneficios que proveen las soluciones analíticas y se familiarice con las herramientas importantes del análisis numérico, el cual se usa a menudo en la práctica. Se sigue un procedimiento similar en la presentación de la transferencia de calor por convección. Se utiliza un análisis de la capa límite en convección libre y forzada para presentar una descripción física de los procesos de convección. De esta descripción se pueden inducir consecuencias, que llevan naturalmente a la presentación de relaciones prácticas y empíricas para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección. Debido a que provee un medio de instrucción más fácil que otros, el método de redes para radiación se usa mucho en el análisis de sistemas de radiación.

Los métodos de diferencia de temperatura media logarítmica y efectividad se presentan en el análisis de intercambiadores de calor, ya que ambos son ampliamente usados y cada uno ofrece sus propias ventajas al diseñador. Se presenta una breve introducción so-

Librodot

bre difusión y transferencia de masa con el fin de que el lector se familiarice con estos procesos y establezca con firmeza las analogías más importantes entre la transferencia de calor, masa y momentum.

En el Cap. 12 se discute un número de tópicos especiales, agregándose interés al material básico presentado en los capítulos anteriores. El Cap. 13 sobre transferencia de calor ambiental es bastante especializado y contiene material que es de gran interés.

Se incluyen problemas al final de cada capítulo. Algunos de éstos son de tipo rutinario, para familiarizar al estudiante con las manipulaciones numéricas y órdenes de magnitud de los varios parámetros que ocurren en la materia de transferencia de calor. Otros problemas extienden el tema, requiriendo que el estudiante aplique los principios básicos a nuevas situaciones y desarrolle sus propias ecuaciones. Ambos tipos de problemas son importantes.

Los tópicos de transferencia de calor no son estáticos. Nuevos desarrollos ocurren muy regularmente y mejores soluciones analíticas y datos empíricos se hallan disponibles en forma continua para el profesionista en el campo. Debido a la gran cantidad de información que se tiene en la literatura de investigación, el estudiante principiante podría verse abrumado con facilidad, si todo el material le fuera presentado. El libro se ha proyectado para servir como texto elemental, de tal manera que el autor asume un papel de intérprete de la literatura y las ecuaciones y conclusiones presentadas son de utilidad inmediata para el lector. Se espera que la atención del estudiante se enfoque a trabajos más extensos un número suficiente de veces, para entender la profundidad cada vez mayor que va apareciendo en la mayoría de los tópicos de transferencia de calor. Para el estudiante reflexivo, las referencias al final del capítulo ofrecen una puerta abierta a la literatura de transferencia de calor, lo cual puede formar una pirámide para más investigaciones.

El autor ha tenido el placer de enseñar la materia tratada en este texto a estudiantes de la Southern Methodist University por más de diez años. Su paciencia, sugerencias y comentarios han contribuido en gran parte a la preparación del material expuesto y presentación del texto. Espero que esta nueva edición reflejará sus intereses y estimulará aún más otras discusiones en el futuro.

Deben mencionarse algunas de las modificaciones que aparecen en esta tercera edición. Se ha agregado un conjunto de preguntas de repaso al final de cada capítulo, así como algunos problemas adicionales. Se ha puesto cierto énfasis en el sistema internacional de unidades a través de todo el libro, expresando las respuestas de los ejemplos en este sistema, en adición a las unidades inglesas.

Librodot

Se ha dado más importancia a los métodos numéricos en los capítulos sobre conducción, discutiéndose las técnicas más empleadas en la solución por computadora. Se expresan en forma más compacta las relaciones empíricas para el flujo sobre cuerpos redondeados. En el Cap. 7 se presentan algunas nuevas correlaciones para sistemas de convección libre, y las antiguas correlaciones convencionales se encuentran juntas, en una forma más compacta y útil. Sólo pequeñas modificaciones se han hecho al capítulo sobre radiación. Al Cap. 9 se le ha agregado nueva información sobre flujos máximos de calor en ebullición, así como algunas referencias recientes. En el capítulo sobre tópicos especiales aparece una discusión relacionada con el tubo de calor y sus aplicaciones. Se ha incluido un nuevo capítulo sobre problemas ambientales, para dar énfasis a la variedad de aplicaciones que tiene la transferencia de calor. Se espera que estas adiciones a través del libro incrementarán el interés en esta materia.

Muchas personas han sido generosas con sus comentarios y sugerencias para mejorar el libro. S. J. Kline, R. J. Schoenhals; J. V. Beck, Erich Soehngen, K. V. Prasanna, M. Fleischman, J. E. Sunderland, W. G. Wyatt y otros, han sido muy útiles y les estoy agradecido por su interés. Finalmente, aprecio en particular el apoyo continuo del personal editorial de McGraw-Hill Book Company.

J. P. HOLMAN

Librodot

LISTA DE SIMBOLOS

a	Velocidad local del sonido
a	Coeficiente de atenuación (Cap. 13)
A	Area
A	Albedo (Cap. 13)
A_m	Area del perfil de la aleta (Cap. 2)
B	Resistencia de campo magnético
c	Calor específico, usualmente en Btu/lb_m-°F
C	Concentración (Cap. 11)
C_D	Coeficiente de arrastre, definido por la Ec. (6-10)
C_f	Coeficiente de fricción, definido por la Ec. (5-44)
c_p	Calor específico a presión constante, usualmente en Btu/lb_m-°F
c_v	Calor específico a volumen constante, por lo general, en Btu/lb_m-°F
d	Diámetro
D	Profundidad o diámetro
D	Coeficiente de difusión (Cap. 11)
D_H	Diámetro hidráulico, definido por la Ec. (6-9)
e	Energía interna por unidad de masa, por lo general, en Btu/lb_m
E	Energía interna, por lo común, en Btu
E	Potencia emisiva, usualmente en Btu/hr-pie² (Cap. 8)
E_{b_0}	Constante solar (Caps. 8, 13)
F_{m-n} o F_{mn}	Factor de forma de radiación para radiación de la superficie m a la superficie n
g	Aceleración de gravedad
g_c	Factor de conversión, definido por la Ec. (1-12)
$G = \frac{m}{A}$	Velocidad de masa
G	Irradiación (Cap. 8)
h	Coeficiente de transferencia de calor, por lo común, en Btu/hr-pie²-°F
$\bar{h}$	Coeficiente de transferencia de calor promedio
h_D	Coeficiente de transferencia de masa, por lo general, en pie/hr
h_{fg}	Entalpía de vaporización, Btu/lb_m
h_r	Coeficiente de transferencia de calor por radiación (Cap. 8)
H	Intensidad de campo magnético
i	Entalpía, usualmente en Btu/lb_m
I	Intensidad de radiación
I	Insolación solar (Cap. 13)
I_0	Insolación solar en el extremo exterior de la atmósfera [Ec. (13-4b)]
J	Radiosidad (Cap. 8)
J	Densidad de corriente
k	Conductividad térmica, usualmente en Btu/hr-pie-°F
$E_{b\lambda}$	Potencia emisiva del cuerpo negro por unidad de longitud de onda, definida por la Ec. (8-10)
E	Campo eléctrico vectorial
f	Factor de fricción, definido por la Ec. (5-70)
F	Fuerza, usualmente en lb
L_c	Longitud de la aleta corregida (Cap. 2)
m	Masa
$\dot{m}$	Razón de flujo másico
M	Peso molecular (Cap. 11)
n	Densidad molecular
n	Factor de turbiedad, defini-

Librodot

	do por la Ec. (13-4)
N	Razón de difusión molar, moles por unidad de tiempo (Cap. 11)
p	Presión, usualmente en lb_f/pie^2
P	Perímetro
q	Razón de transferencia de calor, Btu por unidad de tiempo
q''	Flujo de calor, Btu por unidad de tiempo, por unidad de área
$\dot{q}$	Calor generado por unidad de volumen
$\bar{q}_{m,n}$	Residuo de un nodo, usado en el método de relajación (Caps. 3 y 4)
k_e	Conductividad térmica efectiva de espacios cerrados (Cap. 7). Definida por la Ec. (7-35)
k_λ	Coeficiente de dispersión (Cap. 13)
L	Longitud
x, y, z	Coordenadas en el espacio en el sistema cartesiano
$\alpha = \frac{k}{\rho c}$	Difusividad térmica, usualmente en pie^2/hr
α	Absorcividad (Cap. 8)
α	Coeficiente de acomodamiento (Cap. 12)
α	Angulo de altitud solar, grados (Cap. 13)
α	Razón del lapso del ambiente atmosférico (LR)
β	Coeficiente de expansión volumétrica, 1/°R
β	Coeficiente de temperatura de conductividad térmica, 1/°F
$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	Exponente isentrópico, sin dimensiones
Γ	Flujo de masa condensada por unidad de profundidad de la placa (Cap. 9)
Q	Calor, Btu
r	Radios o distancia radial
r	Factor de recuperación, definido por la Ec. (5-78)
R	Radio fijo
R	Constante del gas
$R_{tér}$	Resistencia térmica, usualmente en hr-°F/Btu
s	Una dimensión característica (Cap. 4)
S	Razón de velocidad molecular (Cap. 12)
S	Factor de forma para conducción, usualmente en pies
t	Espesor, aplicado a problemas de aletas (Cap. 2)
t, T	Temperatura
u	Velocidad
v	Velocidad
v	Volumen específico, usualmente en pie^3/lb_m
V	Velocidad
V	Volumen molecular (Cap. 11)
W	Peso, usualmente lb_f
Γ	Razón de lapso adiabático seco (DALR) (Cap. 13)
δ	Espesor de capa límite hidrodinámica
δ_t	Espesor de capa límite térmica
ϵ	Efectividad de intercambiadores de calor
ϵ	Emisividad
ϵ_H, ϵ_M	Difusividad de turbulencia de calor y momentum
$\zeta = \frac{\delta_t}{\delta}$	Razón de espesores de capa límite térmica a capa límite hidrodinámica
η	Variable de similaridad, definida por la Ec. (B-6)
η_f	Eficiencia de aletas, sin dimensiones
θ	Angulo en sistema de coordenadas esféricas o cilíndricas
θ	Diferencia de temperatura, $T - T_{referencia}$ La temperatura de referencia se escoge de manera diferente para diferentes sistemas (véanse los Caps. 2 a 4)
λ	Longitud de onda
λ	Trayectoria media libre (Cap. 12)
μ	Viscosidad dinámica
μ	Denota unidades de micrón de longitud de onda, $1\mu = 10^{-6}$ m (Cap. 8)

Librodot

ν	Viscosidad cinemática
ν	Frecuencia de radiación (Cap. 8)
ρ	Densidad, usualmente lb_m/pie^3
ρ	Reflectividad (Cap. 8)
ρ_e	Densidad de carga
σ	Conductividad eléctrica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
σ	Tensión superficial de la interfase líquido-vapor (Cap. 9)
τ	Tiempo
τ	Esfuerzos de corte entre capas de fluido
τ	Transmisividad (Cap. 8)
ϕ	Angulo en sistema de coordenadas esférico o cilíndrico
ψ	Función de corriente

Grupos adimensionales

$\mathrm{Bi} = \frac{hs}{k}$	Módulo de Biot
$\mathrm{Ec} = \frac{u_\infty^2}{c_p(T_\infty - T_w)}$	Número Eckert
$\mathrm{Fo} = \frac{\alpha\tau}{s^2}$	Módulo de Fourier
$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2}$	Número Grashof
$\mathrm{Gr}^* = \mathrm{GrNu}$	Número Grashof modificado para flujo de calor constante
$\mathrm{Gz} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\frac{d}{L}$	Número Graetz
$\mathrm{Kn} = \frac{\lambda}{L}$	Número Knudsen
$\mathrm{Le} = \frac{\alpha}{D}$	Número Lewis (Cap. 11)
$\mathrm{M} = \frac{u}{a}$	Número Mach
$\mathrm{N} = \frac{\sigma B_y^2 x}{\rho u_\infty}$	Número de influencia magnética
$\mathrm{Nu} = \frac{hx}{k}$	Número Nusselt
$\overline{\mathrm{Nu}} = \frac{\bar{h}x}{k}$	Número Nusselt promedio
$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}$	Número Peclet
$\mathrm{Pr} = \frac{c_p\mu}{k}$	Número Prandtl
$\mathrm{Re} = \frac{\rho u x}{\mu}$	Número Reynolds
$\mathrm{Sc} = \frac{\nu}{D}$	Número Schmidt (Cap. 11)
$\mathrm{Sh} = \frac{h_D x}{D}$	Número Sherwood (Cap. 11)
$\mathrm{St} = \frac{h}{\rho c_p u}$	Número Stanton
$\overline{\mathrm{St}} = \frac{\bar{h}}{\rho c_p u}$	Número Staton promedio

Subíndices

aw	Condiciones de pared adiabática
b	Se refiere a condiciones de cuerpo negro (Cap. 8)
b	Evaluada en las condiciones promedio [véase la Ec. (5-61)]
d	Basada en el diámetro
f	Evaluada en condiciones de película [véase la Ec. (5-43)]
g	Condiciones de vapor saturado (Cap. 9)
i	Condiciones iniciales o de entrada
L	Basada en la longitud de la placa
m	Condiciones de flujo medio
m, n	Denota posiciones en el nodo en la solución numérica (véanse los Caps. 3 y 4)
0	Denota condiciones de flujo de estancamiento (Cap. 5) o alguna condición inicial en tiempo cero
r	Una posición radial específica
s	Evaluada en condiciones de alrededores
x	Denota alguna posición local con respecto a la coordenada x
w	Evaluada en condiciones de pared
*	(Superíndice) Propiedades evaluadas a la temperatura de referencia, dada por la Ec. (5-82)
∞	Evaluada en condiciones de flujo libre

Librodot

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La transferencia de calor es la ciencia que busca predecir la transferencia de energía que tiene lugar entre cuerpos, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo pretende explicar cuánta energía como calor puede transferirse, sino también predice la razón de cambio con que este intercambio se lleva a cabo bajo ciertas condiciones especificadas. El hecho de que una *razón de cambio* de transferencia de calor sea el objetivo deseado en un análisis, destaca la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica. La termodinámica trata con sistemas en equilibrio; puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro; pero no puede ser usada para predecir qué tan rápido tendrá lugar el cambio, puesto que el sistema no está en equilibrio durante el proceso. La transferencia de calor complementa a la primera y segunda leyes de la termodinámica proporcionando reglas experimentales adicionales, con el objeto de establecer las razones de transferencia de energía. Como en la ciencia de la termodinámica, las reglas experimentales usadas como base de la transferencia de calor son muy simples y fácilmente pueden extenderse para abarcar una variedad de situaciones prácticas.

Como ejemplo de las diferentes clases de problemas que son tratados por la termodinámica y la transferencia de calor, considere el enfriamiento de una barra de acero caliente la cual se coloca en un recipiente con agua. La termodinámica puede usarse para predecir la temperatura de equilibrio final de la combinación agua-barra de acero. La termodinámica no predice el tiempo necesario para alcanzar este equilibrio o la temperatura que tendrá la barra después de cierto tiempo antes de alcanzar esta condición de equilibrio. La

Librodot

transferencia de calor puede usarse para predecir la temperatura de la barra y del agua como función del tiempo.

La mayoría de los lectores se familiarizarán con los términos usados para denotar las tres formas de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. En este capítulo se busca explicar el mecanismo de aquéllos de una manera cualitativa, con el objeto de que cada uno puede ser considerado en su propia perspectiva. Los capítulos posteriores tratarán los tres tipos de transferencia de calor en detalle.

1-1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

Cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, la experiencia ha mostrado que existe una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la región de baja temperatura. Decimos que la energía se transmite por conducción y que la razón de transferencia de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

Cuando la constante de proporcionalidad es introducida,

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \tag{1-1}$$

donde q es la razón de transferencia de calor y $\partial T/\partial x$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. La constante positiva k se llama la conductividad térmica del material, y el signo menos se coloca para satisfacer la segunda ley de la termodinámica, es decir, el calor debe fluir hacia menos temperatura, como se indica en el sistema de coordenadas de la Fig. 1-1. La Ec. (1-1) se

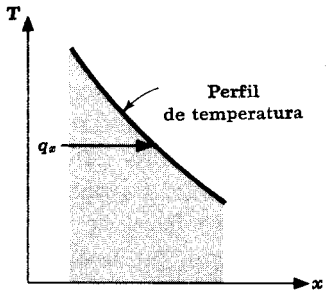


FIG. 1-1. Diagrama que muestra la dirección del flujo de calor

Librodot

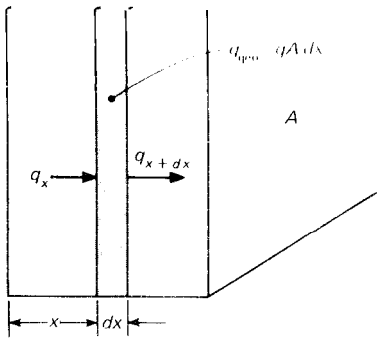


FIG. 1-2. Volumen elemental para análisis de conducción de calor unidimensional

conoce como la Ley de Fourier de conducción de calor, debido al físico matemático francés Joseph Fourier, quien hizo contribuciones muy significativas para el tratamiento analítico de transferencia de calor por conducción. Es importante notar que la Ec. (1-1) es la ecuación que define la conductividad térmica, y que k tiene unidades de Btu/hr-pie-°F en el sistema ingenieril típico de unidades, en donde el flujo de calor se expresa en Btu por hora.

Ahora nos dispondremos a atacar el problema de determinar la ecuación básica que rige la transferencia de calor en un sólido, usando la Ec. (1-1) como punto de partida.

Considérese el sistema unidimensional mostrado en la Fig. 1-2. Si el sistema está en estado estable, es decir, si la temperatura no cambia con el tiempo, entonces el problema es muy simple y únicamente se necesita integrar la Ec. (1-1) y sustituir los valores apropiados para obtener la cantidad deseada. Sin embargo, si la temperatura del sólido está cambiando con el tiempo o si hay fuentes o resumideros de calor dentro del sólido, la situación es más compleja. Se considerará ahora el caso general donde la temperatura puede estar variando con el tiempo, y puede haber fuentes de calor dentro del cuerpo. Es posible hacer el siguiente balance de energía en el elemento de espesor dx:

Energía conducida en la cara izquierda + calor generado dentro del elemento = cambio en energía interna + energía conducida hacia afuera por la cara derecha

Librodot

Esas cantidades de energía están dadas como sigue:

$$\text{Energía en la cara izquierda} = q_x = -kA\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{Energía generada dentro del elemento} = \dot{q}A\,dx$$

$$\text{Cambio en la energía interna} = \rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx$$

$$\text{Energía saliendo por la cara derecha} = q_{x+dx} = -kA\frac{\partial T}{\partial x}\Big)_{x+dx}$$

$$= -A\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]$$

donde $\dot{q}$ = energía generada por unidad de volumen
c = calor específico del material
ρ = densidad

Combinando las relaciones anteriores,

$$-kA\frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A\,dx = \rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx - A\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]$$

o

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \dot{q} = \rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{1-2}$$

Esta es la ecuación de conducción de calor unidimensional. Para tratar el flujo de calor en más de una dirección, únicamente se necesita considerar el calor conducido hacia adentro y hacia afuera de un volumen unitario en las tres direcciones coordenadas, como se muestra en la Fig. 1-3*a*. El balance de energía da

$$q_x + q_y + q_z + q_{\text{gen}} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{d\tau}$$

y las cantidades de energía están dadas por

$$q_x = -k\,dy\,dz\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = -\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]dy\,dz$$

$$q_y = -k\,dx\,dz\frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy} = -\left[k\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)dy\right]dx\,dz$$

$$q_z = -k\,dx\,dy\frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = -\left[k\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)dz\right]dx\,dy$$

$$q_{\text{gen}} = \dot{q}\,dx\,dy\,dz$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \rho c\,dx\,dy\,dz\frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Librodot

así que la ecuación general de conducción de calor tridimensional es

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q = \rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (1\text{-}3)$$

Para conductividad térmica constante, la Ec. (1-3) se escribe como

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (1\text{-}3a)$$

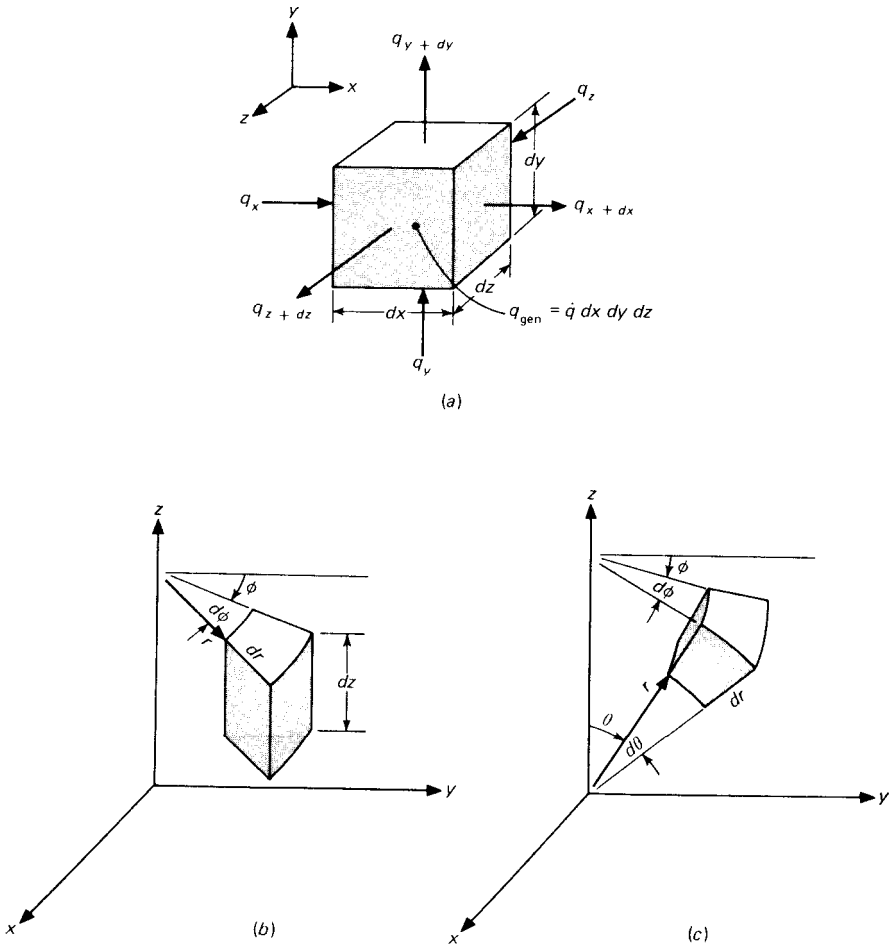


FIG. 1-3. Volumen elemental para análisis de conducción de calor tridimensional. (a) En coordenadas cartesianas; (b) en coordenadas cilíndricas; (c) en coordenadas esféricas

Librodot

donde la cantidad $\alpha = k/\rho c$ se llama la difusividad térmica del material. Entre mayor sea el valor de α, más rápidamente se propagará el calor a través del material. Esto puede verse investigando las cantidades que intervienen en α. Un valor grande de α resultará, ya sea debido a un valor alto de la conductividad térmica, lo cual indicaría una razón rápida de transferencia de energía, o debido a un valor bajo de la capacidad calorífica térmica ρc. Un valor pequeño de la capacidad calorífica significaría que una poca de la energía que se mueve a través del material se absorbería y se emplearía para aumentar la temperatura del material; por consiguiente, una mayor cantidad de energía estaría disponible para transferencia posterior.

En las derivaciones anteriores, la expresión para las derivadas en $x + dx$ se ha escrito en la forma de una expansión de series de Taylor, considerando solamente en el desarrollo los dos primeros términos.

La Ec. (1-3*a*) puede transformarse a coordenadas cilíndricas o esféricas por técnicas estándar de cálculo. Los resultados son:
Coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{1-3b}$$

Coordenadas esféricas:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r^2}(rT) + \frac{1}{r^2 \operatorname{sen}\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\operatorname{sen}\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 \operatorname{sen}^2 \theta}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{1-3c}$$

Los sistemas de coordenadas empleados con las Ecs. (1-3*b*) y (1-3*c*) se indican en las Figs. 1-3*b* y 1-3*c*, respectivamente.

Muchos problemas prácticos involucran sólo casos especiales de las ecuaciones generales enumeradas arriba. Como una guía para los desarrollos en capítulos futuros, es conveniente mostrar la forma reducida de las ecuaciones generales para algunos casos de interés práctico.

Flujo de calor unidimensional en estado estable (sin generación de calor):

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \tag{1-4}$$

Nótese que esta ecuación es la misma que la Ec. (1-1) cuando q = constante.

Flujo de calor unidimensional en estado estable en coordenadas cilíndricas (sin generación de calor):

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dT}{dr} = 0 \tag{1-5}$$

Librodot

Flujo de calor unidimensional en estado estable con fuentes de calor:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \tag{1-6}$$

Conducción bidimensional en estado estable sin fuentes de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \tag{1-7}$$

1-2 CONDUCTIVIDAD TERMICA

La Ec. (1-1) es la ecuación que define la conductividad térmica. Basándose en esta definición pueden hacerse mediciones experimentales para determinar la conductividad térmica de diferentes materiales. Para gases a temperaturas moderadamente bajas, pueden utilizarse análisis basados en la teoría cinética de los gases para

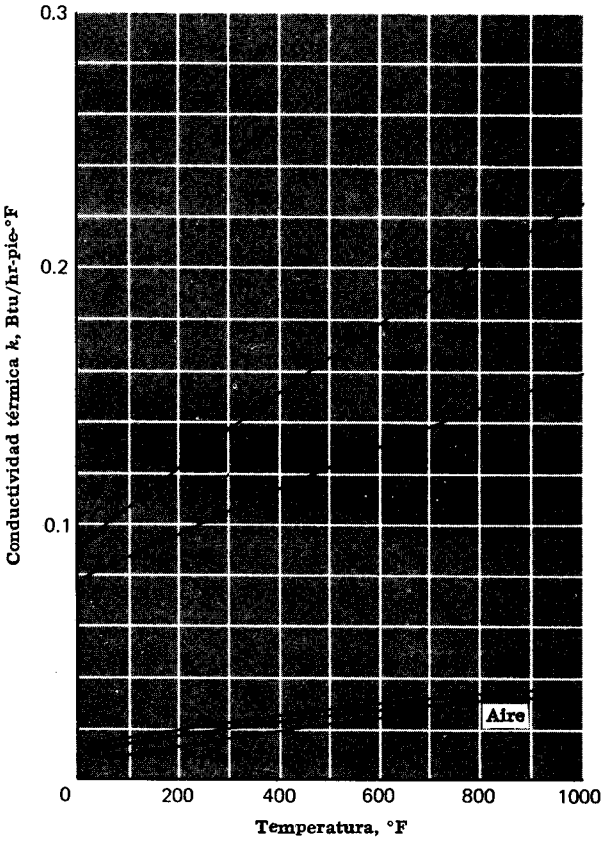


FIG. 1-4. Conductividades térmicas de algunos gases típicos

Librodot

predecir con exactitud los valores observados experimentalmente. En algunos casos, se dispone de teorías para la predicción de conductividades térmicas en líquidos y sólidos, pero, en general, hay todavía muchas preguntas y conceptos que necesitan aclararse con relación a los líquidos y sólidos.

El mecanismo de conducción térmica en un gas es muy simple: podemos identificar la energía cinética de una molécula con su temperatura; por consiguiente, en una región de alta temperatura las moléculas tienen velocidades más altas que en una región de baja temperatura. Las moléculas están en continuo movimiento al azar, chocando unas con otras e intercambiando energía y momentum. Las moléculas tienen este movimiento, exista o no un gradiente de temperatura en el gas. Si una molécula se mueve de una región de alta temperatura hasta una región de baja temperatura, transporta energía cinética a la parte de baja temperatura del sistema y cede esta energía a través de choques con moléculas de baja energía.

Como se apuntó, la conductividad térmica tiene unidades de Btu/hr-pie-°F, cuando el flujo de calor se expresa en Btu por hora. Nótese que esto involucra una *razón* de calor, y el valor numérico de la conductividad térmica indica qué tan rápido debe fluir el calor en un material dado. ¿Cómo se toma en cuenta la razón de transferencia de energía en el modelo molecular discutido arriba? Claramente, entre más rápido se muevan las moléculas, éstas transportarán energía más rápidamente. Por lo tanto, la conductividad térmica de un gas debe ser dependiente de la temperatura. Un tratamiento analítico simplificado muestra que la conductividad térmica de un gas varía con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. (Puede recordarse que la velocidad del sonido en un gas varía con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta; esta velocidad es aproximadamente la velocidad media de las moléculas.) En la Fig. 1-4 se muestran las conductividades térmicas de algunos gases típicos. Para la mayoría de los gases a presiones moderadas, la conductividad térmica es una función de la temperatura solamente. Esto significa que los datos para gases a una atmósfera que se dan en el Apéndice A pueden usarse para un amplio rango de presiones. Cuando la presión del gas alcanza valores del orden de su presión crítica, o en forma más general, cuando se encuentra que el comportamiento del gas es el de un gas no ideal, se deben consultar otras fuentes de datos sobre conductividad térmica.

El mecanismo físico de conducción de energía térmica en líquidos es cualitativamente el mismo que en los gases; sin embargo, la

Librodot

situación es mucho más compleja puesto que las moléculas están menos espaciadas y los campos de fuerza molecular ejercen una gran influencia sobre los intercambios de energía en los procesos de choque. En la Fig. 1-5 se muestran las conductividades térmicas de algunos líquidos típicos.

La energía térmica puede conducirse en los sólidos de dos maneras: por vibración reticular y por transporte de electrones libres. En los buenos conductores eléctricos, un gran número de electrones libres se mueven en la estructura reticular del material. Así como estos electrones pueden transportar carga eléctrica, también pueden llevar energía térmica desde una región de alta temperatura hasta una de baja temperatura, como en el caso de gases. De hecho, a estos electrones con frecuencia se les denomina *gas electrónico*. La energía también puede ser transmitida como energía vibracional en la estructura reticular del material. En general, y sin embargo, esta última forma de transferencia de energía no es tan grande como el transporte electrónico, y es por esta razón que los buenos conductores eléctricos son casi siempre también buenos conductores del calor, por ejemplo, el cobre, el aluminio y la plata; y los aislantes eléctricos son por lo común buenos aislantes del calor. En la Fig. 1-6 se muestran las conductividades térmicas de algunos sólidos típicos. En el Apéndice A se presentan otros datos.

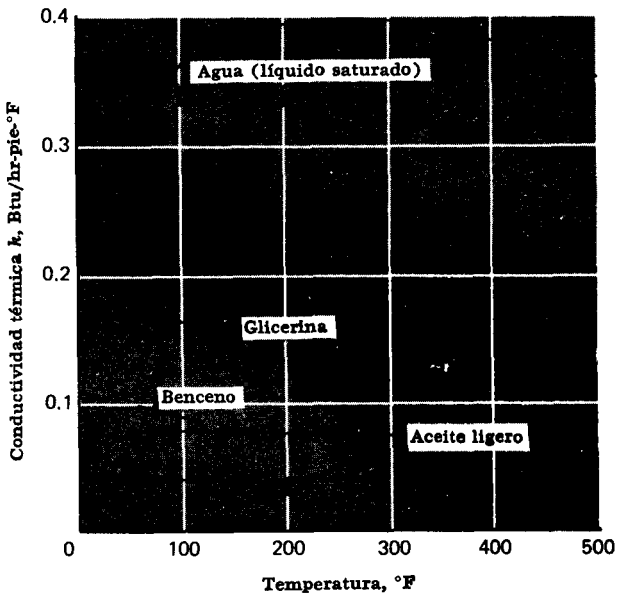


Fig. 1-5. Conductividades térmicas de algunos líquidos típicos

Librodot

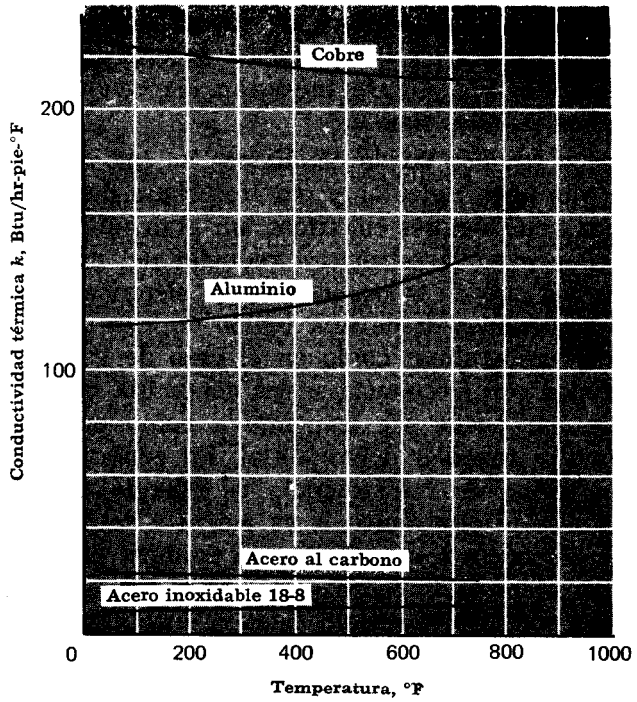


FIG. 1-6. Conductividades térmicas de algunos sólidos típicos

Las conductividades térmicas de varios materiales aislantes también se presentan en el Apéndice A. Algunos valores típicos son 0.022 Btu/hr-pie-°F para fibra de vidrio y 0.28 Btu/hr-pie-°F para yeso de estucar. A altas temperaturas, la transferencia de energía a través de materiales aislantes puede involucrar varias formas: conducción a través del material sólido fibroso o poroso, conducción a través del aire atrapado en los espacios huecos y, a temperaturas suficientemente altas, radiación.

Un problema técnico importante es el almacenamiento y transporte de líquidos a muy bajas temperaturas, como el hidrógeno líquido, durante largos periodos de tiempo. Tales aplicaciones han conducido al desarrollo de *superaislantes*, empleados en estas bajas temperaturas (hasta de $-430°F$). El más efectivo de estos superaislantes está constituido por varias capas de material altamente reflectante, separadas con aislantes. El sistema entero se evacua para minimizar la conducción a través del aire, y son posibles conductividades térmicas tan bajas como 2×10^{-4} Btu/hr-pie-°F. En la Fig. 1-7 se da un resumen conveniente sobre las conductividades térmi-

Librodot

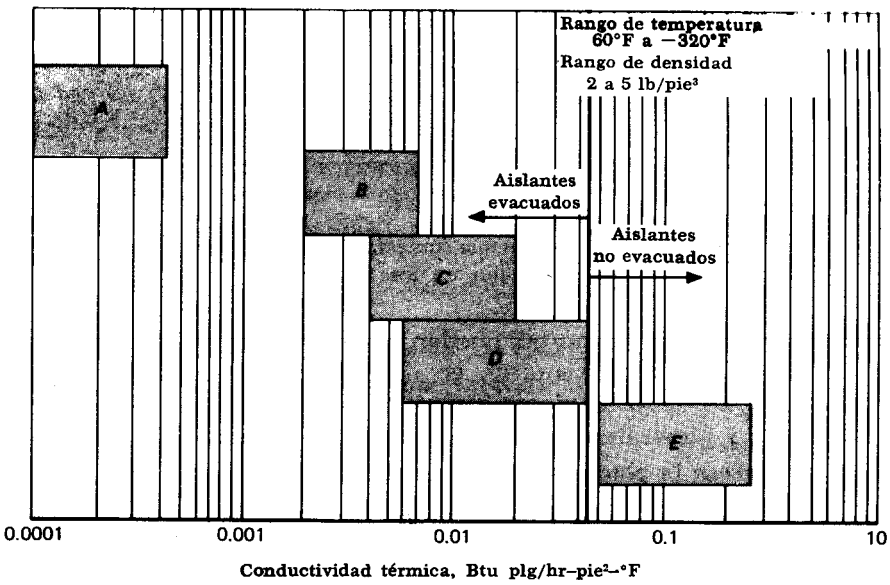


FIG. 1-7. Conductividades térmicas efectivas de un material aislante típico para bajas temperaturas. A—aislantes de capas múltiples; B—polvos opacos; C—fibras de vidrio; D—polvos; E—espumas, polvos y fibras de acuerdo con la Ref. 1

cas de algunos materiales aislantes a temperaturas muy bajas, de acuerdo a Glaser *et al.* (1). En la Ref. 3, y en el texto de Barrón (2) se da una mayor información sobre aislantes de capas múltiples.

1-3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION

Es un hecho bien conocido que una placa de metal caliente se enfriará más rápidamente cuando se coloca frente a un abanico, que cuando se expone al aire estático. Se dice que el calor es disipado por convección y que el proceso de transferencia de calor es por *convección*. Este término proporciona al lector una noción intuitiva concerniente al proceso de transferencia; sin embargo, esta noción debe expanderse para poder realizar un estudio analítico del problema. Por ejemplo, sabemos que la velocidad del aire que se hace pasar sobre la placa caliente obviamente tiene influencia sobre la razón de transferencia de calor. Pero, ¿es lineal esta influencia sobre el enfriamiento?, es decir, si la velocidad se duplica, ¿se duplicará la razón de transferencia de calor? Sospechamos también que la razón de transferencia de calor sería diferente si la placa se enfriara con agua en vez de con aire, pero de nuevo, ¿cuál sería la

Librodot

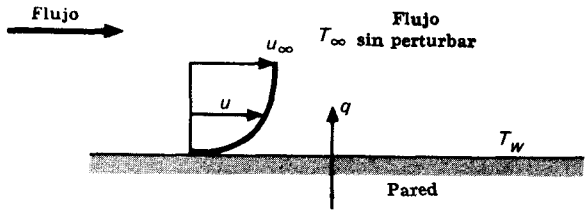


FIG. 1-8. Diagrama esquemático que muestra la transferencia de calor por convección en una placa

diferencia? Estas incógnnitas pueden resolverse con la ayuda de análisis básicos que se presentarán en capítulos posteriores. Por ahora, bosquejaremos el mecanismo físico de transferencia de calor por convección y mostraremos su relación con el proceso de conducción.

Considérese la placa caliente mostrada en la Fig. 1-8. La temperatura de la placa es T_w y la temperatura del fluido es T_∞. La velocidad del fluido se muestra en la figura, reduciéndose a cero en la placa como consecuencia de la acción viscosa. Debido a que la velocidad de la capa de fluido en la pared es cero, el calor se transfiere únicamente por conducción en ese punto. Así, podemos calcular la transferencia de calor usando la Ec. (1-1), con la conductividad térmica del fluido y el gradiente de temperatura del fluido en la pared. ¿Por qué entonces, si el calor fluye por conducción en esta capa, hablamos de transferencia de calor por *convección* y se necesita considerar la velocidad del fluido? La respuesta es que el gradiente de temperatura depende de la razón a la cual el fluido disipa el calor; una alta velocidad produce un gradiente de temperatura mayor, y así sucesivamente. Por lo tanto, el gradiente de temperatura en la pared depende del campo de flujo, y desarrollaremos en nuestros análisis posteriores una expresión relacionando estas dos cantidades. Sin embargo, debe recordarse que el mecanismo físico de la transferencia de calor en la pared es un proceso de conducción.

Para expresar el efecto total de convección usamos la ley de Newton de enfriamiento:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \tag{1-8}$$

Aquí la razón de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, y el área de la superficie A. La cantidad h se conoce como el coeficiente de transferencia de calor por convección, y la Ec. (1-8) es la ecuación que lo define. Puede hacerse un cálculo analítico de h para varios sistemas. Para situaciones complejas, éste debe ser determinado experi-

Librodot

mentalmente. Al coeficiente de transferencia de calor se le llama algunas veces *conductancia de película*, debido a su relación con el proceso de conducción en la capa delgada estacionaria de fluido en la superficie de la pared. De la Ec. (1-8) notamos que las unidades de h son Btu/hr-pie²-°F cuando el flujo de calor está en Btu por hora. Este es el conjunto de unidades usado con más frecuencia.

En vista de las discusiones anteriores, se puede anticipar que la transferencia de calor por convección tiene una dependencia respecto a la viscosidad del fluido, además de la dependencia con relación

Tabla 1-1. Valores Aproximados de los Coeficientes de Transferencia de Calor por Convección

Forma	h, Btu/hr-pie²-°F	Watts m²-°C
Convección libre, aire	1–5	5–25
Convección forzada, aire	2–100	10–500
Convección forzada, agua	20–3 000	100–15 000
Agua en ebullición	500–5 000	2 500–25 000
Condensación de vapor de agua	1 000–20 000	5 000–100 000

a las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad). Esto se anticipa debido a la influencia de la viscosidad en el perfil de velocidad y, de igual manera, en la razón de transferencia de energía en la región cercana a la pared.

Si una placa caliente fuera expuesta al aire ambiente sin una fuente externa de movimiento, se experimentaría un movimiento de aire como resultado de los gradientes de densidad próximos a la placa. A esto se le llama convección *natural* o *libre*, opuesta a la convección *forzada*, la cual se experimenta en el caso de aire soplado con abanico sobre una placa. Los fenómenos de ebullición y condensación están también agrupados bajo el tópico general de transferencia de calor por convección. En la Tabla 1-1 se indican los rangos aproximados de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

1-4 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

En contraste con los mecanismos de conducción y convección, donde la transferencia de energía se realiza a través de un medio, el calor también puede ser transferido hacia regiones donde existe un vacío perfecto. El mecanismo en este caso es radiación electromagnética. Nosotros limitaremos nuestra discusión a radiación electromagnética, la cual se propaga como resultado de una diferencia de temperatura y se le llama radiación térmica.

Librodot

Las consideraciones termodinámicas muestran† que un radiador ideal o *cuerpo negro* emitirá energía a una razón proporcional con la temperatura absoluta del cuerpo elevada a la cuarta potencia. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio neto de calor es entonces proporcional a la diferencia en T^4. Así

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \tag{1-9}$$

donde σ es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan-Boltzmann con un valor de 0.1714×10^{-8} Btu/hr-pie^2-°R^4 en el sistema ingenieril de unidades. A la Ec. (1-9) se le llama ley de Stefan-Boltzmann de radiación térmica y se aplica únicamente a cuerpos negros. Es importante notar que esta ecuación es válida sólo para radiación térmica; otros tipos de radiación electromagnética no pueden ser tratados en forma tan simple.

Se ha mencionado ya que un cuerpo negro es aquel que radia energía de acuerdo con la ley T^4. Nosotros lo llamamos cuerpo negro, debido a que las superficies negras tales como una pieza de metal cubierto con carbón negro, aproxima este tipo de comportamiento. Otros tipos de superficies, como por ejemplo, una superficie barnizada o una placa de metal pulida, no radian tanta energía como la de un cuerpo negro; sin embargo, la radiación total emitida por esos cuerpos generalmente sigue la proporcionalidad T^4. Para tomar en cuenta la naturaleza "gris" de tales superficies, introducimos otro factor en la Ec. (1-9), llamado la emisividad ε, que relaciona la radiación de la superficie "gris" con la de una superficie negra ideal. Además, debemos tener presente el hecho de que no toda la radiación que sale de una superficie llegará a la otra superficie, puesto que la radiación electromagnética viaja en líneas rectas y algo de ésta se perderá en los alrededores. Por lo tanto, introducimos dos nuevos factores en la Ec. (1-9) para tomar en cuenta estas situaciones, así que

$$q = F_\varepsilon F_G \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \tag{1-10}$$

donde F_ε es la función de emisividad y F_G es la función geométrica "factor de forma". La determinación de la forma de esas funciones para configuraciones específicas, será tratada en capítulos posteriores. Es importante alertar al lector respecto al hecho de que esas funciones por lo general no son independientes una de la otra, como lo indica la Ec. (1-10).

† Véase, por ejemplo, J. P. Holman, "Thermodynamics", Pág. 222, McGraw-Hill Book Company, New York, 1969.

Librodot

1-5 DIMENSIONES Y UNIDADES

En esta sección bosquejaremos el sistema de unidades que se usará en todo el libro. Se debe tener cuidado de no confundir el significado de los términos unidades y dimensiones. Una dimensión es una variable física usada para especificar el comportamiento o naturaleza de un sistema particular. Por ejemplo, la longitud de una barra es una dimensión de ésta. De igual manera, la temperatura de un gas puede considerarse como una de las dimensiones termodinámicas del gas. Cuando decimos que la barra es de tantas pulgadas de longitud o el gas tiene una temperatura de tantos grados Fahrenheit, estamos dando unidades, que seleccionamos para medir la dimensión. En nuestro desarrollo de transferencia de calor usaremos las dimensiones

L = longitud
M = masa
F = fuerza
τ = tiempo
T = temperatura

Todas las cantidades físicas usadas en transferencia de calor pueden expresarse en términos de esas dimensiones fundamentales. Las unidades usadas para ciertas dimensiones se seleccionan para definiciones algo arbitrarias, las cuales por lo general están relacionadas a un fenómeno físico o a una ley. Por ejemplo, la segunda ley de Newton de movimiento puede escribirse

Fuerza $\sim$ razón de cambio de momentum con respecto al tiempo

$$F = k\frac{d(mv)}{d\tau}$$

donde k es la constante de proporcionalidad. Si la masa es constante,

$$F = kma \tag{1-11}$$

donde la aceleración es $a = dv/d_\tau$. La Ec. (1-11) por lo común se escribe como

$$F = \frac{1}{g_c}ma \tag{1-12}$$

con $1/g_c = k$. La Ec. (1-12) se usa para definir nuestros sistemas de unidades para masa, fuerza, longitud y tiempo. Algunos sistemas típicos de unidades son

1. Una fuerza de 1 lb acelerará una masa de 1 lb 32.16 pies/seg^2.
2. Una fuerza de 1 lb acelerará una masa de 1 slug 1 pie/seg^2.

Librodot

3. Una fuerza de 1 dina acelerará una masa de 1 g 1 cm/seg².
4. Una fuerza de 1 newton acelerará una masa de 1 kg 1 m/seg².

Así pues, la Ec. (1-11) debe ser dimensionalmente homogénea, y nosotros tendremos un valor diferente de la constante g_c para cada uno de los sistemas de unidades en los puntos 1 a 4 arriba anotados. Esos valores son

1. $g_c = 32.16$ lb_m/lb_f pie/seg²
2. $g_c = 1$ slug/lb_f pie/seg²
3. $g_c = 1$ g-cm/dina-seg²
4. $g_c = 1$ kg-m/newton-seg²

Sin importar qué sistema de unidades se emplee, éste deberá ser consistente con las definiciones antes mencionadas.

El trabajo tiene las dimensiones del producto de una fuerza por una distancia. La energía tiene las mismas dimensiones. Las unidades para trabajo y energía pueden seleccionarse de cualquiera de los sistemas usados arriba. Así, las unidades de trabajo y energía para cada uno de estos sistemas son

1. lb_f-pie
2. lb_f-pie
3. dina-cm = 1 erg
4. newton-m = 1 joule

Además, podemos usar las unidades de energía basadas en fenómenos térmicos:

1 Btu aumentará 1°F a 1 lb_m de agua, a 68°F.
1 cal aumentará 1°C a 1 g de agua, a 20°C.
1 kcal aumentará 1°C a 1 kg de agua, a 20°C.

Los factores de conversión para las diferentes unidades de trabajo y energía son

1 Btu = 778.16 lb_f-pie
1 Btu = 1 055 joules
1 kcal = 4 182 joules
1 lb_f-pie = 1.356 joules
1 Btu = 252 cal

El peso de un cuerpo se define como la fuerza ejercida sobre éste como resultado da la aceleración de la gravedad. Así

$$W = \frac{g}{g_c} m \tag{1-13}$$

Librodot

donde W es el peso y g es la aceleración de la gravedad. Nótese que el peso del cuerpo tiene las dimensiones de una fuerza.

En general, se usará el sistema de unidades pie-lb_f-lb_m-seg-°F-Btu en este libro, debido a que éstas se usan ampliamente en la industria en los Estados Unidos. Existe gran ímpetu, sin embargo, para instituir las unidades SI (Systeme International d'Unités) como un estándar mundial. En este sistema, las unidades fundamentales son el metro, newton, kilogramo-masa, segundo, grados Celsius, y una unidad de energía "térmica" que no se usa, es decir, el joule (newton-metro) viene a ser la unidad de energía que se usa. El watt (joule/seg) es la unidad de potencia en este sistema. En el sistema internacional, las unidades estándar para conductividad térmica deberán ser

k en watt/m-°C

y el coeficiente de transferencia de calor por convección se expresará como

h en watt/m^2-°C

Eventualmente, el sistema internacional de unidades se espera que predomine, pero el tiempo para hacer este cambio es incierto. En la solución de los problemas de ejemplo, se dará la respuesta en ambos conjuntos de unidades, para que el lector adquiera sentido sobre los órdenes de magnitud de las varias cantidades en ambos sistemas. En la Tabla A-12 se dan los factores de conversión apropiados.

Ejemplo 1-1. Una cara de una placa de cobre de 1 plg de espesor se mantiene a 500°F, y la otra a 100°F. ¿Qué cantidad de calor se transfiere a través de la placa? Supóngase que $k = 215$ Btu/hr-pie-°F.

Solución. De la ley de Fourier

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$

Integrando,

$$\frac{q}{A} = -k\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$= -215 \times \frac{100 - 500}{\frac{1}{12}}$$

$$= 1.032 \times 10^6 \text{ Btu/hr-pie}^2 \quad (5.86 \times 10^6 \text{ W/m}^2\text{-°C})$$

Ejemplo 1-2. Se sopla aire a 60°C sobre una placa caliente de 1 por 2 pies, la cual se mantiene a 300°F. El coeficiente de trans-

Librodot

ferencia de calor es igual a 5 Btu/hr-pie²-°F. Calcúlese la transferencia de calor.

Solución. De la ley de Newton de enfriamiento

$$q = hA(T_w - T_\infty)$$
$$= (5)(2)(1)(300 - 60) = 2\,400 \text{ Btu/hr} \qquad (703 \text{ watts})$$

Ejemplo 1-3. Suponiendo que la placa del Ej. 1-2 es de acero. Tiene 2 plg de espesor con $k = 25$ Btu/hr-pie-°F y que 1 100 Btu/hr se pierden de la superficie de la placa por radiación, calcúlese la temperatura interior de la placa.

Solución. El calor conducido a través de la placa debe ser igual a la suma de las pérdidas por convección y radiación

$$q_{\text{cond}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$$
$$-kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = 2\,400 + 1\,100 = 3\,500 \text{ Btu/hr}$$
$$\Delta T = \frac{-(3\,500)(\frac{2}{12})}{(2)(25)} = -11.7°\text{F}$$

así que la temperatura interior de la placa es

$$T_i = 300 + 11.7 = 311.7°\text{F}$$

1-6 RESUMEN

Podemos resumir nuestras notas introductorias de manera simple. La transferencia de calor puede llevarse a cabo por una o más de las tres formas siguientes: conducción, convección y radiación. Se ha notado que el mecanismo físico de convección está relacionado a la conducción de calor a través de la capa delgada de fluido adyacente a la superficie de transferencia de calor. La ley de Fourier es aplicable tanto en conducción como en convección, aunque la mecánica de fluidos debe entrar en juego en los problemas de convección para establecer el gradiente de temperatura.

La transferencia de calor por radiación involucra un mecanismo físico diferente —el de propagación de energía electromagnética—. Para estudiar este tipo de transferencia de energía, se introduce el concepto de radiador ideal o cuerpo negro, el cual radia energía a una razón proporcional a su temperatura absoluta a la cuarta potencia.

Es fácil encontrar casos en que las tres formas de transferencia de calor están presentes, como en la Fig. 1-9. En este caso, el calor conducido a través de la placa se disipa en la superficie de ésta

Librodot

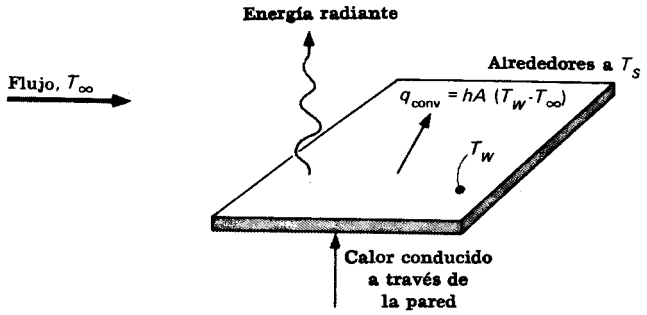


FIG. 1-9. Esquema que ilustra la combinación de transferencia de calor por conducción, convección y radiación

por una combinación de convección y radiación. Un balance de energía daría

$$-kA\left(\frac{dT}{dy}\right)_{\text{wall}} = hA(T_w - T_\infty) + F_e F_G \sigma A(T_w^4 - T_s^4)$$

donde T_s = temperatura de los alrededores
T_w = temperatura de la superficie
T_∞ = temperatura del fluido

Para aplicar la ciencia de transferencia de calor a situanes prácticas, se requiere un conocimiento completo de las tres formas de transferencia de calor.

PROBLEMAS

1-1. Defínase la conductividad térmica.

1-2. Defínase el coeficiente de transferencia de calor por convección.

1-3. Discútase el mecanismo de conducción térmica en gases y sólidos.

1-4. Discútase el mecanismo de convección de calor.

1-5. Mil Btu/hr se conducen a través de una sección de material aislante con una sección transversal de 1 pie². El espesor es de 1 plg y la conductividad térmica puede tomarse como 0.12 Btu/hr-pie-°F. Calcule la diferencia de temperatura a través del material.

1-6. mediante el uso de las definiciones básicas de unidades y dimensiones dadas en la Sec. 1-5, obtenga las expresiones

(*a*) Para convertir joules a Btu
(*b*) Para convertir dina-centímetros a joules
(*c*) Para convertir Btu a calorías

Librodot

1-7. Se tiene una diferencia de temperatura de 150°F a través de una placa de fibra de vidrio de 5 plg de espesor. La conductividad térmica de la fibra de vidrio es 0.02 Btu/hr-pie-°F. Calcúlese el calor transferido a través del material por hora y por unidad de área.

1-8. Una pared plana se expone a una temperatura ambiente de 100°F. La pared está cubierta con una capa de aislante de 1 plg de espesor, cuya conductividad térmica es de 0.8 Btu/hr-pie-°F, y la temperatura de la pared en el lado interior del aislante es de 600°F. Las pérdidas de calor de la pared hacia el ambiente son por convección. Calcúlese el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección que debe mantenerse en la superficie exterior del aislante, para que la temperatura de la superficie exterior no exceda de 105°F.

1-9. Dos superficies negras perfectas se construyen de tal manera que toda la energía radiante que sale de una superficie a 1 500°F, alcance la otra superficie. La temperatura de esta última se mantiene a 500°F. Calcúlese la transferencia de calor entre las superficies, por hora y por unidad de área de la superficie que se mantiene a 1 500°F.

1-10. Dos placas paralelas muy grandes cuyas condiciones en la superficie son muy aproximadas a la de un cuerpo negro, se mantienen a 2 000°F y 800°F, respectivamente. Calcúlese la transferencia de calor por radiación entre las placas por unidad de tiempo y por unidad de área de superficie.

1-11. Una placa de acero de ¼ plg que tiene una conductividad térmica de 25 Btu/hr-pie-°F se expone a un flujo de calor radiante de 1 500 Btu/hr-pie² en un espacio al vacío, donde la transferencia de calor por convección es despreciable. Suponiendo que la temperatura de la superficie del acero expuesto a la energía radiante se mantiene a 100°F, ¿cuál debe ser la temperatura de la otra superficie, si toda la energía radiante que incide sobre la placa se transfiere a través de ésta por conducción?

1-12. A partir de la ecuación de conducción de calor tridimensional en coordenadas cartesianas [Ec. (1-3*a*)], obténgase la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas [Ec. (1-3*b*)].

1-13. Considérese una pared calentada por convección por un lado y enfriada por convección por el otro lado. Muéstrese que la razón de transferencia de calor a través de la pared es:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{1/h_1A + \Delta x/kA + 1/h_2A}$$

Librodot

donde T_1 y T_2 son las temperaturas de los fluidos en cada lado de la pared, y h_1 y h_2 son los correspondientes coeficientes de transferencia de calor.

1-14. Se construye un cono truncado de aluminio de 1 pie de altura. El diámetro superior es de 3 plg y el diámetro de la base es de 5 plg. La superficie inferior se mantiene a 200°F y la superficie superior a 1 000°F. La otra superficie está aislada. Suponiendo flujo de calor unidimensional, ¿cuál es la razón de transferencia de calor en Btu por hora?

1-15. Las temperaturas sobre las caras de una pared plana de 6 plg de espesor son 700°F y 200°F. La pared se construye de un vidrio especial con las siguientes propiedades: k = 0.45 Btu/hr-pie-°F, ρ = 170 lb_m/pie^3, C_p = 0.2 Btu/lb_m-°F. ¿Cuál es el flujo de calor a través de la pared en condiciones de estado estable?

1-16. Una ama de casa informa a su esposo, que es ingeniero, que con frecuencia se siente fresca en el verano cuando se para frente a un refrigerador abierto. Su esposo le dice que está solamente "imaginando cosas" debido a que no hay abanico en el refrigerador para soplar el aire frío sobre ella. Esto da origen a una discusión. ¿De qué lado de la discusión está usted? ¿Por qué?

1-17. Una ama de casa informa a su esposo, que es ingeniero, que "el agua caliente se congelará más rápidamente que el agua fría". El dice que esta afirmación no tiene sentido. Ella responde diciendo que ha tomado el tiempo del proceso de congelación en las bandejas de hielo en el refrigerador y ha encontrado que el agua caliente se congela más rápidamente. Como amigo se le pide que aclare la situación. ¿Existe una explicación lógica para las observaciones del ama de casa?

1-18. Un salón de clases con aire acondicionado en Texas se mantiene a 72°F en el verano. Los estudiantes asisten a clases en pantalones cortos, sandalias y camisetas, y se sienten bastante confortables. En el mismo salón de clases durante el invierno, los mismos estudiantes usan chamarras de lana, camisas de manga larga y suéteres y sienten la misma comodidad con la temperatura del salón a 75°F. Suponiendo que la humedad no es un factor, explíquese esta anomalía aparente en la "temperatura de confort".

1-19. Cierto material superaislante que tiene una conductividad térmica de 10^{-4} Btu/hr-pie-°F, se usa para aislar un tanque de nitrógeno líquido que se mantiene a −320°F. 85.9 Btu se requieren para vaporizar cada lb_m de nitrógeno a esta temperatura. Suponiendo que el tanque es una esfera con un diámetro interior de 2 pies, estímese la cantidad de nitrógeno vaporizado por día, para un espesor de aislante de 1.0 plg y una temperatura ambiente de 70°F. Suponga que la temperatura exterior del aislante es de 70°F.

Librodot

1-20. Calcúlese el intercambio de calor por radiación en 1 día entre dos planos negros que tienen el área de la superficie de una esfera de 2 pies de diámetro, cuando los planos se mantienen a −320°F y 70°F. ¿Qué indica este cálculo en relación al Prob. 1-19?

1-21. Suponiendo que la transferencia de calor en la esfera del Prob. 1-19 ocurre por convección libre, con un coeficiente de 1.0 Btu/hr-pie^2-°F, calcúlese la diferencia de temperatura entre la superficie exterior de la esfera y el medio ambiente.

1-22. Colóquense los siguientes materiales en orden de (*a*) respuesta transitoria, y (*b*) conducción en estado estable. Tomando el material con el rango más alto, dé a los otros materiales el porcentaje del máximo.

1. Aluminio
2. Cobre
3. Plata
4. Hierro
5. Plomo
6. Acero cromado—18% Cr, 8% N
7. Magnesio

¿Qué se puede concluir de este ordenamiento?

REFERENCIAS

1. Glaser, P. E., I. A. Black y P. Doherty: Multilayer Insulation, *Mech. Eng.*, Pág. 23, agosto, 1965.
2. Barron, R.: "Cryogenic Systems", McGraw-Hill Book Company, New York, 1967.
3. Dewitt, W. D., N. C. Gibbon y R. L. Reid: Multifoil Type Thermal Insulation, *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. 4, No. 5, Supl., (1968), Págs. 263-271.

Librodot