

FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

Hasta ahora, han sido considerados los modos de conducción y convección de transferencia de calor, los cuales están relacionados con la naturaleza de los medios que intervienen y con la presencia de movimiento del fluido, entre otras cosas. Ahora se centrará la atención en el tercer mecanismo de transferencia de calor: la *radiación*, el cual es característicamente diferente a los otros dos.

Este capítulo se inicia con una discusión de las *ondas electromagnéticas* y el *espectro electromagnético*, haciendo hincapié en particular sobre la *radiación térmica*. A continuación, se presenta el *cuerpo negro*, la *radiación de cuerpo negro* y la *función de radiación de cuerpo negro* idealizados, junto con la *ley de Stefan-Boltzmann*, la *ley de Planck* y la *ley del desplazamiento de Wien*.

La radiación es emitida por cada punto sobre una superficie plana, en todas direcciones hacia el hemisferio que está arriba de ella. La cantidad que describe la magnitud de la radiación emitida o incidente en una dirección especificada en el espacio es la *intensidad de radiación*. Varios flujos de radiación, como el *poder de emisión*, *irradiación* y *radiosidad*, se expresan en términos de la intensidad. Esto viene seguido por una discusión de las propiedades de radiación de los materiales, como la *emisividad*, la *absortividad* y la *transmisividad*, y su dependencia con respecto a la longitud de onda, la dirección y la temperatura.

Se presenta el *efecto de invernadero* como un ejemplo de las consecuencias de la dependencia de las propiedades de la radiación respecto de la longitud de onda. Finaliza este capítulo con una discusión acerca de la *radiación atmosférica* y de la *radiación solar*.

OBJETIVOS

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

- Clasificar la radiación electromagnética e identificar la radiación térmica
- Entender el cuerpo negro idealizado y calcular la potencia de emisión del cuerpo negro, total y espectral
- Calcular la fracción de radiación emitida en una banda especificada de longitud de onda, aplicando las funciones de la radiación del cuerpo negro
- Entender el concepto de intensidad de la radiación y definir las cantidades direccionales espectrales, aplicando la intensidad
- Desarrollar una comprensión clara de las propiedades de emisividad, absortividad, reflectividad y transmisividad sobre una base espectral, direccional y total
- Aplicar la ley de Kirchhoff para determinar la absortividad de una superficie cuando se conoce su emisividad, y
- Modelar la radiación atmosférica mediante el uso de una temperatura efectiva del cielo y apreciar la importancia del efecto de invernadero.

CONTENIDO

12-1	Introducción	664
12-2	Radiación térmica	665
12-3	Radiación de cuerpo negro	667
12-4	Intensidad de radiación	673
12-5	Propiedades de radiación	679
12-6	Radiación atmosférica y solar	688

Tema de interés especial:

Ganancia de calor solar a través de las ventanas 692

Resumen 699

Bibliografía y lecturas sugeridas 701

Problemas 701

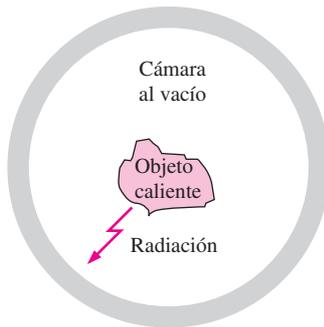


FIGURA 12-1

Un objeto caliente en una cámara al vacío pierde calor sólo por radiación.

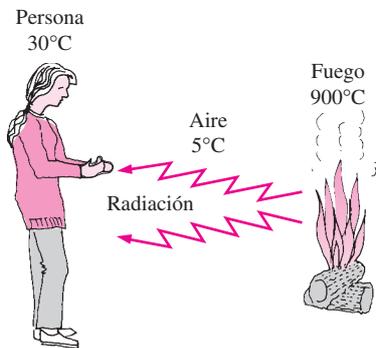


FIGURA 12-2

A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación puede ocurrir entre dos cuerpos incluso aunque estén separados por un medio más frío que ellos dos.

12-1 ■ INTRODUCCIÓN

Considere un objeto caliente que está suspendido en una cámara en la que se ha hecho el vacío y cuyas paredes se encuentran a la temperatura ambiente (figura 12-1). Llegará un momento en que el objeto caliente se enfriará y alcanzará el equilibrio térmico con sus alrededores. Es decir, perderá calor hasta que su temperatura alcance la de las paredes de la cámara. La transferencia de calor entre el objeto y la cámara no pudo haber tenido lugar por conducción o convección, porque estos dos mecanismos no pueden desarrollarse en el vacío. Por lo tanto, la transferencia de calor debe haber ocurrido a través de otro mecanismo que comprenda la emisión de la energía interna del objeto. Este mecanismo es la *radiación*.

La radiación difiere con respecto a los otros dos mecanismos de transferencia de calor en que no requiere la presencia de un medio material para llevarse a efecto. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. Asimismo, la transferencia por radiación ocurre en los sólidos así como en los líquidos y los gases. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas los tres modos de transferencia de calor ocurren de manera concurrente en grados variables. Pero la transferencia a través de un espacio en el que se ha hecho el vacío sólo puede ocurrir por radiación. Por ejemplo, la energía del Sol llega a la Tierra por radiación.

El lector recordará que la transferencia de calor por conducción o convección tiene lugar en la dirección de la temperatura decreciente; es decir, de un medio a una temperatura alta hacia otro a una temperatura más baja. Resulta interesante que la transferencia de calor por radiación puede ocurrir entre dos cuerpos separados por un medio más frío que ambos (figura 12-2). Por ejemplo, la radiación solar llega a la superficie de la Tierra después de pasar a través de capas de aire frías a grandes altitudes. Asimismo, las superficies que absorben radiación dentro de un invernadero alcanzan temperaturas elevadas incluso cuando sus cubiertas de plástico o de vidrio permanecen más o menos frías.

El fundamento teórico de la radiación fue establecido en 1864 por el físico James Clerk Maxwell, quien postuló que las cargas aceleradas o las corrientes eléctricas cambiantes dan lugar a campos eléctricos y magnéticos. Estos campos que se mueven con rapidez se llaman **ondas electromagnéticas** o **radiación electromagnética** y representan la energía emitida por la materia como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. En 1887 Heinrich Hertz demostró en forma experimental su existencia. Las ondas electromagnéticas transportan energía del mismo modo que las otras ondas y viajan a la *velocidad de la luz* en el vacío, la cual es $c_0 = 2.9979 \times 10^8$ m/s. Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su *frecuencia* ν o su *longitud de onda* λ . Estas dos propiedades en un medio están relacionadas por

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (12-1)$$

en donde c es la velocidad de propagación de una onda en ese medio. La velocidad de propagación en un medio está relacionada con la velocidad de la luz en el vacío por $c = c_0/n$, en donde n es el *índice de refracción* de ese medio. El índice de refracción es en esencia igual a la unidad para el aire y la mayor parte de los gases, alrededor de 1.5 para el vidrio y más o menos 1.33 para el agua. La unidad de uso común para la longitud de onda es el *micrometro* (μm) o micra, en donde $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m. A diferencia de la longitud de onda y de la velocidad de propagación, la frecuencia de una onda electromagnética sólo depende de la fuente y es independiente del medio a través del cual viaja. La *frecuencia* (el número de oscilaciones por segundo) de una onda electromagnética puede variar desde un millón de Hz hasta un cuatrillón de Hz o

más, dependiendo de la fuente. Note, con base en la ecuación 12-1, que la longitud de onda y la frecuencia de la radiación electromagnética son inversamente proporcionales.

Ha probado ser útil concebir la radiación electromagnética como la propagación de una colección de paquetes discretos de energía llamados **fotones** o **cuantos**, como propuso Max Planck en 1900, en conjunción con su *teoría cuántica*. En esta concepción, cada fotón de frecuencia ν se considera que tiene una energía de

$$e = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (12-2)$$

en donde $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la *constante de Planck*. Note, basándose en la segunda parte de la ecuación 12-2, que la energía de un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda. Por lo tanto, la radiación de longitud de onda más corta posee energías más grandes del fotón. No es sorprendente que tratemos de evitar la radiación de longitud de onda muy corta, como los rayos gamma y los rayos X, ya que son intensamente destructivos.

12-2 ■ RADIACIÓN TÉRMICA

Aun cuando todas las ondas electromagnéticas tienen las mismas características generales, las ondas de distinta longitud difieren de manera significativa en su comportamiento. La radiación electromagnética que se encuentra en la práctica abarca una amplia gama de longitudes de onda, que varían desde menos de $10^{-10} \mu\text{m}$, para los rayos cósmicos, hasta más de $10^{10} \mu\text{m}$, para las ondas de energía eléctrica. El **espectro electromagnético** también incluye los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, la radiación térmica, las microondas y las ondas de radio, como se muestra en la figura 12-3.

Los diferentes tipos de radiación electromagnética se producen a través de varios mecanismos. Por ejemplo, los *rayos gamma* son producidos por las reacciones nucleares, los *rayos X* por el bombardeo de metales con electrones de alta energía, las *microondas* por tipos especiales de tubos electrónicos, como los klistrones y los magnetrones, y las *ondas de radio* por la excitación de algunos cristales o por el flujo de corriente alterna por conductores eléctricos.

Los rayos gamma y los rayos X de longitud de onda corta son principalmente de interés para los ingenieros nucleares, en tanto que las microondas y las ondas de radio de longitud de onda larga interesan a los ingenieros electricistas. El tipo de radiación electromagnética que resulta pertinente para la transferencia de calor es la **radiación térmica** emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia. La temperatura es una medida de la intensidad de estas actividades en el nivel microscópico y la rapidez de la emisión de radiación térmica se incrementa al aumentar la temperatura. La radiación térmica es emitida en forma continua por toda la materia cuya temperatura está por arriba del cero absoluto. Es decir, todo lo que nos rodea, como las paredes, los muebles y nuestros amigos, constantemente emite (y absorbe) radiación (figura 12-4). La radiación térmica también se define como la parte del espectro electromagnético que se extiende desde alrededor de 0.1 hasta $100 \mu\text{m}$, dado que la emitida por los cuerpos debida a su temperatura cae casi por completo en este rango de longitudes de onda. Por tanto, la radiación térmica incluye toda la radiación visible y la infrarroja (IR), así como parte de la radiación ultravioleta (UV).

Lo que llamamos **luz** es sencillamente la parte *visible* del espectro electromagnético que se encuentra entre 0.40 y $0.76 \mu\text{m}$. Desde el punto de vista de sus características, la luz no es diferente a la demás radiación electromagnética, excepto en que dispara la sensación de visión en el ojo humano. La luz,

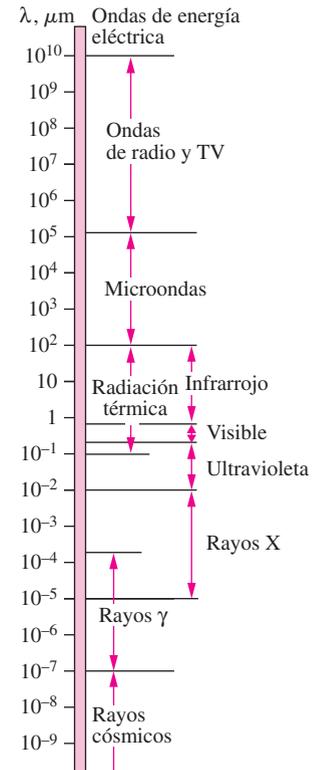


FIGURA 12-3

Espectro de ondas electromagnéticas.

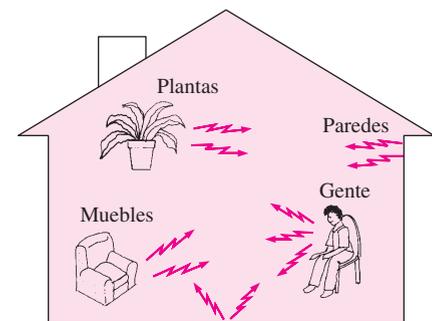


FIGURA 12-4

Todo lo que nos rodea emite constantemente radiación térmica.

TABLA 12-1

Rangos de longitudes de onda de los diferentes colores

Color	Banda de longitudes de onda
Violeta	0.40-0.44 μm
Azul	0.44-0.49 μm
Verde	0.49-0.54 μm
Amarillo	0.54-0.60 μm
Naranja	0.60-0.67 μm
Rojo	0.63-0.76 μm

o el espectro visible, consta de bandas angostas de color, desde el violeta (0.40-0.44 μm) hasta el rojo (0.63-0.76 μm), como se muestra en la tabla 12-1.

Un cuerpo que emite alguna radiación en el rango visible recibe el nombre de fuente luminosa. Es obvio que el Sol es nuestra principal fuente luminosa. La radiación electromagnética emitida por el Sol se conoce como **radiación solar** y casi toda ella cae en la banda de longitudes de onda de 0.3-3 μm . Casi la *mitad* de la radiación solar es luz (es decir, cae en el rango visible). La restante es ultravioleta o infrarroja.

La radiación emitida por los cuerpos a la temperatura ambiente cae en la región **infrarroja** del espectro, la cual se extiende de 0.76 hasta 100 μm . Los cuerpos empiezan a emitir radiación visible que puede notarse a temperaturas por encima de 800 K. El filamento de tungsteno de un foco eléctrico debe calentarse a temperaturas por arriba de 2000 K antes de que pueda emitir alguna cantidad significativa de radiación en el rango visible.

La radiación **ultravioleta** incluye el extremo de baja longitud de onda del espectro de radiación térmica y se encuentra entre las longitudes de onda de 0.01 y 0.40 μm . Los rayos ultravioleta deben evitarse ya que pueden matar microorganismos y causan serios daños a los humanos y otros organismos vivos. Alrededor de 12% de la radiación solar se encuentra en el intervalo ultravioleta y sería devastador si llegara a alcanzar la superficie de la Tierra. Por fortuna, la capa de ozono (O_3) de la atmósfera actúa como una cubierta protectora y absorbe la mayor parte de esta radiación. Los rayos ultravioleta que permanecen en la luz solar todavía son suficientes como para causar serias quemaduras a los adoradores del Sol y la exposición prolongada a la luz solar directa es la causa principal del cáncer de piel, el cual puede ser mortal. Los recientes descubrimientos de “agujeros” en la capa de ozono han impulsado a la comunidad internacional a prohibir el uso de productos químicos que destruyen el ozono, como el refrigerante Freón 12, para salvar la Tierra. La radiación ultravioleta también se produce en forma artificial en lámparas fluorescentes que se usan en medicina como destructores de bacterias y en salas para bronceado artificial. La conexión entre el cáncer de piel y los rayos ultravioleta ha hecho que los dermatólogos emitan fuertes advertencias contra su uso para broncear.

En los hornos de microondas se utiliza radiación electromagnética en la región de **microondas** del espectro generadas por tubos a propósito llamados *magnetrones*. Las microondas en el rango de 10^2 - 10^5 μm resultan muy adecuadas para su uso en la cocción ya que son *reflejadas* por los metales, *transmitidas* por el vidrio y los plásticos y *absorbidas* por las moléculas de los alimentos (en especial, las de agua). De este modo, la energía eléctrica convertida en radiación en un horno de microondas llega a convertirse en parte de la energía interna de los alimentos. La cocción rápida y eficiente en los hornos de microondas los ha convertido en uno de los aparatos domésticos esenciales en las cocinas modernas (figura 12-5).

En los radares y los teléfonos inalámbricos también se usa la radiación electromagnética en la región de microondas. La longitud de las ondas electromagnéticas usadas en las emisiones de radio y TV suele variar entre 1 y 1 000 m, en la **región de ondas de radio** del espectro.

En los estudios de transferencia de calor estamos interesados en la energía emitida por los cuerpos debido sólo a su temperatura. Por lo tanto, limitaremos nuestra consideración a la *radiación térmica*, a la cual llamaremos sencillamente *radiación*. Las relaciones que se desarrollan más adelante se restringen sólo a la radiación térmica y puede ser que no sean aplicables a otras formas de radiación electromagnética.

Los electrones, los átomos y las moléculas de todos los sólidos, líquidos y gases cuya temperatura está por encima del cero absoluto se encuentran en constante movimiento y, como consecuencia, constantemente emiten radiación

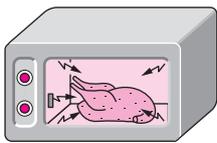


FIGURA 12-5

El alimento se calienta o cuece en un horno de microondas por la absorción de la energía de la radiación electromagnética generada por el magnetron del horno.

ción, la cual está siendo absorbida o transmitida en toda la extensión del volumen de la materia. Es decir, la radiación es un **fenómeno volumétrico**. Sin embargo, para los sólidos opacos (no transparentes), como los metales, la madera y las rocas, se considera que la radiación es un **fenómeno superficial**, ya que la emitida por las regiones interiores nunca puede llegar hasta la superficie y la que incide sobre esos cuerpos suele ser absorbida dentro de unas cuantas micras de la superficie (figura 12-6). Note que las características relativas a la radiación de las superficies se pueden cambiar por completo mediante la aplicación de capas delgadas de recubrimiento sobre ellas.

12-3 ■ RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

A una temperatura termodinámica (o absoluta) por encima de cero, un cuerpo emite radiación en todas direcciones en un amplio rango de longitudes de onda. La cantidad de energía de radiación emitida desde una superficie, a una longitud de onda dada, depende del material del cuerpo y de la condición de su superficie, así como de la temperatura de esta última. Por lo tanto, cuerpos diferentes pueden emitir cantidades diferentes de radiación por unidad de área de superficie, incluso cuando se encuentran a la misma temperatura. Por lo mismo, resulta natural sentir curiosidad acerca de la cantidad *máxima* de radiación que puede ser emitida por una superficie a una temperatura dada. La satisfacción de esta curiosidad requiere la definición de un cuerpo idealizado, conocido como *cuerpo negro*, que sirva como estándar con el cual se puedan comparar las propiedades de radiación de las superficies reales.

Un **cuerpo negro** se define como *un emisor y absorbedor perfecto de la radiación*. A una temperatura y una longitud de onda específica, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Un cuerpo negro absorbe *toda* la radiación incidente, sin importar la longitud de onda ni la radiación. Asimismo, emite energía de radiación de manera uniforme en todas direcciones, por unidad de área normal a la dirección de emisión (figura 12-7). Es decir, un cuerpo negro es un emisor *difuso*, lo que significa que es “independiente de la dirección”.

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial fue determinada de manera experimental por Joseph Stefan, en 1879, y la expresó como

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-3)$$

en donde $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la *constante de Stefan-Boltzmann* y T es la temperatura absoluta de la superficie en K. Esta relación fue verificada teóricamente, en 1884, por Ludwig Boltzmann. La ecuación 12.3 se conoce como **ley de Stefan-Boltzmann** y E_b se llama **poder de emisión de cuerpo negro**. Note que la emisión de la radiación térmica es proporcional a la *cuarta potencia* de la temperatura absoluta.

Aun cuando el ojo vería un cuerpo negro como *negro*, se debe establecer una distinción entre el cuerpo negro idealizado y una superficie negra común. Cualquier superficie que absorbe luz (la parte visible de la radiación), el ojo la ve negra, y una superficie que la refleja por completo la ve blanca. Considerando que la radiación visible ocupa una banda muy angosta del espectro, de 0.4 a 0.76 μm , no podemos expresar algún juicio acerca de la negrura de una superficie con base en observaciones visuales. Por ejemplo, la nieve y la pintura blanca reflejan la luz y, como consecuencia, se ven blancas. Pero, en esencia, son negras para la radiación infrarroja, ya que absorben con intensidad la radiación de longitud de onda larga. Las superficies recubiertas con pintura de negro de humo tienden al comportamiento del cuerpo negro idealizado.

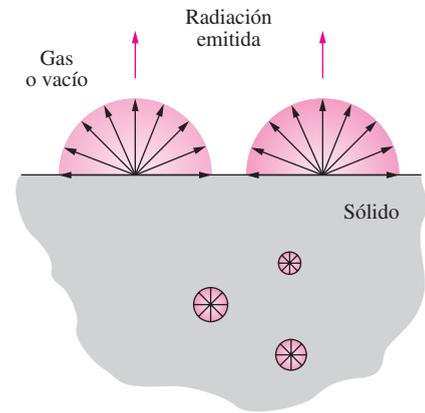


FIGURA 12-6

La radiación en los sólidos opacos se considera un fenómeno superficial, ya que sólo la radiación emitida por las moléculas que se hallan en la superficie puede escapar del sólido.

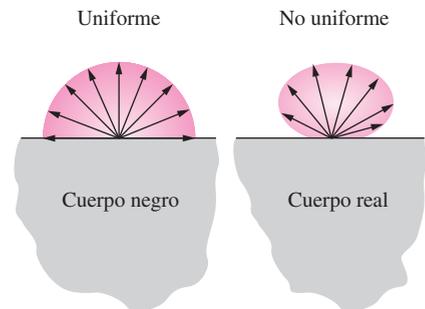


FIGURA 12-7

Se dice que un cuerpo negro es un emisor *difuso* ya que difunde energía de radiación de manera uniforme en todas direcciones.



FIGURA 12-8

Una gran cavidad isotérmica a la temperatura T con una pequeña abertura de área A tiene una gran semejanza con un cuerpo negro de área superficial A a la misma temperatura.

Otro tipo de cuerpo que se asemeja mucho a un cuerpo negro es una *gran cavidad con una pequeña abertura*, como se muestra en la figura 12-8. La radiación que entra a través de la abertura de área A pasa por múltiples reflexiones y, de este modo, tendrá varias posibilidades de ser absorbida por las superficies interiores de la cavidad antes de que alguna parte de ella tenga la posibilidad de escapar. También, si la superficie de la cavidad es isotérmica a la temperatura T , la radiación emitida por las superficies interiores brotará por la abertura después de pasar por múltiples reflexiones y, por consiguiente, su naturaleza es difusa. Por lo tanto, la cavidad actuará como un absorbedor y emisor perfecto, y la abertura tendrá la apariencia de un cuerpo negro de área superficial A , a la temperatura T , sin importar sus propiedades reales relativas a la radiación.

La ley de Stefan-Boltzmann de la ecuación 12-3 da el poder *total* de emisión de cuerpo negro E_b , el cual es la suma de la radiación emitida sobre todas las longitudes de onda. A veces necesitamos conocer el **poder de emisión espectral de cuerpo negro**, el cual es *la cantidad de energía de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta T por unidad de tiempo, por unidad de área superficial y por unidad de longitud de onda en torno a la longitud de onda λ* . Por ejemplo, estamos más interesados en la cantidad de radiación que emite un foco incandescente en el espectro visible de longitudes de onda que en la cantidad total emitida.

La relación para el poder de emisión espectral de cuerpo negro $E_{b\lambda}$ fue desarrollada por Max Planck en 1901, en conjunción con su famosa teoría cuántica. Esta relación se conoce como **ley de Planck** y se expresa como

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}) \quad (12-4)$$

en donde

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.74177 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = hc_0/k = 1.43878 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Asimismo, T es la temperatura absoluta de la superficie, λ es la longitud de onda de la radiación emitida y $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la *constante de Boltzmann*. Esta radiación es válida para una superficie en el *vacío* o un *gas*. Para otros medios es necesario modificarla reemplazando C_1 por C_1/n^2 , en donde n es el índice de refracción del medio. Note que el término *espectral* indica la dependencia con respecto a la longitud de onda.

En la figura 12-9 se representa la variación del poder de emisión espectral de cuerpo negro con la longitud de onda para temperaturas seleccionadas. Con base en esta figura, se pueden hacer varias observaciones:

1. La radiación emitida es una función continua de la *longitud de onda*. A cualquier temperatura específica se incrementa con la longitud de onda, llega a un pico y, a continuación, decrece al crecer la longitud de onda.
2. A cualquier longitud de onda la cantidad de radiación emitida *se incrementa* al aumentar la temperatura.
3. Conforme aumenta la temperatura las curvas se desplazan a la izquierda, hacia la región de las longitudes de onda más cortas. Como consecuencia, una fracción más grande de la radiación se emite a las *longitudes de onda más cortas*, a las temperaturas más elevadas.
4. La radiación emitida por el Sol, el cual se considera un cuerpo negro a 5 780 K (o, en números redondos, a 5 800 K), alcanza su pico en la región visible del espectro. Por lo tanto, el Sol se encuentra en sintonía casi con nuestros ojos. Por otra parte, las superficies a $T \leq 800 \text{ K}$ emiten casi

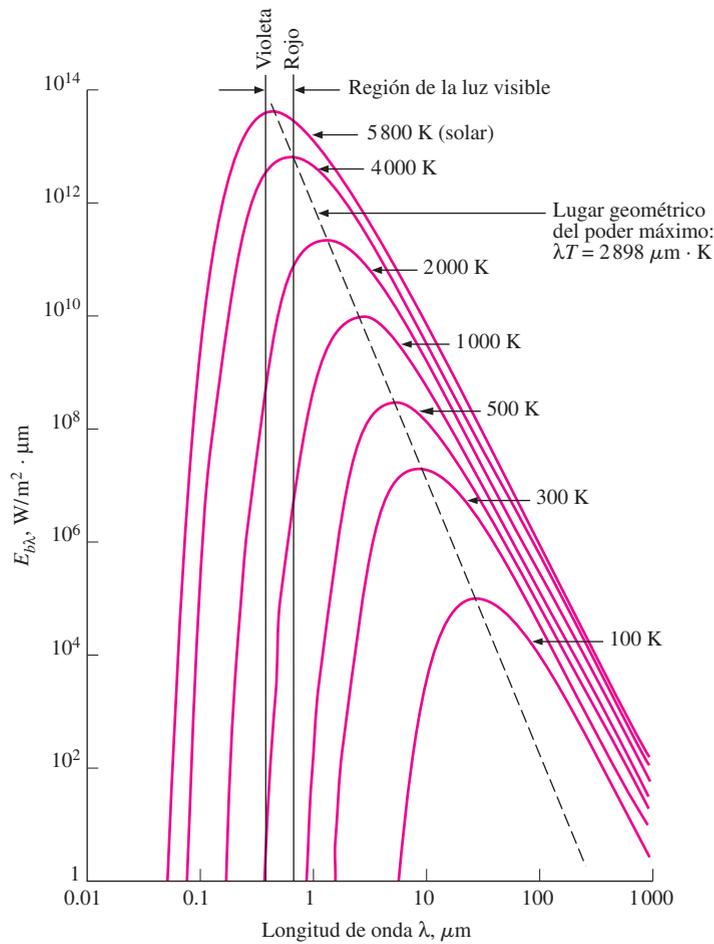


FIGURA 12-9
Variación del poder de emisión de cuerpo negro con la longitud de onda para varias temperaturas.

por completo en la región infrarroja y, por tanto, no son visibles al ojo, a menos que reflejen luz que provenga de otras fuentes.

A medida que la temperatura aumenta, el pico de la curva de la figura 12-9 se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas. La longitud de onda a la cual se presenta el pico para una temperatura específica se expresa por la **ley del desplazamiento de Wien** como

$$(\lambda T)_{\text{poder máx}} = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (12-5)$$

Willy Wien desarrolló originalmente esta relación en 1894 aplicando la termodinámica clásica, pero también se puede obtener derivando la ecuación 12-4 con respecto a λ , manteniendo T constante e igualando el resultado a cero. En la figura 12-9 también se da una gráfica de la ley del desplazamiento de Wien, la cual es el lugar geométrico de los picos de las curvas de emisión de radiación.

Por ejemplo, el pico de la radiación solar se tiene en $\lambda = 2897.8/5780 = 0.50 \mu\text{m}$, el cual se encuentra cerca de la mitad del rango visible. El pico de la radiación emitida por una superficie a la temperatura ambiente ($T = 298 \text{ K}$) se tiene en $9.72 \mu\text{m}$, que se encuentra bien dentro de la región infrarroja del espectro.

Un calentador de resistencia eléctrica empieza a irradiar calor poco después de que se conecta y podemos sentir la radiación emitida al poner nuestras manos contra el mismo. Pero esta radiación se halla por completo en la región infrarroja y, por consiguiente, no puede ser detectada por nuestros ojos.

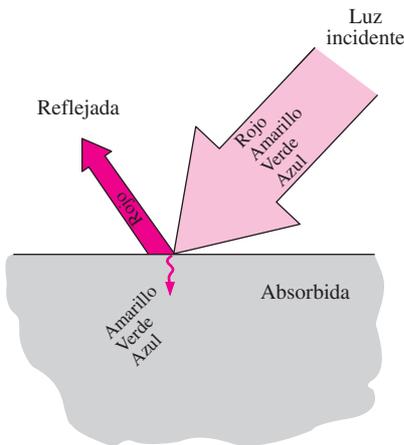


FIGURA 12-10

Una superficie que refleja el rojo mientras absorbe las partes restantes de la luz incidente el ojo la verá roja.

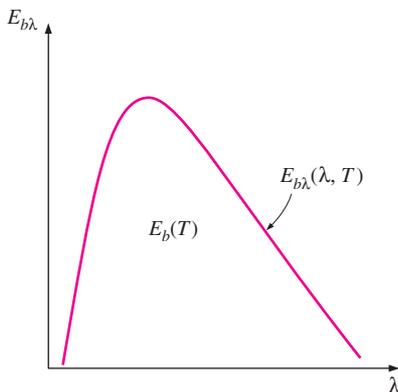


FIGURA 12-11

En un diagrama $E_{b\lambda}-\lambda$, el área bajo la curva para una temperatura dada representa la energía total de radiación emitida por un cuerpo negro a esa temperatura.

El calentador se ve rojo opaco cuando su temperatura alcanza alrededor de 1000 K ya que empieza a emitir una cantidad detectable (alrededor de $1 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$) de radiación roja visible a esa temperatura. A medida que la temperatura se incrementa más, el calentador se ve rojo brillante y se dice que está *caliente al rojo*. Cuando la temperatura llega hasta alrededor de 1500 K, el calentador emite suficiente radiación en el rango visible completo del espectro como para que el ojo lo vea casi *blanco* y se dice que está *caliente al blanco*.

Aun cuando no puede ser detectada directamente por el ojo humano la radiación infrarroja puede ser detectada por las cámaras infrarrojas, las cuales transmiten la información a microprocesadores para presentar imágenes de los objetos en la noche. Las *serpientes de cascabel* pueden detectar la radiación infrarroja o el “calor del cuerpo” que emiten los animales de sangre caliente y, de este modo, pueden ver en la noche sin usar instrumentos. De manera análoga las abejas son sensibles a la radiación ultravioleta. Una superficie que refleja toda la luz se ve *blanca*, en tanto que una que absorbe toda la luz incidente sobre ella se ve *negra*. (¿Entonces cómo es que vemos una superficie negra?)

Con base en esta discusión debe quedar claro que el color de un objeto no se debe a la emisión, la cual se encuentra principalmente en la región infrarroja, a menos que la temperatura superficial del objeto sobrepase los 1000 K. En lugar de ello el color de una superficie depende de sus características de absorción y de reflexión selectivas de la radiación visible incidente que provenga de una fuente luminosa, como el Sol o un foco incandescente. Una pieza de ropa que contenga un pigmento que refleje el rojo, al mismo tiempo que absorbe las partes restantes de la luz incidente, el ojo la ve “roja” (figura 12-10). Las hojas de las plantas se ven “verdes” porque sus células contienen el pigmento clorofila, el cual refleja con intensidad el verde mientras absorbe los demás colores.

Se deja como un ejercicio demostrar que la integración del poder de emisión *espectral* de cuerpo negro $E_{b\lambda}$ sobre todo el espectro de longitudes de onda da el poder *total* de emisión de cuerpo negro E_b :

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-6)$$

Por tanto, obtuvimos la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 12-3) mediante la integración de la ley de Planck (ecuación 12-4) sobre todas las longitudes de onda. Nótese que en un diagrama $E_{b\lambda}-\lambda$, $E_{b\lambda}$ corresponde al área bajo toda la curva para una temperatura específica (figura 12-11). Asimismo, el término *total* significa “integrado sobre todas las longitudes de onda”.

EJEMPLO 12-1 Emisión de radiación de una esfera negra

Considere una pieza esférica de 20 cm de diámetro a 800 K, suspendida en el aire como se muestra en la figura 12-12. Suponiendo que la esfera se aproxima mucho a un cuerpo negro, determine a) el poder total de emisión de cuerpo negro, b) la cantidad total de radiación emitida por la bola en 5 min y c) el poder de emisión espectral de cuerpo negro a la longitud de onda de $3 \mu\text{m}$.

SOLUCIÓN Una esfera isotérmica está suspendida en el aire. Se deben determinar el poder total de emisión de cuerpo negro, la radiación total emitida en 5 minutos y el poder de emisión espectral de cuerpo negro a $3 \mu\text{m}$.

Suposición La esfera se comporta como un cuerpo negro.

Análisis a) El poder total de emisión de cuerpo negro se determina a partir de la ley de Stefan-Boltzmann como

$$E_b = \sigma T^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(800 \text{ K})^4 = \mathbf{23.2 \text{ kW/m}^2}$$

Es decir, la esfera emite 23.2 kJ de energía en la forma de radiación electromagnética por segundo por m² de área superficial de la esfera.

b) La cantidad total de energía de radiación emitida desde toda la bola en 5 min se determina al multiplicar el poder de emisión de cuerpo negro que acaba de obtenerse por el área superficial total de la esfera y el intervalo de tiempo dado:

$$\begin{aligned} A_s &= \pi D^2 = \pi(0.2 \text{ m})^2 = 0.1257 \text{ m}^2 \\ \Delta t &= (5 \text{ min})\left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right) = 300 \text{ s} \\ Q_{\text{rad}} &= E_b A_s \Delta t = (23.2 \text{ kW/m}^2)(0.1257 \text{ m}^2)(300 \text{ s})\left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} \cdot \text{s}}\right) \\ &= \mathbf{875 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

Es decir, la esfera pierde, en 5 min, 875 kJ de su energía interna, en la forma de ondas electromagnéticas, hacia los alrededores, lo cual es energía suficiente como para calentar 20 kg de agua desde 0°C hasta 100°C. Nótese que la temperatura de la superficie de la esfera no puede permanecer constante a 800 K, a menos que haya una cantidad igual de flujo de energía hacia la superficie proveniente de los alrededores o de las regiones interiores de la propia esfera a través de algunos mecanismos como reacciones químicas o nucleares.

c) El poder de emisión espectral de cuerpo negro a una longitud de onda de 3 μm se determina basándose en la ley de distribución de Planck como

$$\begin{aligned} E_{b\lambda} &= \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} = \frac{3.74177 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2}{(3 \mu\text{m})^5 \left[\exp\left(\frac{1.43878 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{(3 \mu\text{m})(800 \text{ K})}\right) - 1 \right]} \\ &= \mathbf{3846 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}} \end{aligned}$$

La ley de Stefan-Boltzmann $E_b(T) = \sigma T^4$ da la radiación *total* emitida por un cuerpo negro en todas las longitudes de onda, desde $\lambda = 0$ hasta $\lambda = \infty$. Pero a menudo estamos interesados en la cantidad de radiación emitida sobre *alguna banda de longitudes de onda*. Por ejemplo, un foco incandescente se juzga con base en la radiación que emite en el rango visible, más que en la radiación que emite en todas las longitudes de onda.

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de área sobre una banda de longitudes de onda, desde $\lambda = 0$ hasta λ se determina con base en (figura 12-13)

$$E_{b,0-\lambda}(T) = \int_0^\lambda E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-7)$$

Parece como que podemos determinar $E_{b,0-\lambda}$ sustituyendo la relación para $E_{b\lambda}$ dada en la ecuación 12-4 y resolviendo la integral. Pero resulta que ésta no tiene una solución sencilla de forma cerrada y efectuar una integración numérica cada vez que necesitamos un valor de $E_{b,0-\lambda}$ no resulta práctico. Por lo tanto, definimos una cantidad adimensional f_λ , llamada **función de radiación de cuerpo negro**, como

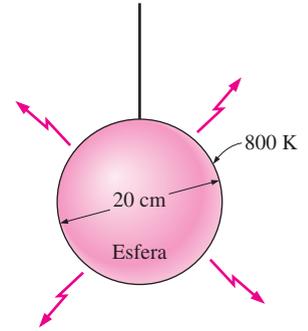


FIGURA 12-12
Esfera considerada en el ejemplo 12-1.

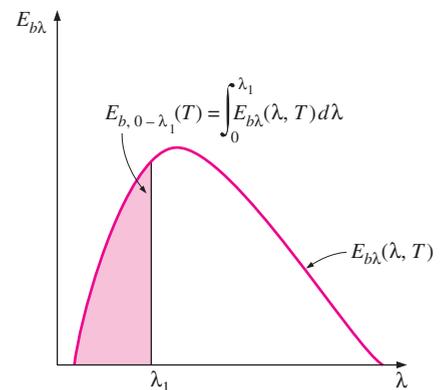


FIGURA 12-13
En un diagrama $E_{b\lambda}-\lambda$, el área bajo la curva a la izquierda de la recta $\lambda = \lambda_1$ representa la energía de radiación emitida por un cuerpo negro en el rango de longitudes de onda $0-\lambda_1$ para la temperatura dada.

TABLA 12-2

Funciones f_λ de radiación de cuerpo negro

$\lambda T,$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$	f_λ	$\lambda T,$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$	f_λ
200	0.000000	6 200	0.754140
400	0.000000	6 400	0.769234
600	0.000000	6 600	0.783199
800	0.000016	6 800	0.796129
1 000	0.000321	7 000	0.808109
1 200	0.002134	7 200	0.819217
1 400	0.007790	7 400	0.829527
1 600	0.019718	7 600	0.839102
1 800	0.039341	7 800	0.848005
2 000	0.066728	8 000	0.856288
2 200	0.100888	8 500	0.874608
3 400	0.140256	9 000	0.890029
3 600	0.183120	9 500	0.903085
3 800	0.227897	10 000	0.914199
3 000	0.273232	10 500	0.923710
3 200	0.318102	11 000	0.931890
3 400	0.361735	11 500	0.939959
3 600	0.403607	12 000	0.945098
3 800	0.443382	13 000	0.955139
4 000	0.480877	14 000	0.962898
4 200	0.516014	15 000	0.969981
4 400	0.548796	16 000	0.973814
4 600	0.579280	18 000	0.980860
4 800	0.607559	20 000	0.985602
5 000	0.633747	25 000	0.992215
5 200	0.658970	30 000	0.995340
5 400	0.680360	40 000	0.997967
5 600	0.701046	50 000	0.998953
5 800	0.720158	75 000	0.999713
6 000	0.737818	100 000	0.999905

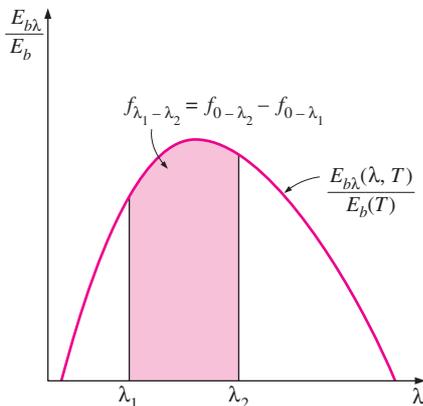


FIGURA 12-14

Representación gráfica de la fracción de radiación emitida en la banda de longitudes de onda de λ_1 hasta λ_2 .

$$f_\lambda(T) = \frac{\int_0^\lambda E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (12-8)$$

La función f_λ representa la fracción de radiación emitida desde un cuerpo negro a la temperatura T , en la banda de longitudes de onda de $\lambda = 0$ hasta λ . En la tabla 12-2 se dan los valores de f_λ como función de λT , en donde λ se da en μm y T , en K.

La fracción de energía de radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura T sobre una banda finita de longitudes de onda, desde $\lambda = \lambda_1$ hasta $\lambda = \lambda_2$, se determina a partir de (figura 12-14)

$$f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) = f_{\lambda_2}(T) - f_{\lambda_1}(T) \quad (12-9)$$

en donde $f_{\lambda_1}(T)$ y $f_{\lambda_2}(T)$ son las funciones de radiación de cuerpo negro correspondientes a $\lambda_1 T$ y $\lambda_2 T$, respectivamente.

EJEMPLO 12-2 Emisión de radiación de un foco eléctrico

La temperatura del filamento de un foco incandescente es de 2 500 K. Suponiendo que el filamento sea un cuerpo negro, determine la fracción de la energía radiante emitida por él que cae en el rango visible. Asimismo, determine la longitud de onda a la cual la emisión de la radiación del filamento alcanza el valor pico.

SOLUCIÓN Se da la temperatura del filamento de un foco incandescente. Deben determinarse la fracción de radiación visible emitida por el filamento y la longitud de onda a la cual alcanza el valor pico.

Suposición El filamento se comporta como un cuerpo negro.

Análisis El intervalo visible del espectro electromagnético se extiende desde $\lambda_1 = 0.4 \mu\text{m}$ hasta $\lambda_2 = 0.76 \mu\text{m}$. Dado que $T = 2\,500 \text{ K}$, a partir de la tabla 12-2 se determina que las funciones de radiación correspondientes a $\lambda_1 T$ y $\lambda_2 T$ son

$$\lambda_1 T = (0.40 \mu\text{m})(2\,500 \text{ K}) = 1\,000 \mu\text{m} \cdot \text{K} \longrightarrow f_{\lambda_1} = 0.000321$$

$$\lambda_2 T = (0.76 \mu\text{m})(2\,500 \text{ K}) = 1\,900 \mu\text{m} \cdot \text{K} \longrightarrow f_{\lambda_2} = 0.053035$$

Es decir, 0.03% de la radiación se emite en longitudes de onda menores que $0.4 \mu\text{m}$ y 5.3% en longitudes de onda menores que $0.76 \mu\text{m}$. Entonces, la fracción de la radiación emitida entre estas dos longitudes de onda es (figura 12-15)

$$f_{\lambda_1-\lambda_2} = f_{\lambda_2} - f_{\lambda_1} = 0.053035 - 0.000321 = \mathbf{0.052714}$$

Por lo tanto, sólo alrededor de 5% de la radiación emitida por el filamento del foco cae en el rango visible. El 95% restante aparece en la región infrarroja en la forma de calor radiante o “luz invisible”, como es usual llamarla. Es evidente que no es una manera muy eficiente de convertir la energía eléctrica en luz y explica por qué los tubos fluorescentes constituyen una selección más sabia para el alumbrado.

La longitud de onda a la cual la emisión de la radiación del filamento alcanza un valor pico se determina con facilidad basándose en la ley del desplazamiento de Wien como

$$(\lambda T)_{\text{poder máx}} = 2\,897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \rightarrow \lambda_{\text{poder máx}} = \frac{2\,897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{2\,500 \text{ K}} = \mathbf{1.16 \mu\text{m}}$$

Discusión Note que la radiación emitida desde el filamento alcanza un valor pico en la región infrarroja.

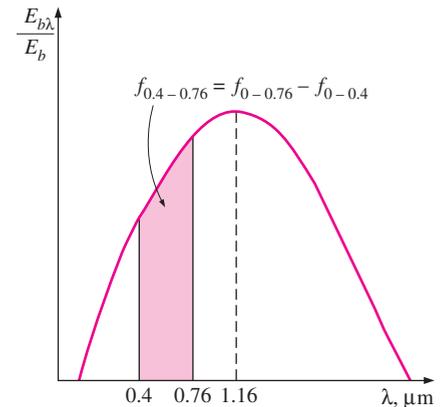


FIGURA 12-15

Representación gráfica de la fracción de radiación emitida en el rango visible en el ejemplo 12-2.

12-4 ■ INTENSIDAD DE RADIACIÓN

La radiación es emitida por todas las partes de una superficie plana en todas direcciones hacia el hemisferio que está arriba de ésta, y la distribución direccional de la radiación emitida (o incidente) suele no ser uniforme. Por lo tanto, necesitamos una cantidad que describa la magnitud de la radiación emitida (o incidente) en una dirección específica en el espacio. Esta cantidad es la *intensidad de radiación*, denotada por I . Antes de que podamos describir una cantidad direccional necesitamos especificar la dirección en el espacio. La mejor manera de describir la dirección de la radiación que pasa por un punto es en coordenadas esféricas, en términos del ángulo cenital θ y el ángulo azi-

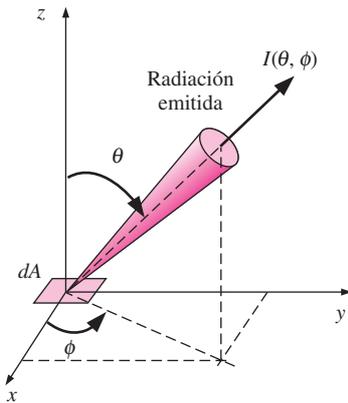


FIGURA 12-16

Se usa la intensidad de radiación para describir la variación de la energía de radiación con respecto a la dirección.

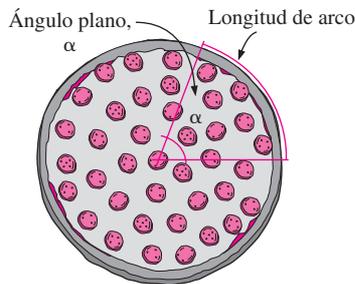
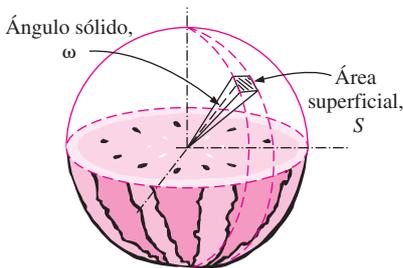
Una rebanada de pizza de ángulo plano α Una rebanada de sandía de ángulo sólido ω

FIGURA 12-17

Descripción del tamaño de una rebanada de pizza por medio de un ángulo plano y del tamaño de una rebanada de sandía por medio de un ángulo sólido.

mutal ϕ , como se muestra en la figura 12-16. Se usa la intensidad de radiación para describir de qué manera la radiación emitida varía con los ángulos cenital y azimutal.

Si todas las superficies emitieran radiación de manera uniforme en todas direcciones, el *poder de emisión* sería suficiente para cuantificar la radiación y no sería necesario tratar con la intensidad. La radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de área normal es la misma en todas direcciones y, por consiguiente, no existe dependencia direccional. Pero este no es el caso para las superficies reales. Antes de que definamos intensidad necesitamos cuantificar el tamaño de una abertura en el espacio

Ángulo sólido

Tratemos de cuantificar el tamaño de una rebanada de pizza. Una manera de hacerlo es especificar la longitud de arco del borde exterior de la rebanada y formarla conectando los puntos extremos del arco con el centro. Un procedimiento más general es especificar el ángulo de la rebanada en el centro, como se muestra en la figura 12-17. Por ejemplo, un ángulo de 90° (o $\pi/2$ radianes) siempre representa una cuarta parte de la pizza, sin importar cuál sea el radio. Para un círculo de radio unitario, la longitud de un arco es equivalente en magnitud al *ángulo plano* que subtende (ambos son 2π para un círculo completo de radio $r = 1$).

Considere ahora una sandía e intentemos cuantificar el tamaño de una rebanada. Una vez más podemos hacerlo especificando el área superficial exterior de la rebanada (la parte verde), o bien, trabajando con ángulos en beneficio de la generalidad. En este caso, si se conectan todos los puntos en los bordes de la rebanada con el centro formarán un cuerpo tridimensional (como un cono cuya punta está en el centro) y, como consecuencia, el ángulo en el centro se le llama con propiedad **ángulo sólido**. El ángulo sólido se denota por ω y su unidad es el estereorradián (sr). En analogía con el ángulo plano, podemos decir que *el área de una superficie sobre una esfera de radio unitario es equivalente en magnitud al ángulo sólido que subtende* (ambos son 4π para una esfera de radio $r = 1$).

Esto se puede demostrar con facilidad al considerar un área superficial diferencial sobre una esfera, $dS = r^2 \sin \theta d\theta d\phi$, como se muestra en la figura 12-18, e integrándola desde $\theta = 0$ hasta $\theta = \pi$, y desde $\phi = 0$ hasta $\phi = 2\pi$; obtenemos

$$S = \int_{\text{esfera}} dS = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} r^2 \sin \theta d\theta d\phi = 2\pi r^2 \int_{\theta=0}^{\pi} \sin \theta d\theta = 4\pi r^2 \quad (12-10)$$

la cual es la fórmula para el área de una esfera. Para $r = 1$ se reduce a $S = 4\pi$ y, por consiguiente, el ángulo sólido asociado con una esfera es $\omega = 4\pi$ sr. Para un hemisferio, el cual es más pertinente para la radiación emitida o recibida por una superficie, es $\omega = 2\pi$ sr.

El ángulo sólido diferencial $d\omega$ subtendido por un área diferencial dS sobre una esfera de radio r se puede expresar como

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (12-11)$$

Note que el área dS es perpendicular o normal a la dirección de la visión, puesto que dS se ve desde el centro de la esfera. En general, el ángulo sólido diferencial $d\omega$ subtendido por un área superficial diferencial dA cuando se ve desde un punto a una distancia r de dA se expresa como

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} = \frac{dA \cos \alpha}{r^2} \quad (12-12)$$

en donde α es el ángulo entre la normal de la superficie y la dirección de visión y, por tanto, $dA_n = dA \cos \alpha$ es el área normal (o proyectada) a la dirección de visión.

Las superficies pequeñas vistas desde distancias más o menos grandes se pueden tratar aproximadamente como áreas diferenciales en los cálculos de ángulos sólidos. Por ejemplo, el ángulo sólido subtendido por una superficie plana de 5 cm^2 cuando se ve desde un punto O a una distancia de 80 cm a lo largo de la normal a esa superficie es

$$\omega \cong \frac{A_n}{r^2} = \frac{5 \text{ cm}^2}{(80 \text{ cm})^2} = 7.81 \times 10^{-4} \text{ sr}$$

Si se inclina la superficie de modo que la normal a ella forme un ángulo de $\alpha = 60^\circ$ con la recta que conecta el punto de visión y el centro de la superficie, el área proyectada sería $dA_n = dA \cos \alpha = (5 \text{ cm}^2) \cos 60^\circ = 2.5 \text{ cm}^2$ y, en este caso, el ángulo sólido representaría la mitad del valor que acaba de determinarse.

Intensidad de la radiación emitida

Considere la emisión de radiación por un elemento diferencial de área dA de una superficie, como se muestra en la figura 12-18. La radiación es emitida en todas direcciones hacia el espacio hemisférico y la que emana a través del área superficial dS es proporcional al ángulo sólido $d\omega$ subtendido por dS . También es proporcional al área radiante dA según la ve un observador sobre dS , la cual varía desde un máximo de dA , cuando dS está directamente arriba de dA ($\theta = 0^\circ$), hasta un mínimo de cero, cuando dS está en el fondo ($\theta = 90^\circ$). Por lo tanto, el área efectiva de dA para la emisión en la dirección de θ es la proyección de dA sobre un plano normal a θ , la cual es $dA \cos \theta$. La intensidad de radiación en una dirección dada se basa en un área unitaria normal a dicha dirección, con el fin de proporcionar una base común para la comparación de la radiación emitida en diferentes direcciones.

La **intensidad de radiación** $I_e(\theta, \phi)$ se define como la razón a la cual la energía de radiación $d\dot{Q}_e$ se emite en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área normal a dicha dirección y por unidad de ángulo sólido en torno a esta misma dirección; es decir,

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta \cdot d\omega} = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}) \quad (12-13)$$

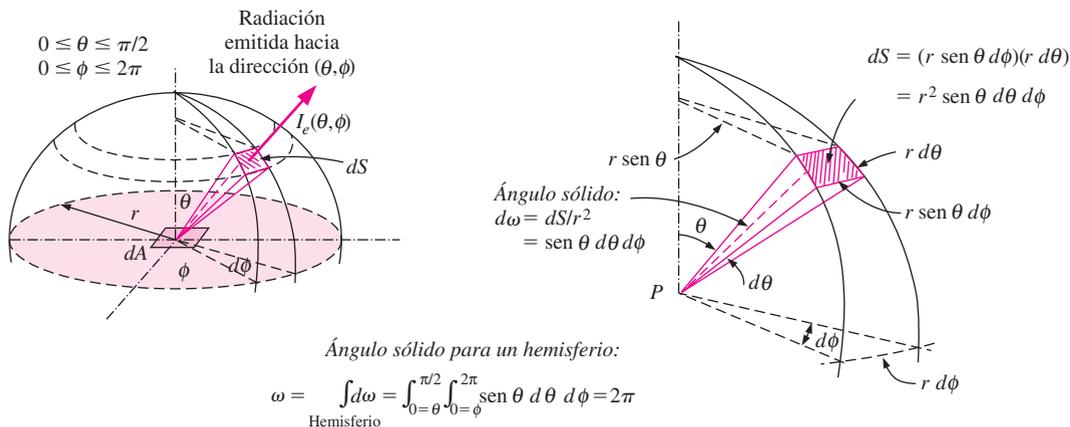


FIGURA 12-18
Emisión de radiación desde un elemento diferencial de superficie hacia el espacio hemisférico circundante a través de un ángulo sólido diferencial.

El *flujo de radiación* es el **poder de emisión** E (la razón a la cual se emite la energía de radiación por unidad de área de la superficie emisora), el cual se puede expresar en la forma diferencial como

$$dE = \frac{d\dot{Q}_e}{dA} = I_e(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (12-14)$$

Dado que el hemisferio que está arriba de la superficie intercepta todos los rayos de radiación emitidos por ésta, el poder de emisión hacia el hemisferio que la rodea se puede determinar por integración como

$$E = \int_{\text{hemisferio}} dE = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-15)$$

En general, la intensidad de radiación emitida por una superficie varía con la dirección (en especial con el ángulo cenital θ). Pero en la práctica muchas superficies se pueden considerar como si fueran difusas. Para una superficie *difusamente emisora*, la intensidad de la radiación emitida es independiente de la dirección y, por consiguiente, $I_e = \text{constante}$. Puesto que $\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi = \pi$, en este caso la relación del poder de emisión de la ecuación 12-15 se reduce a

$$\text{Superficie difusamente emisora:} \quad E = \pi I_e \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-16)$$

Note que el factor en la ecuación 12-16 es π . El lector podría haber esperado que fuera 2π , ya que la intensidad es la energía de radiación por unidad de ángulo sólido, y el ángulo sólido asociado con un hemisferio es 2π . La razón para que el factor sea π es que el poder de emisión se basa en el área superficial *real*, en tanto que la intensidad se basa en el área *proyectada* (y, por consiguiente, en el factor $\cos \theta$ que la acompaña), como se muestra en la figura 12-19.

Para un *cuerpo negro*, el cual es un emisor difuso, la ecuación 12-16 se puede expresar como

$$\text{Cuerpo negro:} \quad E_b = \pi I_b \quad (12-17)$$

en donde $E_b = \sigma T^4$ es el poder de emisión de cuerpo negro. Por lo tanto, la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura absoluta T es

$$\text{Cuerpo negro:} \quad I_b(T) = \frac{E_b(T)}{\pi} = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}) \quad (12-18)$$

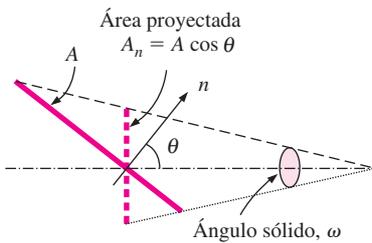


FIGURA 12-19

La intensidad de radiación se basa en el área proyectada y, por tanto, el cálculo de la emisión de radiación desde una superficie comprende la proyección de esta última.

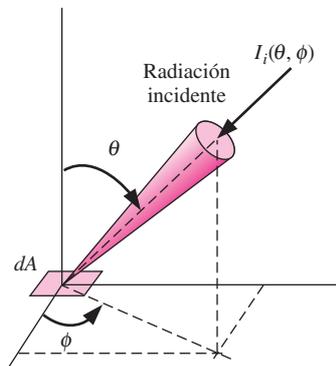


FIGURA 12-20

Radiación incidente sobre una superficie en la dirección (θ, ϕ) .

Radiación incidente

Todas las superficies emiten radiación, pero también reciben la emitida o reflejada por otras superficies. La intensidad de la radiación incidente, $I_i(\theta, \phi)$ se define como *la razón a la cual la energía de radiación dG incide desde la dirección (θ, ϕ) por unidad de área de la superficie receptora normal a esta dirección y por unidad de ángulo sólido alrededor de esta última* (figura 12-20). Aquí, θ es el ángulo entre la dirección de la radiación incidente y la normal a la superficie.

El flujo de radiación incidente sobre una superficie desde *todas direcciones* se llama **irradiación** G y se expresa como

$$G = \int_{\text{hemisferio}} dG = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_i(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-19)$$

Por lo tanto, la irradiación representa la razón a la cual la energía de radiación incide sobre una superficie por unidad de área de esta última. Cuando la radiación incidente es difusa y, por tanto, $I_i = \text{constante}$, la ecuación 12-19 se reduce a

$$\text{Radiación difusamente incidente:} \quad G = \pi I_i \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-20)$$

Una vez más, note que la irradiación se basa en el área superficial *real* (y, como consecuencia, en el factor $\cos \theta$), en tanto que la intensidad de la radiación incidente se basa en el área *proyectada*.

Radiosidad

Las superficies emiten radiación y la reflejan, por tanto, la radiación que sale de una superficie consta de componentes emitidas y reflejadas, como se muestra en la figura 12-21. El cálculo de la transferencia de calor por radiación entre superficies comprende la energía *total* de radiación que emana de una superficie, sin importar su origen. Por tanto, necesitamos definir una cantidad que represente *la razón a la cual la energía de radiación sale de una unidad de área de una superficie en todas direcciones*. Esta cantidad se llama la **radiosidad J** y se expresa como

$$J = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{e+r}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-21)$$

en donde I_{e+r} es la suma de las intensidades emitida y reflejada. Para una superficie que es tanto un emisor difuso como un reflector difuso, $I_{e+r} = \text{constante}$ y la relación de radiosidad se reduce a

$$\text{Emisor y reflector difuso:} \quad J = \pi I_{e+r} \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-22)$$

Para un cuerpo negro la radiosidad J es equivalente al poder de emisión E_b , ya que un cuerpo de este tipo absorbe toda la radiación incidente sobre él y no hay componente reflejada en la radiosidad.

Cantidades espectrales

Hasta ahora consideramos cantidades *totales* de radiación (cantidades integradas sobre todas las longitudes de onda) y no hicimos referencia a la dependencia con respecto a la longitud de onda. Este enfoque concentrado resulta adecuado para muchos problemas de radiación que se encuentran en la práctica. Pero a veces es necesario considerar la variación de la radiación con la longitud de onda así como con la dirección y expresar las cantidades en una cierta longitud de onda λ o por intervalo unitario de longitud de onda con respecto a λ . Esas cantidades se mencionan como cantidades *espectrales* para atraer la atención hacia su dependencia con respecto a la longitud de onda. Se usa el modificador “espectral” para indicar “a una longitud de onda dada”.

Por ejemplo, la *intensidad espectral de radiación*, $I_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$, es sencillamente la intensidad total de radiación $I(\theta, \phi)$ por intervalo unitario de longitud de onda en torno a λ . La **intensidad espectral** para la radiación emitida $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi)$ se puede definir como *la razón a la cual la energía de radiación $d\dot{Q}_e$ es emitida a la longitud de onda λ en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área normal a esta dirección, por unidad de ángulo sólido en torno a esta última*, y se puede expresar como

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}) \quad (12-23)$$

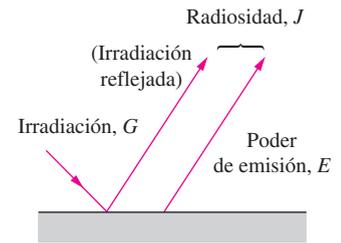


FIGURA 12-21
Las tres clases de flujo de radiación (en W/m^2): poder de emisión, irradiación y radiosidad.

Entonces el *poder de emisión espectral* queda

$$E_\lambda = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-24)$$

Se pueden obtener relaciones similares para la irradiación espectral G_λ y la radiosidad espectral J_λ , reemplazando $I_{\lambda,e}$ en esta ecuación por $I_{\lambda,i}$ y $I_{\lambda,e+r}$, respectivamente

Cuando se conoce la variación de la intensidad de radiación espectral I_λ y la longitud de onda λ se puede determinar la intensidad total de radiación I para la radiación emitida, la incidente y la incidente más la reflejada, por integración sobre todo el espectro de longitudes de onda como (figura 12-22)

$$I_e = \int_0^\infty I_{\lambda,e} \, d\lambda, \quad I_i = \int_0^\infty I_{\lambda,i} \, d\lambda, \quad \text{y} \quad I_{e+r} = \int_0^\infty I_{\lambda,e+r} \, d\lambda \quad (12-25)$$

Entonces se pueden usar estas intensidades en las ecuaciones 12-15, 12-19 y 12-21, con el fin de determinar el poder de emisión, E , la irradiación G y la radiosidad J , respectivamente.

De manera análoga, cuando se conocen las variaciones de los flujos de radiación espectral, E_λ , G_λ y J_λ con la longitud de onda λ se pueden determinar los flujos totales de radiación por integración sobre todo el espectro de longitudes de onda mediante

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda, \quad G = \int_0^\infty G_\lambda \, d\lambda, \quad \text{y} \quad J = \int_0^\infty J_\lambda \, d\lambda \quad (12-26)$$

Cuando las superficies y la radiación incidente son *difusas*, los flujos de radiación espectrales están relacionados con las intensidades espectrales por

$$E_\lambda = \pi I_{\lambda,e}, \quad G_\lambda = \pi I_{\lambda,i}, \quad \text{y} \quad J_\lambda = \pi I_{\lambda,e+r} \quad (12-27)$$

Note que las relaciones para las cantidades de radiación espectrales y totales tienen la misma forma.

La intensidad espectral de la radiación emitida por un cuerpo negro que está a una temperatura absoluta T , a una longitud de onda λ ha sido determinada por Max Planck y se expresa como

$$I_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}) \quad (12-28)$$

en donde $h = 6.626069 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la constante de Planck, $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la constante de Boltzmann y $c_0 = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ es la velocidad de la luz en el vacío. Entonces, con base en la ecuación 12-27, el poder de emisión espectral de cuerpo negro es

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \pi I_{b\lambda}(\lambda, T) \quad (12-29)$$

Por medio de la ecuación 12-4 se da una relación simplificada para $E_{b\lambda}$.

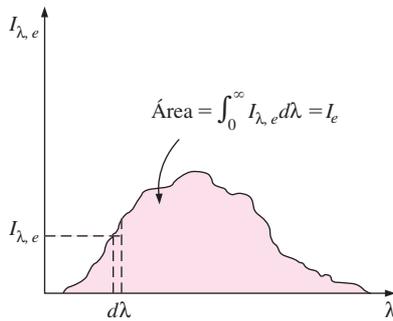


FIGURA 12-22

La integración de una cantidad “espectral” para todas las longitudes de onda da la cantidad “total”.

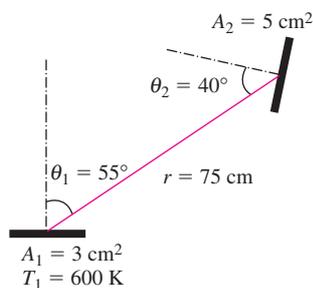


FIGURA 12-23

Esquema para el ejemplo 12-3.

EJEMPLO 12-3

Radiación incidente sobre una superficie pequeña

Una superficie pequeña de área $A_1 = 3 \text{ cm}^2$ emite radiación como un cuerpo negro a $T_1 = 600 \text{ K}$. La parte de la radiación emitida por A_1 choca contra otra superficie pequeña de área $A_2 = 5 \text{ cm}^2$, orientada como se muestra en la figura 12-23. Determine el ángulo sólido subtendido por A_2 cuando se ve desde A_1 y la razón con la cual la radiación emitida por esta última choca contra A_2 .

SOLUCIÓN Una superficie está sujeta a radiación emitida por otra superficie. Se deben determinar el ángulo sólido subtendido y la razón a la cual se recibe la radiación emitida.

Suposiciones **1** La superficie A_1 emite difusamente como un cuerpo negro. **2** Tanto A_1 como A_2 se pueden considerar superficies diferenciales, ya que son muy pequeñas en comparación con el cuadrado de la distancia entre ellas.

Análisis Haciendo la aproximación de A_1 y A_2 como superficies diferenciales, se puede determinar el ángulo sólido subtendido por A_2 cuando se ve desde A_1 , a partir de la ecuación 12-12, como

$$\omega_{2-1} \cong \frac{A_{n,2}}{r^2} = \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} = \frac{(5 \text{ cm}^2) \cos 40^\circ}{(75 \text{ cm})^2} = 6.81 \times 10^{-4} \text{ sr}$$

puesto que la normal de A_2 forma un ángulo de 40° con la dirección de visión. Note que el ángulo sólido subtendido por A_2 sería el máximo si la posición de ésta fuera normal a la dirección de visión. Asimismo, el punto de visión sobre A_2 se toma como un punto medio, pero puede ser cualquier otro ya que se supone que A_2 es muy pequeña.

La radiación emitida por A_1 que choca contra A_2 es equivalente a la radiación emitida por aquélla a través del ángulo sólido ω_{2-1} . La intensidad de la radiación emitida por A_1 es

$$I_1 = \frac{E_h(T_1)}{\pi} = \frac{\sigma T_1^4}{\pi} = \frac{(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(600 \text{ K})^4}{\pi} = 2339 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$$

Este valor de la intensidad es el mismo en todas direcciones, puesto que un cuerpo negro es un emisor difuso. La intensidad representa la razón de la emisión de radiación por unidad de área normal a la dirección de emisión, por unidad de ángulo sólido. Por lo tanto, la razón de la energía de radiación emitida por A_1 en la dirección de θ_1 a través del ángulo sólido ω_{2-1} , se determina al multiplicar I_1 por el área de A_1 normal a θ_1 y por el ángulo sólido ω_{2-1} ; es decir,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{1-2} &= I_1(A_1 \cos \theta_1)\omega_{2-1} \\ &= (2339 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr})(3 \times 10^{-4} \cos 55^\circ \text{ m}^2)(6.81 \times 10^{-4} \text{ sr}) \\ &= 2.74 \times 10^{-4} \text{ W} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la radiación emitida desde la superficie A_1 chocará contra la superficie A_2 a razón de 2.74×10^{-4} W.

Discusión La razón total de emisión de radiación desde la superficie A_1 es $\dot{Q}_e = A_1 \sigma T_1^4 = 2.204$ W. Por lo tanto, la fracción de la radiación emitida que choca contra A_2 es $2.74 \times 10^{-4}/2.204 = 0.00012$ (o sea, 0.012%). Puesto que el ángulo sólido asociado con un hemisferio es 2π , la fracción del ángulo sólido subtendido por A_2 es $6.81 \times 10^{-4}/(2\pi) = 0.000108$ (o sea, 0.0108%), lo cual es 0.9 veces la fracción de radiación emitida. Por lo tanto, la fracción del ángulo sólido que una superficie ocupa no representa la fracción de la energía de radiación que dicha superficie recibirá, incluso cuando la intensidad de la radiación emitida es constante. Esto se debe a que la energía de radiación emitida por una superficie en una dirección dada es proporcional al *área proyectada* de ella en esa dirección y se reduce desde un máximo en $\theta = 0^\circ$ (la dirección normal a la superficie) hasta cero en $\theta = 90^\circ$ (la dirección paralela a la superficie).

12-5 ■ PROPIEDADES DE RADIACIÓN

La mayor parte de los materiales que se encuentran en la práctica, como los metales, la madera y los ladrillos, son *opacos* a la radiación térmica, y se considera que la radiación es un *fenómeno superficial* para ese tipo de materiales.

Es decir, la radiación térmica es emitida o absorbida a menos de unas cuantas de las primeras micras de la superficie y, como consecuencia, hablamos de propiedades relativas a la radiación de las *superficies* para los materiales opacos.

Algunos otros materiales, como el vidrio y el agua, permiten que la radiación visible penetre hasta profundidades considerables, antes de que tenga lugar alguna absorción significativa. Es obvio que la radiación a través de ese tipo de materiales *semitransparentes* no puede considerarse un fenómeno superficial, puesto que todo el volumen del material interactúa con la radiación. Por otra parte, tanto el vidrio como el agua son prácticamente opacos a la radiación infrarroja. Por lo tanto, los materiales pueden exhibir un comportamiento diferente a longitudes de onda diferentes y la dependencia con respecto a la longitud de onda es una consideración importante en el estudio de las propiedades relativas a la radiación, como la emisividad, la absorptividad, la reflectividad y la transmisividad de esos materiales.

En la sección anterior definimos un *cuerpo negro* como un emisor y absorbedor perfecto de la radiación y se dice que ningún cuerpo puede emitir más radiación que un cuerpo negro a la misma temperatura. Por lo tanto, un cuerpo negro puede servir como una *referencia* conveniente en la descripción de las características de emisión y absorción de las superficies reales.

Emisividad

La **emisividad** de una superficie representa *la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura*. La emisividad de una superficie se denota por ε y varía entre 0 y 1, $0 \leq \varepsilon \leq 1$. La emisividad es una medida de cuán cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$.

La emisividad de una superficie real no es constante. Más bien, varía con la *temperatura* de la superficie, así como con la *longitud de onda* y la *dirección* de la radiación emitida. Por lo tanto, se pueden definir diferentes emisividades para una superficie dependiendo de los efectos considerados. La emisividad más elemental de una superficie a una temperatura dada es la **emisividad direccional espectral**, la cual se define como la razón entre la intensidad de la radiación emitida por la superficie a una longitud de onda específica, en una dirección específica, y la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, a la misma longitud de onda; esto es,

$$\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b\lambda}(\lambda, T)} \quad (12-30)$$

en donde se usan los subíndices λ y θ para designar las cantidades *espectrales* y *direccionales*, respectivamente. Note que la intensidad de radiación de cuerpo negro es independiente de la dirección y, por tanto, no tiene dependencia funcional con respecto a θ ni a ϕ .

La **emisividad direccional total** se define de manera semejante, usando intensidades totales (intensidades integradas sobre todas las longitudes de onda) como

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)} \quad (12-31)$$

En la práctica suele ser más conveniente trabajar con propiedades relativas a la radiación promediadas sobre todas las direcciones, llamadas *propiedades hemisféricas*. Puesto que el *poder de emisión espectral* es la integral de la velocidad de la energía de radiación emitida a una longitud de onda específica, por unidad de área superficial sobre todo el hemisferio, la **emisividad hemisférica espectral** se puede expresar como

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{b\lambda}(\lambda, T)} \quad (12-32)$$

Note que la emisividad de una superficie a una longitud de onda dada puede ser diferente a temperaturas diferentes, ya que la distribución espectral de la radiación emitida (y, por consiguiente, la cantidad de radiación emitida a una longitud de onda dada) cambia con la temperatura.

Por último, la **emisividad hemisférica total** se define en términos de la energía de radiación emitida sobre todas las longitudes de onda en todas las direcciones, como

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (12-33)$$

Por lo tanto, la emisividad hemisférica total (o, sencillamente, la “emisividad promedio”) de una superficie a una temperatura dada representa la razón entre la energía total de radiación emitida por la superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro de la misma área superficial a la misma temperatura.

Nótese, con base en las ecuaciones 12-26 y 12-32, que $E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$ y $E_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T)E_{b\lambda}(\lambda, T)$, la emisividad hemisférica total también se puede expresar como

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T)E_{b\lambda}(\lambda, T)d\lambda}{\sigma T^4} \quad (12-34)$$

dado que $E_b(T) = \sigma T^4$. Para realizar esta integración necesitamos conocer la variación de la emisividad espectral con la longitud de onda a la temperatura especificada. El integrando suele ser una función complicada y la solución tiene que hallarse numéricamente. Sin embargo, se puede llevar a cabo con bastante facilidad si se divide el espectro en un número suficiente de *bandas de longitudes de onda* suponiendo que la emisividad permanece constante sobre cada banda; es decir, expresando la función $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ como si fuese escalonada. Esta simplificación resulta muy conveniente a cambio de un poco de sacrificio de la exactitud, ya que nos permite transformar la integración en una suma en términos de funciones de emisión de cuerpo negro.

Como ejemplo, considere la función de emisividad cuya gráfica se da en la figura 12-24. Da la apariencia de que se puede aproximar razonablemente bien por medio de una función escalonada de la forma

$$\varepsilon_\lambda = \begin{cases} \varepsilon_1 = \text{constante}, & 0 \leq \lambda < \lambda_1 \\ \varepsilon_2 = \text{constante}, & \lambda_1 \leq \lambda < \lambda_2 \\ \varepsilon_3 = \text{constante}, & \lambda_2 \leq \lambda < \infty \end{cases} \quad (12-35)$$

Entonces, basándose en la ecuación 12-34, la emisividad promedio se puede determinar descomponiendo la integral en tres partes y utilizando la definición de la función de radiación de cuerpo negro, como

$$\begin{aligned} \varepsilon(T) &= \frac{\varepsilon_1 \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} + \frac{\varepsilon_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} + \frac{\varepsilon_3 \int_{\lambda_2}^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} \\ &= \varepsilon_1 f_{0-\lambda_1}(T) + \varepsilon_2 f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) + \varepsilon_3 f_{\lambda_2-\infty}(T) \end{aligned} \quad (12-36)$$

La radiación es un fenómeno complejo por sí mismo y la consideración de la dependencia de las propiedades con respecto a la longitud de onda y la di-

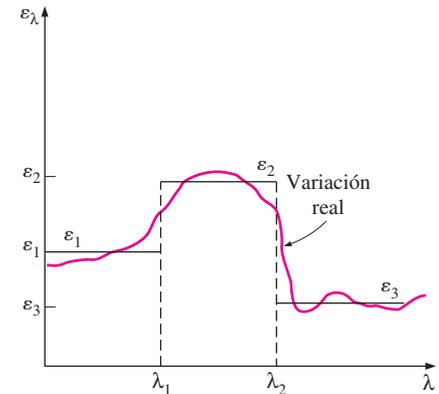


FIGURA 12-24

Aproximación de la variación real de la emisividad con la longitud de onda por medio de una función escalonada.

Superficie real:

$$\varepsilon_\theta \neq \text{constante}$$

$$\varepsilon_\lambda \neq \text{constante}$$

Superficie difusa:

$$\varepsilon_\theta = \text{constante}$$

Superficie gris:

$$\varepsilon_\lambda = \text{constante}$$

Superficie gris, difusa:

$$\varepsilon = \varepsilon_\lambda = \varepsilon_\theta = \text{constante}$$

FIGURA 12-25

Efecto de las aproximaciones difusa y gris sobre la emisividad de una superficie.

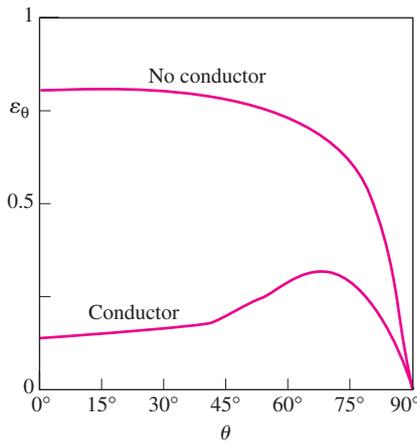


FIGURA 12-26

Variaciones típicas de la emisividad con la dirección para conductores y no conductores eléctricos.

rección, suponiendo que existan datos suficientes, la hacen todavía más complicada. Por lo tanto, a menudo se utilizan las aproximaciones *gris* y *difusa* en los cálculos de la radiación. Se dice que una superficie es *difusa* si sus propiedades son *independientes de la dirección* y *gris* si sus propiedades son independientes de la longitud de onda. Por lo tanto, la emisividad de una superficie gris y difusa es sencillamente su emisividad hemisférica total debido a que no depende de la dirección ni de la longitud de onda (figura 12-25).

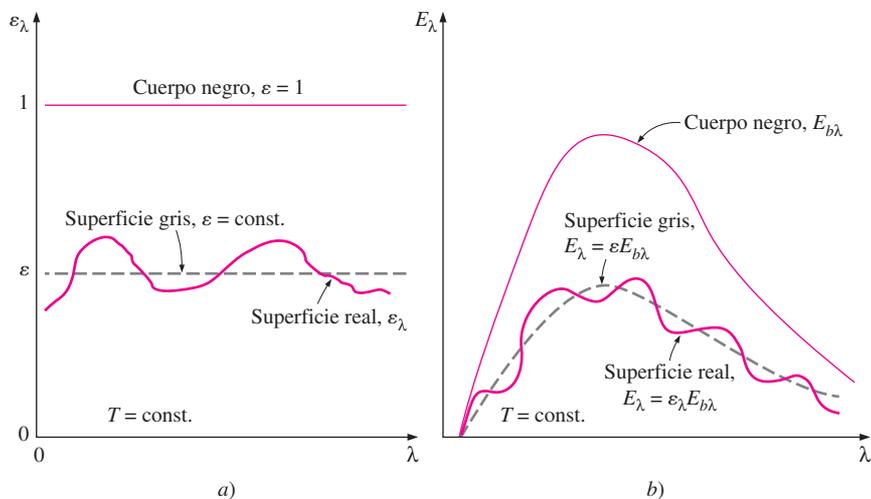
Resultan pertinentes unos cuantos comentarios acerca de la validez de la aproximación difusa. Aun cuando las superficies reales no emiten radiación de una manera perfectamente difusa, como lo hace un cuerpo negro, a menudo se aproximan a ello. En la figura 12-26 se da la variación de la emisividad con la dirección tanto para conductores eléctricos como para no conductores. En este caso θ es el ángulo medido desde la normal a la superficie y, por consiguiente, $\theta = 0$ para la radiación emitida en una dirección normal a esta última. Note que ε_θ permanece casi constante para más o menos $\theta < 40^\circ$, para los conductores, como los metales, y para $\theta < 70^\circ$, para los no conductores, como los plásticos. Por lo tanto, la emisividad direccional de una superficie en la dirección normal es representativa de su emisividad hemisférica. En el análisis de la radiación es práctica común suponer que las superficies son emisores difusos, con una emisividad igual al valor en la dirección normal ($\theta = 0$).

En la figura 12-27 se ilustra el efecto de la aproximación gris sobre la emisividad y el poder de emisión de una superficie real. Note que en general la emisión de radiación desde una superficie real difiere de la distribución de Planck y la curva de emisión puede tener varios picos y valles. Una superficie gris debe emitir tanta radiación como la superficie real que representa a la misma temperatura. Por lo tanto, las áreas debajo de las curvas de emisión de las superficies real y gris deben ser iguales.

En la tabla A-18 del apéndice se da una lista de las emisividades de materiales comunes, y en la figura 12-28 se ilustra la variación de la emisividad con la longitud de onda y la temperatura. En la figura 12-29 se dan rangos típicos de la emisividad de varios materiales. Note que, por lo general, los metales tienen emisividades bajas, tanto como 0.02 para las superficies pulidas, y los no metales, como la cerámica y los materiales orgánicos las tienen altas. La emisividad de los metales se incrementa con la temperatura. Asimismo, la oxidación causa un aumento significativo en la emisividad de los metales. Los metales intensamente oxidados pueden tener emisividades comparables a las de los no metales.

FIGURA 12-27

Comparación de la emisividad *a*) y el poder de emisión *b*) de una superficie real con los de una superficie gris y un cuerpo negro a la misma temperatura.



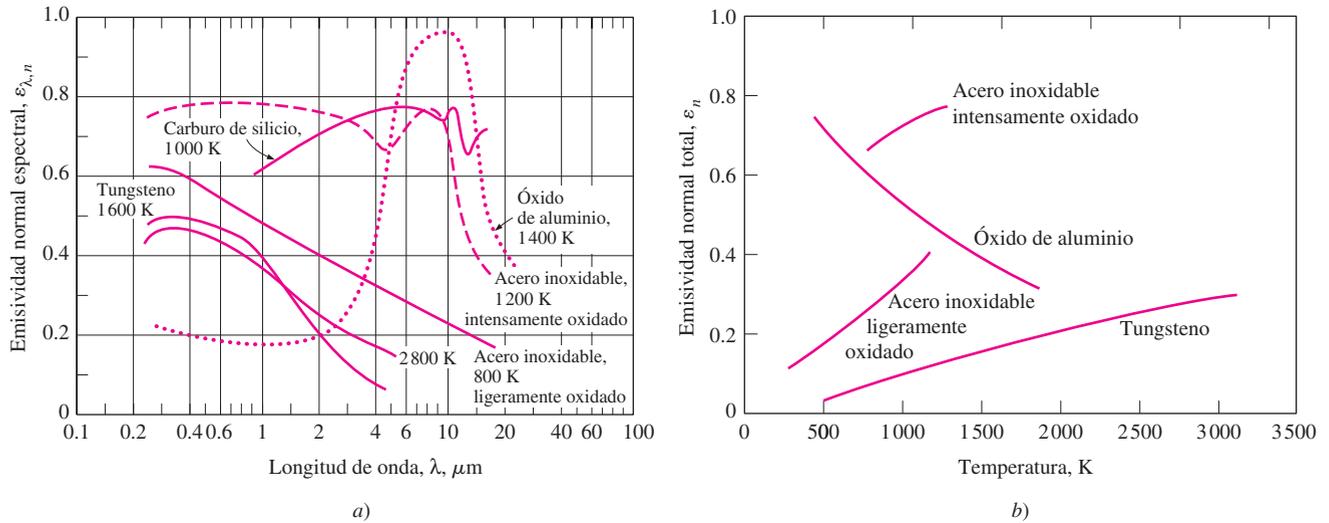


FIGURA 12-28

Variación de la emisividad normal con a) la longitud de onda y b) la temperatura para varios materiales.

Se debe de tener cuidado en el uso e interpretación de los datos acerca de propiedades relacionadas con la radiación que aparecen en la literatura, ya que dependen fuertemente de las condiciones de la superficie, como la oxidación, la aspereza, el tipo de acabado y la limpieza. Como consecuencia, se tienen una discrepancia e incertidumbre considerables en los valores de los que se informa. La incertidumbre se debe en gran parte a la dificultad para caracterizar y describir con precisión las condiciones de la superficie.

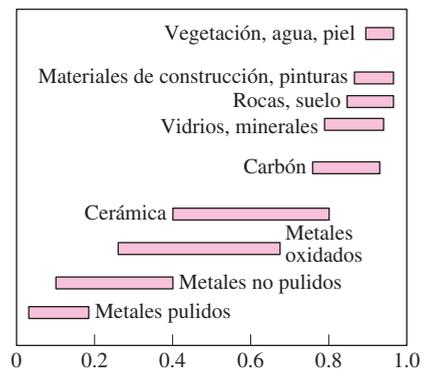


FIGURA 12-29

Rangos típicos de la emisividad para varios materiales.

EJEMPLO 12-4 Emisividad de una superficie y el poder de emisión

La función de emisividad espectral de una superficie opaca a 800 K se aproxima como (figura 12-30)

$$\epsilon_{\lambda} = \begin{cases} \epsilon_1 = 0.3, & 0 \leq \lambda < 3 \mu\text{m} \\ \epsilon_2 = 0.8, & 3 \mu\text{m} \leq \lambda < 7 \mu\text{m} \\ \epsilon_3 = 0.1, & 7 \mu\text{m} \leq \lambda < \infty \end{cases}$$

Determine la emisividad promedio de la superficie y su poder de emisión.

SOLUCIÓN Se da la variación con la longitud de onda de la emisividad de una superficie a una temperatura específica. Deben determinarse la emisividad promedio de la superficie y su poder de emisión.

Análisis La variación de la emisividad de la superficie con la longitud de onda se da como una función escalonada. Por lo tanto, se puede determinar la emisividad promedio de esa superficie basándose en la ecuación 12-34 y descomponiendo la integral en tres partes,

$$\begin{aligned} \epsilon(T) &= \frac{\epsilon_1 \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} + \frac{\epsilon_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} + \frac{\epsilon_3 \int_{\lambda_2}^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} \\ &= \epsilon_1 f_{0-\lambda_1}(T) + \epsilon_2 f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) + \epsilon_3 f_{\lambda_2-\infty}(T) \\ &= \epsilon_1 f_{\lambda_1} + \epsilon_2 (f_{\lambda_2} - f_{\lambda_1}) + \epsilon_3 (1 - f_{\lambda_2}) \end{aligned}$$

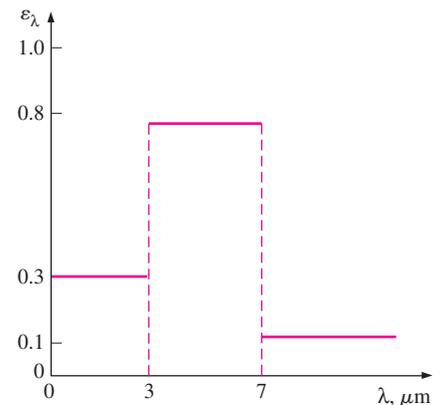


FIGURA 12-30

Emisividad espectral de la superficie considerada en el ejemplo 12-4.

en donde f_{λ_1} y f_{λ_2} son las funciones de radiación de cuerpo negro y se determinan a partir de la tabla 12-2 como

$$\lambda_1 T = (3 \mu\text{m})(800 \text{ K}) = 2400 \mu\text{m} \cdot \text{K} \rightarrow f_{\lambda_1} = 0.140256$$

$$\lambda_2 T = (7 \mu\text{m})(800 \text{ K}) = 5600 \mu\text{m} \cdot \text{K} \rightarrow f_{\lambda_2} = 0.701046$$

Note que $f_{0-\lambda_1} = f_{\lambda_1} - f_0 = f_{\lambda_1}$, puesto de $f_0 = 0$, y $f_{\lambda_2-\infty} = f_{\infty} - f_{\lambda_2} = 1 - f_{\lambda_2}$, dado que $f_{\infty} = 1$. Sustituyendo

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.3 \times 0.140256 + 0.8(0.701046 - 0.140256) + 0.1(1 - 0.701046) \\ &= \mathbf{0.521} \end{aligned}$$

Es decir, la superficie emitirá tanta energía de radiación a 800 K como una superficie gris que tenga una emisividad constante de $\varepsilon = 0.521$. El poder de emisión de la superficie es

$$E = \varepsilon \sigma T^4 = 0.521(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(800 \text{ K})^4 = \mathbf{12\ 100 \text{ W/m}^2}$$

Discusión Note que la superficie emite 12.1 kJ de energía de radiación por segundo por m^2 de área.

Absortividad, reflectividad y transmisividad

Todo lo que nos rodea emite radiación en forma constante y la emisividad representa las características de emisión de esos cuerpos. Esto significa que todo cuerpo, incluyendo el nuestro, es constantemente bombardeado por radiación proveniente de todas direcciones, en un intervalo de longitudes de onda. Recuerde que el flujo de radiación *que incide sobre una superficie* se llama **irradiación** y se denota por G .

Cuando la radiación choca contra una superficie, parte de ella es absorbida, parte de ella es reflejada y la parte restante, si la hay, es transmitida, como se ilustra en la figura 12-31. La *fracción de irradiación absorbida por la superficie* se llama **absortividad** α , la *fracción reflejada por la superficie* recibe el nombre de **reflectividad** ρ , y la *fracción transmitida* es la **transmisividad** τ ; es decir,

$$\text{Absortividad:} \quad \alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{\text{abs}}}{G}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (12-37)$$

$$\text{Reflectividad:} \quad \rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{\text{ref}}}{G}, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (12-38)$$

$$\text{Transmisividad:} \quad \tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{\text{tr}}}{G}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (12-39)$$

en donde G es la energía de radiación que incide sobre la superficie y G_{abs} , G_{ref} y G_{tr} son las porciones absorbida, reflejada y transmitida de ella, respectivamente. La primera ley de la termodinámica requiere que la suma de energía de radiación absorbida, reflejada y transmitida sea igual a la radiación incidente; esto es,

$$G_{\text{abs}} + G_{\text{ref}} + G_{\text{tr}} = G \quad (12-40)$$

Dividiendo cada término de esta relación entre G se obtiene

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (12-41)$$

Para las superficies opacas, $\tau = 0$ y, por tanto,

$$\alpha + \rho = 1 \quad (12-42)$$

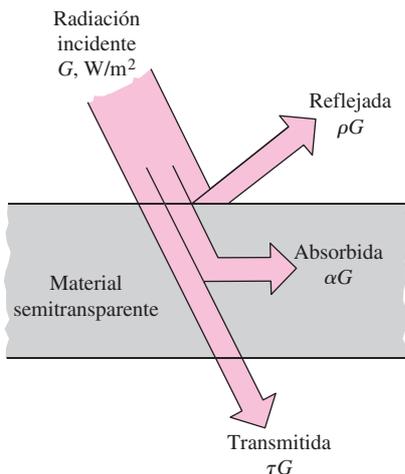


FIGURA 12-31

Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.

La anterior es una relación importante ya que nos permite determinar tanto la absorptividad como la reflectividad de una superficie opaca midiendo cualquiera de estas propiedades.

Estas definiciones son para propiedades *hemisféricas totales*, dado que G representa el flujo de radiación que incide sobre la superficie desde todas direcciones sobre el espacio hemisférico y sobre todas las longitudes de onda. Por consiguiente, α , ρ y τ son las propiedades *promedio* para todas las direcciones y todas las longitudes de onda. Sin embargo, como la emisividad, estas propiedades también se pueden definir para una longitud de onda y una dirección específica o para ambas. Por ejemplo, la **absortividad direccional espectral** y la **reflectividad direccional espectral** de una superficie se definen, respectivamente, como las fracciones absorbida y reflejada de la intensidad de la radiación incidente en una longitud de onda y una dirección específicas, como

$$\alpha_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, \text{abs}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad \text{y} \quad \rho_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, \text{ref}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (12-43)$$

De modo semejante, la **absortividad hemisférica espectral** y la **reflectividad hemisférica espectral** de una superficie se definen como

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{abs}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad \text{y} \quad \rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{ref}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (12-44)$$

en donde G_{λ} es la irradiación espectral (en $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$) que incide sobre la superficie, y $G_{\lambda, \text{abs}}$ y $G_{\lambda, \text{ref}}$ son las porciones absorbida y reflejada de ella, respectivamente.

Se pueden definir cantidades similares para la transmisividad de materiales semitransparentes. Por ejemplo, la **transmisividad hemisférica espectral** de un medio se puede expresar como

$$\tau_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{tr}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (12-45)$$

La absorptividad, reflectividad y transmisividad promedios de una superficie también se pueden definir en términos de sus contrapartes espectrales como

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda}, \quad \rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda}, \quad \tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda} \quad (12-46)$$

La reflectividad difiere un tanto de las otras propiedades en el sentido de que tiene naturaleza *bidireccional*. Es decir, el valor de la reflectividad de una superficie no depende sólo de la dirección de la radiación incidente sino también de la dirección de la reflexión. Por lo tanto, los rayos reflejados de un haz de radiación que incide sobre una superficie real en una dirección específica formarán una configuración geométrica irregular, como se muestra en la figura 12-32. Ese tipo de datos detallados con respecto a la reflectividad no existen para la mayor parte de las superficies e incluso, si los hubiera, tendrían muy poco valor en los cálculos referentes a la radiación, ya que esto por lo común agregarían más complicación al análisis.

En la práctica, en beneficio de la sencillez, se supone que las superficies reflejan de una manera perfectamente *especular* o *difusa*. En la **reflexión especular** el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia del haz de radiación. En la **reflexión difusa** la radiación se refleja de igual manera en todas direcciones, como se muestra en la figura 12-32. La reflexión de las superficies lisas y pulidas se aproxima a la especular, en tanto que la de las

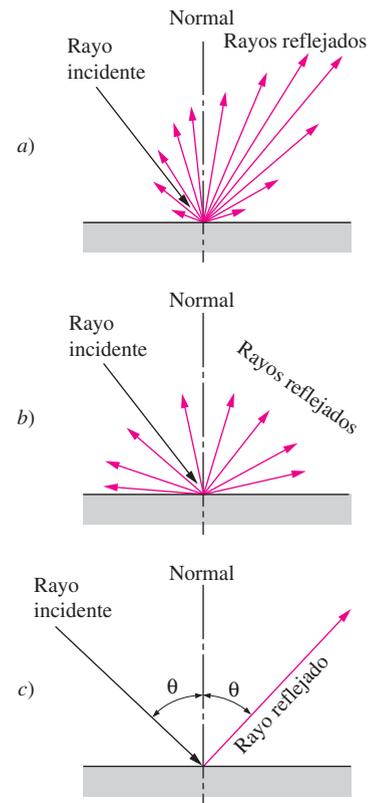


FIGURA 12-32

Diferentes tipos de reflexión desde una superficie: a) real o irregular, b) difusa y c) especular.

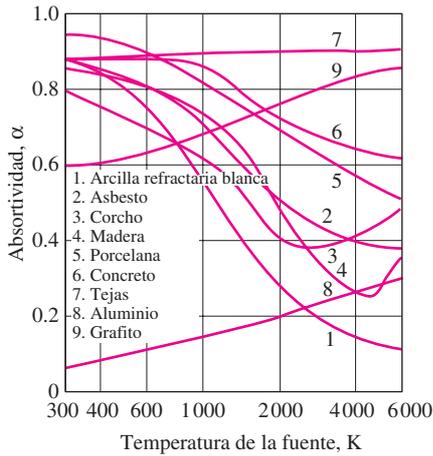


FIGURA 12-33

Variación de la absorptividad con la temperatura de la fuente de irradiación para varios materiales comunes a la temperatura ambiente.

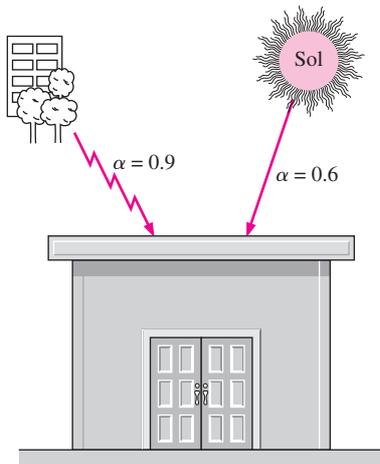


FIGURA 12-34

La absorptividad de un material puede ser bastante diferente para la radiación que se origina desde varias fuentes a temperaturas diferentes.

superficies ásperas se aproxima a la difusa. En el análisis de la radiación lo liso se define con relación a la longitud de onda. Se dice que una superficie es *lisa* si la altura de la aspereza superficial es mucho menor que la longitud de onda de la radiación incidente.

A diferencia de la emisividad, la absorptividad de un material es prácticamente independiente de la temperatura de la superficie. Sin embargo, sí depende con intensidad de la temperatura de la fuente en la cual se está originando la radiación incidente. Esto también resulta evidente en la figura 12-33, en la cual se muestran las absorptividades de diversos materiales a la temperatura ambiente como función de la temperatura de la fuente de radiación. Por ejemplo, la absorptividad del techo de concreto de una casa es alrededor de 0.6 para la radiación solar (temperatura de la fuente: 5780 K) y 0.9 para la radiación que se origina en los árboles y edificios de los alrededores (temperatura de la fuente: 300 K), como se ilustra en la figura 12-34.

Advierta que la absorptividad del aluminio aumenta con la temperatura de la fuente, una característica de los metales y, en general, la de los no conductores eléctricos disminuye con la temperatura. Esta disminución es la más pronunciada para las superficies que el ojo ve blancas. Por ejemplo, la absorptividad de una superficie pintada de blanco es baja para la radiación solar, pero es más bien elevada para la radiación infrarroja.

Ley de Kirchhoff

Considere un pequeño cuerpo de área superficial A_s , emisividad ε y absorptividad α a la temperatura T , contenido en un recinto cerrado isotérmico a la misma temperatura, como se muestra en la figura 12-35. Recuerde que un recinto cerrado isotérmico grande forma una cavidad de cuerpo negro, sin importar las propiedades relativas a la radiación de la superficie del recinto, y el cuerpo que se halla en él es demasiado pequeño como para interferir con la naturaleza de cuerpo negro de la cavidad. Por lo tanto, la radiación que incide sobre cualquier parte de la superficie del cuerpo pequeño es igual a la emitida por un cuerpo negro a la temperatura T ; esto es, $G = E_b(T) = \sigma T^4$ y la radiación absorbida por el cuerpo pequeño por unidad de área de su superficie es

$$G_{\text{abs}} = \alpha G = \alpha \sigma T^4$$

La radiación emitida por el pequeño cuerpo es

$$E_{\text{emit}} = \varepsilon \sigma T^4$$

Considerando que el pequeño cuerpo se encuentra en equilibrio térmico con el recinto, la tasa neta de la transferencia de calor hacia dicho cuerpo debe ser cero. Por lo tanto, la radiación emitida por el cuerpo debe ser igual a la absorbida por él:

$$A_s \varepsilon \sigma T^4 = A_s \alpha \sigma T^4$$

Por tanto, concluimos que

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (12-47)$$

Es decir, *la emisividad hemisférica total de una superficie a la temperatura T es igual a su absorptividad hemisférica total para la radiación que proviene de un cuerpo negro a la misma temperatura*. Esta relación, que simplifica mucho los análisis relativos a la radiación, fue desarrollada por primera vez por Gustav Kirchhoff en 1860 y ahora se le conoce como **ley de Kirchhoff**. Note que esta relación se obtiene con la condición de que la temperatura superficial sea igual a la temperatura de la fuente de irradiación y el lector debe tener cuidado en no usarla cuando existe una diferencia considerable (más de unos cuan-

tos cientos de grados) entre las temperaturas de la superficie y de la fuente de irradiación.

También se puede repetir la deducción antes dada para la radiación a una longitud de onda específica, para obtener la forma *espectral* de la ley de Kirchoff:

$$\varepsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) \quad (12-48)$$

Esta relación es válida cuando la irradiación o la radiación emitida son independientes de la dirección. La forma de la ley de Kirchoff que no contiene restricciones es la *direccional espectral*, expresada como $\varepsilon_{\lambda, \theta}(T) = \alpha_{\lambda, \theta}(T)$. Es decir, la emisividad de una superficie a una longitud de onda, una dirección y una temperatura específicas siempre es igual a su absorptividad a las mismas longitud de onda, dirección y temperatura.

Resulta muy tentador usar la ley de Kirchoff en el análisis de la radiación, puesto que la relación $\varepsilon = \alpha$ junto con $\rho = 1 - \alpha$ nos permite determinar las tres propiedades de una superficie opaca a partir del conocimiento de *sólo* una de ellas. Aun cuando en la mayor parte de los casos la ecuación 12-47 da resultados aceptables, en la práctica se debe tener cuidado cuando existe una diferencia considerable entre la temperatura de la superficie y la de la fuente de la radiación incidente.

El efecto de invernadero

Es probable que el lector haya advertido que cuando deja su automóvil bajo la luz del Sol en un día soleado el interior se calienta mucho más que el aire del exterior y puede ser que se haya preguntado por qué el automóvil actúa como una *trampa de calor*. La respuesta se encuentra en la curva de transmisividad espectral del *vidrio*, la cual se semeja a una U invertida, como se muestra en la figura 12-36. En esta figura observamos que el vidrio, con los espesores que se encuentran en la práctica, transmite más de 90% de la radiación en el rango visible y es prácticamente opaco (no transparente) a la radiación en las regiones infrarrojas de longitudes de onda más largas del espectro electromagnético (muy aproximadamente $\lambda > 3 \mu\text{m}$). Por lo tanto, el vidrio tiene una ventana transparente en el intervalo de longitudes de onda de $0.3 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$, en el cual se emite más de 90% de la radiación solar. Por otra parte, toda la radiación emitida por las superficies a la temperatura ambiente cae en la región infrarroja. Como consecuencia, el vidrio permite que entre la radiación solar pero no deja que escape la radiación infrarroja proveniente de las superficies interiores. Esto causa una elevación en la temperatura interior como resultado de la energía que se acumula en el automóvil. Este efecto de calentamiento, el cual se debe a la característica no gris del vidrio (o plásticos transparentes), se conoce como **efecto de invernadero**, en virtud de que se utiliza principalmente en los invernaderos (figura 12-37).

En una escala más grande, también se experimenta el efecto de invernadero sobre la Tierra. La superficie de ésta se calienta durante el día como resultado de la absorción de la energía solar y se enfría en la noche al irradiar su energía hacia el espacio profundo como radiación infrarroja. Los gases de la combustión, como el CO_2 y el vapor de agua, que se encuentran en la atmósfera transmiten la gran cantidad de radiación solar, pero absorben la infrarroja emitida por la superficie de la Tierra. Como consecuencia, existe preocupación de que llegue el momento en que la energía atrapada sobre la Tierra cause un calentamiento global y, por ello, drásticos cambios en los patrones atmosféricos.

En los lugares *húmedos*, como las zonas costeras, no se tiene un cambio grande entre las temperaturas diurna y nocturna porque la humedad actúa como una barrera en la trayectoria de la radiación infrarroja que proviene de la Tie-

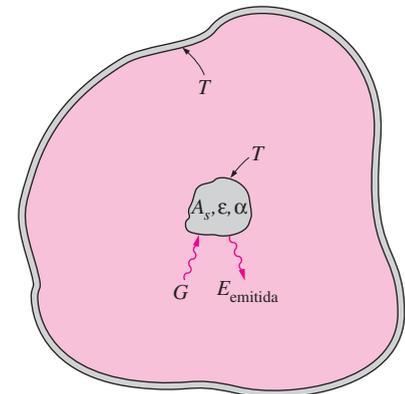


FIGURA 12-35

El pequeño cuerpo contenido en un recinto cerrado isotérmico grande usado en el desarrollo de la ley de Kirchoff.

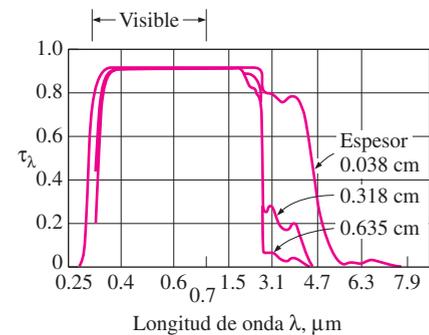


FIGURA 12-36

Transmisividad espectral del vidrio al bajo hierro a la temperatura ambiente para diferentes espesores.

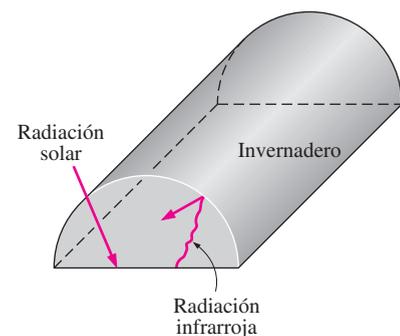


FIGURA 12-37

Un invernadero atrapa la energía permitiendo que entre la radiación solar pero no dejando salir a la radiación infrarroja.

rra y, como consecuencia, retarda el proceso de enfriamiento en la noche. En zonas con cielos claros, como los desiertos, se tiene una gran oscilación entre las temperaturas diurna y nocturna debido a la ausencia de ese tipo de barreras para la radiación infrarroja.

12-6 ■ RADIACIÓN ATMOSFÉRICA Y SOLAR

El Sol es nuestra principal fuente de energía. La energía que proviene de él, llamada *energía solar*, llega a nosotros en la forma de ondas electromagnéticas después de experimentar considerables interacciones con la atmósfera. La energía de radiación emitida o reflejada por los constituyentes de la atmósfera forma la *radiación atmosférica*. Aquí se da un panorama general de la radiación solar y atmosférica por su importancia y relevancia para la vida cotidiana. Asimismo, nuestra familiaridad con la energía solar la convierte en una herramienta eficaz en el desarrollo de un mejor entendimiento para algunos de los conceptos que se presentaron al principio. En los numerosos libros dedicados a este tema se puede hallar un tratamiento detallado sobre esta excitante materia.

El Sol es un cuerpo casi esférico que tiene un diámetro $D \approx 1.39 \times 10^9$ m y una masa $m \approx 2 \times 10^{30}$, y se encuentra ubicado a una distancia media $L = 1.50 \times 10^{11}$ m de la Tierra. Emite radiación en forma continua a razón de $E_{\text{Sol}} \approx 3.8 \times 10^{26}$ W. Menos de una mil millonésima parte de esta energía (alrededor de 1.7×10^{17} W) choca contra la Tierra, lo cual es suficiente para mantenerla caliente y sostener la vida a través del proceso de fotosíntesis. La energía del Sol se debe a la reacción continua de *fusión* durante la cual dos átomos de hidrógeno se funden para formar uno de helio. Por lo tanto, en esencia, el Sol es un *reactor nuclear* , con temperaturas tan elevadas como 40 000 000 K en la región de su núcleo. La temperatura cae hasta alrededor de 5 800 K en la región exterior del Sol, llamada la zona de convección, como resultado de la disipación de dicha energía como radiación.

La energía solar que llega a la atmósfera terrestre se llama **irradiancia solar total** G_s , cuyo valor es

$$G_s = 1373 \text{ W/m}^2 \quad (12-49)$$

La irradiancia solar total (también llamada **constante solar**) representa la *tasa a la cual la energía solar incide sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol en el borde exterior de la atmósfera, cuando la Tierra se encuentra a su distancia media del Sol* (figura 12-38).

Se puede usar el valor de la irradiancia solar total para estimar la temperatura superficial efectiva del Sol, a partir del requisito de que

$$(4\pi L^2)G_s = (4\pi r^2)\sigma T_{\text{Sol}}^4 \quad (12-50)$$

en donde L es la distancia media entre el centro del Sol y la Tierra y r es el radio del mismo. El primer miembro de esta ecuación representa la energía solar total que pasa a través de una superficie esférica cuyo radio es la distancia media Tierra-Sol y el segundo representa la energía total que sale de la superficie exterior del Sol. El principio de conservación de la energía requiere que estas dos cantidades sean iguales entre sí, ya que la energía solar no experimenta atenuación (o acrecentamiento) en su camino a través del vacío (figura 12-39). La **temperatura superficial efectiva** del Sol se determina, basándose en la ecuación 12-50, como $T_{\text{Sol}} = 5780$ K. Es decir, el Sol se puede tratar como un cuerpo negro a una temperatura de 5780 K. Esto también lo confirman las mediciones de la distribución espectral de la radiación solar

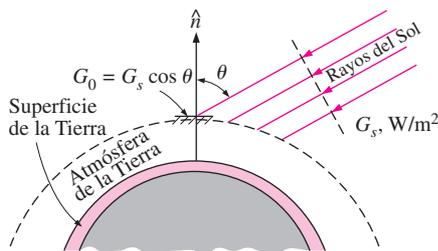


FIGURA 12-38

La radiación solar que llega a la atmósfera terrestre y la irradiancia solar total.

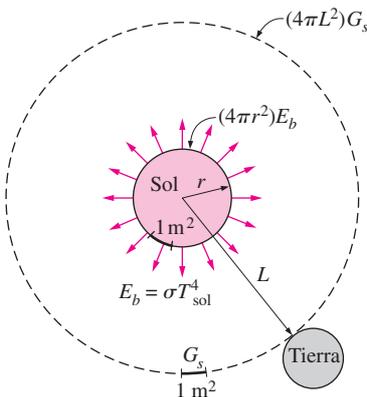


FIGURA 12-39

La energía solar total que pasa a través de esferas concéntricas permanece constante, pero la energía que cae por unidad de área disminuye al aumentar el radio.

apenas afuera de la atmósfera, cuya gráfica se da en la figura 12-40, en la cual sólo se muestran pequeñas desviaciones con respecto al comportamiento idealizado del cuerpo negro.

La distribución espectral de la radiación solar sobre el suelo, cuya gráfica se ilustra en la figura 12-40, muestra que esa radiación sufre una *atenuación* considerable cuando pasa a través de la atmósfera, como resultado de la *absorción* y la *dispersión*. Cerca de 99% de la atmósfera está contenida a menos de una distancia de 30 km de la superficie terrestre. Las varias caídas en la distribución espectral de la radiación sobre la superficie de la Tierra se deben a la *absorción* por los gases O_2 , O_3 (ozono), H_2O y CO_2 . La absorción por parte del oxígeno ocurre en una banda angosta alrededor de $\lambda = 0.76 \mu\text{m}$. El *ozono* absorbe casi por completo la radiación *ultravioleta* en las longitudes de onda por debajo de $0.3 \mu\text{m}$ y, de manera considerable, la radiación en el rango de 0.3 - $0.4 \mu\text{m}$. Por tanto, la capa de ozono en las regiones superiores de la atmósfera protege los sistemas biológicos sobre la Tierra contra la peligrosa radiación ultravioleta. A su vez, debemos proteger la capa de ozono de las sustancias químicas destructivas de uso común como refrigerantes, agentes limpiadores y propulsores en las latas de aerosol. En la actualidad, se ha prohibido el uso de estos productos químicos. El gas ozono también absorbe algo de la radiación en el rango visible. La absorción en la región infrarroja está dominada por el *vapor de agua* y por el *bióxido de carbono*. Las partículas de polvo y otros contaminantes que se encuentran en la atmósfera también absorben radiación en diversas longitudes de onda.

Como resultado de estas absorciones la energía solar que llega a la superficie terrestre está considerablemente debilitada, hasta alrededor de 950 W/m^2 en un día claro y mucho menos en los días nublados o con *smog*. Asimismo, prácticamente toda la radiación solar que llega a la superficie terrestre cae en la banda de longitudes de onda de 0.3 a $2.5 \mu\text{m}$.

Otro mecanismo que atenúa la radiación solar a medida que pasa a través de la atmósfera es la *dispersión* o *reflexión* por las moléculas del aire y las muchas otras clases de partículas, como el polvo, el *smog* y las gotitas de agua suspendidas en la atmósfera. La dispersión la rige de manera preponderante el tamaño de la partícula en relación con la longitud de onda de la radiación. Las moléculas de oxígeno y de nitrógeno dispersan principalmente la radiación a longitudes de onda muy cortas, comparables al tamaño de las propias moléculas. Por lo tanto, la más dispersada es la radiación en las longitudes de onda correspondientes a los colores violeta y azul. Esta dispersión molecular en todas direcciones es la que da al cielo su color característico. El mismo fenómeno es el responsable de los amaneceres y atardeceres rojos. Temprano, en la mañana, y al caer la tarde los rayos del Sol pasan a través de una capa más gruesa de la atmósfera de aquélla por la que pasan al mediodía, cuando el Sol se encuentra en la parte más alta. Por lo tanto, los colores violeta y azul de la luz encuentran un mayor número de moléculas en el momento en que llegan a la superficie terrestre y, por consiguiente, una fracción más grande de ellos es dispersada (figura 12-41). Como consecuencia, la luz que llega a la superficie terrestre consta en su mayor parte de colores correspondientes a las longitudes de onda más largas, como el rojo, el naranja y el amarillo. Las nubes se ven de color naranja rojizo durante el amanecer y el atardecer porque en esos momentos la luz que reflejan es naranja rojiza. Por lo misma razón, la luz roja de los semáforos es visible desde una distancia mayor que la luz verde en las mismas circunstancias.

La energía solar que incide sobre una superficie de la Tierra se considera que consta de partes *directa* y *difusa*. La parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se llama **radiación solar directa** G_D . Se supone que la radiación dispersada llega a la superficie terrestre de manera uniforme desde todas direcciones y se llama

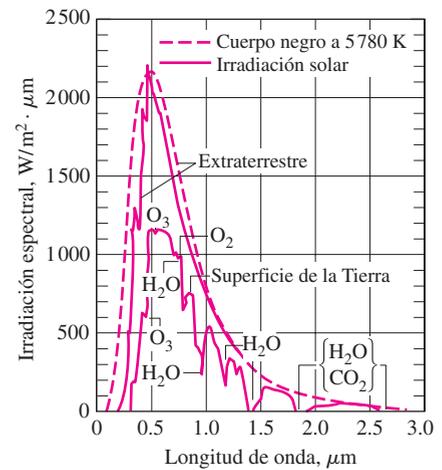


FIGURA 12-40

Distribución espectral de la radiación solar apenas afuera de la atmósfera, en la superficie de la Tierra en un día típico y la comparación con la radiación de cuerpo negro a 5780 K.

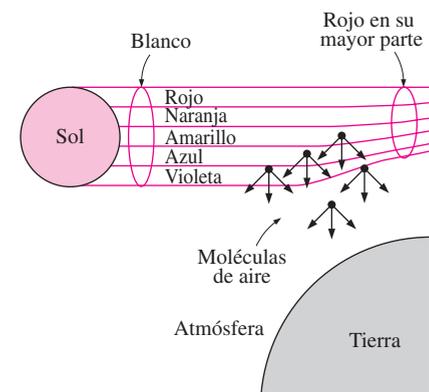


FIGURA 12-41

Las moléculas del aire dispersan mucho más la luz azul que la roja. En la puesta del Sol la luz viaja a través de una capa más gruesa de atmósfera, lo cual elimina gran parte del azul de la luz natural, permitiendo que domine el rojo.

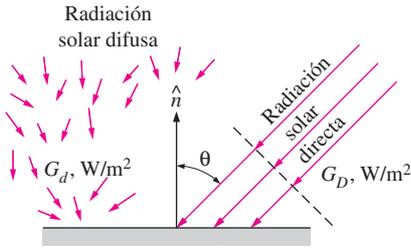


FIGURA 12-42

Radiación directa y difusa que inciden sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre.

radiación solar difusa G_d . Entonces, la *energía solar total* que incide sobre la unidad de área de una *superficie horizontal* sobre el piso es (figura 12-42)

$$G_{\text{solar}} = G_D \cos \theta + G_d \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-51)$$

en donde θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa (el ángulo que forma el rayo de sol con la perpendicular a la superficie). La radiación difusa varía desde alrededor de 10% de la radiación total, en un día claro, hasta cerca de 100% en un día totalmente nublado.

Las moléculas de gas y las partículas suspendidas en la atmósfera *emiten radiación* y la absorben. La emisión atmosférica se debe de manera principal a las moléculas de CO_2 y H_2O , y se concentra en las regiones de 5 a 8 μm y por encima de 13 μm . Aun cuando esta emisión está lejos de semejarse a la distribución de la radiación de un cuerpo negro, se encuentra conveniente, en los cálculos referentes a la radiación, tratar a la atmósfera como un cuerpo de este tipo a alguna temperatura ficticia más baja que emite una cantidad equivalente de energía de radiación. Esta temperatura ficticia se llama **temperatura efectiva del cielo**, T_{cielo} . Entonces la emisión de radiación de la atmósfera hacia la superficie terrestre se expresa como

$$G_{\text{cielo}} = \sigma T_{\text{cielo}}^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-52)$$

El valor de T_{cielo} depende de las condiciones atmosféricas. Varía desde alrededor de 230 K, para las condiciones de cielo frío y claro, hasta cerca de 285 K, para las condiciones de cielo cálido y con nubes.

Note que la temperatura efectiva del cielo no se desvía mucho de la ambiente. Por tanto, a la luz de la ley de Kirchhoff podemos tomar la absorptividad de una superficie como igual a su emisividad a la temperatura ambiente $\alpha = \varepsilon$. Entonces la radiación del cielo absorbida por una superficie se puede expresar como

$$E_{\text{cielo, absorbida}} = \alpha G_{\text{cielo}} = \alpha \sigma T_{\text{cielo}}^4 = \varepsilon \sigma T_{\text{cielo}}^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-53)$$

La velocidad neta de transferencia de calor por radiación a una superficie expuesta a las radiaciones solar y atmosférica se determina con base en un balance de energía (figura 12-43):

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{neta, rad}} &= \sum E_{\text{absorbida}} - \sum E_{\text{emitida}} \\ &= E_{\text{solar, absorbida}} + E_{\text{cielo, absorbida}} - E_{\text{emitida}} \\ &= \alpha_s G_{\text{solar}} + \varepsilon \sigma T_{\text{cielo}}^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 \\ &= \alpha_s G_{\text{solar}} + \varepsilon \sigma (T_{\text{cielo}}^4 - T_s^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-54) \end{aligned}$$

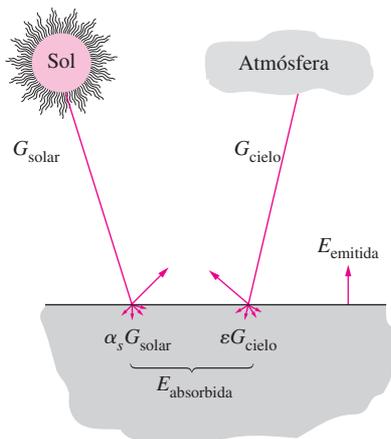


FIGURA 12-43

Interacciones de radiación de una superficie expuesta a la radiación solar y atmosférica.

en donde T_s es la superficie en K y ε es su emisividad a la temperatura ambiente. Un resultado positivo para $\dot{q}_{\text{neta, rad}}$ indica una ganancia de calor por radiación por parte de la superficie y uno negativo indica una pérdida de calor.

La absorción y emisión de radiación por los *gases elementales*, como el H_2 , el O_2 y el N_2 , a temperaturas moderadas son despreciables, y en los análisis de la radiación, un medio lleno con estos gases se puede considerar como *vacío*. Sin embargo, la absorción y emisión de los gases con *moléculas más grandes*, como el H_2O y el CO_2 , pueden ser *significativas* y es posible que sea necesario considerarlas cuando en un medio se encuentran presentes cantidades grandes de esos gases. Por ejemplo, una capa de vapor de agua a una presión de 1 atm y 100°C emite más de 50% de la energía que un cuerpo negro emitiría a la misma temperatura.

En las aplicaciones relativas a la energía solar, la distribución espectral de la radiación solar que incide es muy diferente de la distribución de la radiación emitida por las superficies, ya que la primera se concentra en la región de las

longitudes de onda cortas y la última en la región infrarroja. Por lo tanto, las propiedades relativas a la radiación de las superficies serán bastante diferentes para la radiación incidente y la emitida, y no se puede suponer que esas superficies sean grises. En lugar de ello, se supone que las superficies tienen dos conjuntos de propiedades: uno para la radiación solar y otro para la radiación infrarroja a la temperatura ambiente. En la tabla 12-3 se da la lista de la *emisividad* ϵ y la *absortividad solar* α_s de algunos materiales comunes. Las superficies que se pretende *captar energía solar*, como las áreas de absorción de los colectores solares, se desea que tengan valores altos de α_s , pero bajos de ϵ , con el fin de maximizar la absorción de la radiación solar y minimizar la emisión de radiación. Las superficies que se pretende *se mantengan frías* bajo el Sol, como las exteriores de los tanques de combustible y de los camiones refrigeradores se desea que tengan precisamente las propiedades opuestas. A menudo se les da a las superficies las propiedades deseadas recubriéndolas con capas delgadas de materiales *selectivos*. Por ejemplo, una superficie se puede mantener fría sencillamente con pintarla de blanco.

Cerramos esta sección señalando que los que llamamos *energía renovable* suele ser nada más que la manifestación de la energía solar en formas diferentes. Ese tipo de fuentes de energía incluyen la energía del viento, la potencia hidroeléctrica, la energía térmica del océano, la de las olas marinas y la madera. Por ejemplo, ninguna planta hidroeléctrica puede generar electricidad año tras año a menos que el agua se evapore por la absorción de energía solar y regrese como lluvia para rellenar la fuente de agua (figura 12-44). Aunque la energía solar es suficiente para satisfacer todas las necesidades energéticas del mundo, en la actualidad no es económico atenerse a ella debido a su baja concentración sobre la Tierra y el elevado costo de capital para aprovecharla.

TABLA 12-3

Comparación de la absortividad solar α_s de algunas superficies con su emisividad ϵ a la temperatura ambiente

Superficie	α_s	ϵ
Aluminio		
Pulido	0.09	0.03
Anodizado	0.14	0.84
Hoja	0.15	0.05
Cobre		
Pulido	0.18	0.03
Deslustrado	0.65	0.75
Acero inoxidable		
Pulido	0.37	0.60
Opaco	0.50	0.21
Metales plateados		
Óxido negro		
de níquel	0.92	0.08
Cromo negro	0.87	0.09
Concreto	0.60	0.88
Mármol blanco	0.46	0.95
Ladrillo rojo	0.63	0.93
Asfalto	0.90	0.90
Pintura negra	0.97	0.97
Pintura blanca	0.14	0.93
Nieve	0.28	0.97
Piel humana (caucásica)	0.62	0.97

EJEMPLO 12-5 Superficies absorbentes y reflectoras selectivas

Considere una superficie expuesta a radiación solar. En un momento dado las componentes directa y difusa de la radiación solar son $G_D = 400$ y $G_d = 300$ W/m^2 , y la radiación directa forma un ángulo de 20° con la perpendicular a la superficie. Se observa que la temperatura de la superficie es de 320 K en ese momento. Suponiendo una temperatura efectiva del cielo de 260 K, determine la razón neta de transferencia de calor por radiación para estos casos (figura 12-45):

- a) $\alpha_s = 0.9$ y $\epsilon = 0.9$ (superficie absorbente gris)
- b) $\alpha_s = 0.1$ y $\epsilon = 0.1$ (superficie reflectora gris)
- c) $\alpha_s = 0.9$ y $\epsilon = 0.1$ (superficie absorbente selectiva)
- d) $\alpha_s = 0.1$ y $\epsilon = 0.9$ (superficie reflectora selectiva)

SOLUCIÓN Se expone una superficie a la radiación solar y del cielo. Debe determinarse la razón neta de la transferencia de calor por radiación para cuatro combinaciones diferentes de emisividades y absortividades solares.

Análisis La energía solar total que incide sobre la superficie es

$$\begin{aligned} G_{\text{solar}} &= G_D \cos \theta + G_d \\ &= (400 \text{ W/m}^2) \cos 20^\circ + (300 \text{ W/m}^2) \\ &= 676 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Entonces, la razón neta de la transferencia de calor por radiación para cada uno de los cuatro casos se determina a partir de:

$$\dot{q}_{\text{neto, rad}} = \alpha_s G_{\text{solar}} + \epsilon \sigma (T_{\text{cielo}}^4 - T_s^4)$$

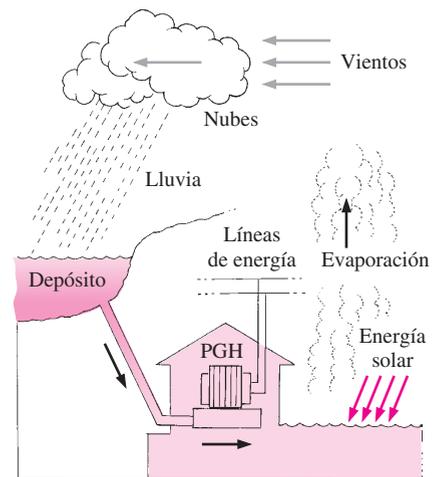


FIGURA 12-44
Ciclo por el que pasa el agua en una planta de generación hidroeléctrica.

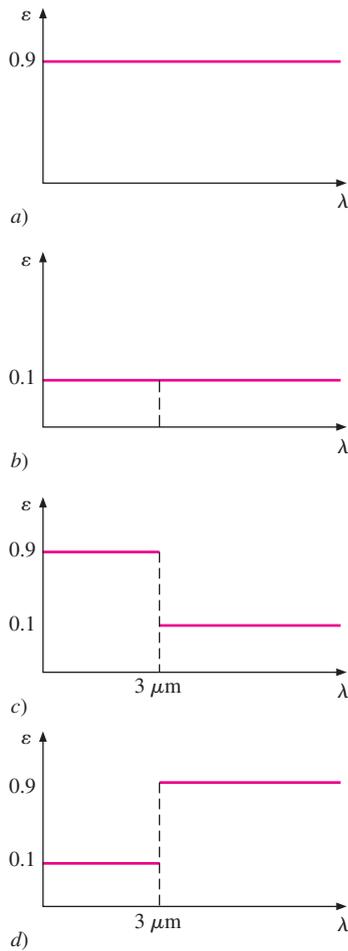


FIGURA 12-45

Representación gráfica de las emisividades espectrales de las cuatro superficies consideradas en el ejemplo 12-5.

a) $\alpha_s = 0.9$ y $\varepsilon = 0.9$ (superficie absorbente gris):

$$\dot{q}_{\text{neto, rad}} = 0.9(676 \text{ W/m}^2) + 0.9(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(260 \text{ K})^4 - (320 \text{ K})^4] \\ = \mathbf{307 \text{ W/m}^2}$$

b) $\alpha_s = 0.1$ y $\varepsilon = 0.1$ (superficie reflectora gris):

$$\dot{q}_{\text{neto, rad}} = 0.1(676 \text{ W/m}^2) + 0.1(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(260 \text{ K})^4 - (320 \text{ K})^4] \\ = \mathbf{34 \text{ W/m}^2}$$

c) $\alpha_s = 0.9$ y $\varepsilon = 0.1$ (superficie absorbente selectiva):

$$\dot{q}_{\text{neto, rad}} = 0.9(676 \text{ W/m}^2) + 0.1(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(260 \text{ K})^4 - (320 \text{ K})^4] \\ = \mathbf{575 \text{ W/m}^2}$$

d) $\alpha_s = 0.1$ y $\varepsilon = 0.9$ (superficie reflectora selectiva):

$$\dot{q}_{\text{neto, rad}} = 0.1(676 \text{ W/m}^2) + 0.9(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(260 \text{ K})^4 - (320 \text{ K})^4] \\ = \mathbf{-234 \text{ W/m}^2}$$

Discusión Note que la superficie de un material gris común de alta absorptividad gana calor a razón de 307 W/m^2 . La cantidad de ganancia de calor aumenta hasta 575 W/m^2 cuando la superficie se recubre con un material selectivo que tenga la misma absorptividad para la radiación solar, pero una baja emisividad para la radiación infrarroja. Asimismo, note que la superficie de un material gris común de alta reflectividad todavía gana calor a razón de 34 W/m^2 . Cuando la superficie se recubre con un material selectivo que tenga la misma reflectividad para la radiación solar, pero una alta emisividad para la radiación infrarroja, la superficie, por el contrario, pierde 234 W/m^2 . Por lo tanto, la temperatura de la superficie disminuirá cuando se use una superficie reflectora selectiva.

TEMA DE INTERÉS ESPECIAL*

Ganancia de calor solar a través de las ventanas

El Sol es la fuente primaria de calor de la Tierra y la irradiancia solar sobre una superficie perpendicular a los rayos solares más allá de la atmósfera terrestre, a la distancia media Tierra-Sol de 149.5 millones de km, se llama irradiancia solar total o constante solar. El valor aceptado de la constante solar es de 1373 W/m^2 ($435.4 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2$), pero su valor cambia en 3.5% desde un máximo de 1418 W/m^2 , el 3 de enero, cuando la Tierra está más cercana al Sol, hasta un mínimo de 1325 W/m^2 , el 4 de julio, cuando la Tierra se encuentra más alejada del Sol. La distribución espectral de la radiación solar más allá de la atmósfera terrestre se asemeja a la energía emitida por un cuerpo negro a 5780°C , con alrededor de 9% de la energía contenida en la región ultravioleta (a las longitudes de onda entre 0.29 hasta $0.4 \mu\text{m}$), 39% en la región visible (0.4 hasta $0.7 \mu\text{m}$) y 52% restante en la región del infrarrojo cercano (0.7 hasta $3.5 \mu\text{m}$). La radiación pico se presenta a una longitud de onda de alrededor de $0.48 \mu\text{m}$, lo cual corresponde a la porción de color verde del espectro visible. Es obvio que un material de encristalado que transmita la parte visible del espectro, al mismo tiempo que absorbe la porción infrarroja, es el idealmente apropiado para una

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

aplicación que requiere una ganancia máxima de luz diurna y una mínima de calor solar. De manera sorprendente, el vidrio común para ventanas se aproxima a este comportamiento notablemente bien (figura 12-46).

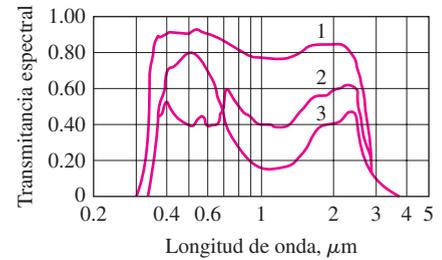
Parte de la radiación solar que entra en la atmósfera terrestre es dispersada y absorbida por las moléculas del aire y de vapor de agua, las partículas de polvo y las gotitas de agua que se encuentran en las nubes y, como consecuencia, la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre es menor que la constante solar. La extensión de la atenuación de la radiación solar depende de la longitud de la trayectoria de los rayos a través de la atmósfera, así como de la composición de esta última (las nubes, el polvo, la humedad y el *smog*) a lo largo de esa trayectoria. La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por el ozono en la atmósfera superior. A una altitud solar de 41.8° , la energía total de la radiación solar directa que incide a nivel del mar en un día claro consta de alrededor de 3% radiación ultravioleta, 38% de visible y 59% de infrarroja.

La parte de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra sin ser dispersada o absorbida se llama *radiación directa*. La radiación solar que es dispersada o vuelta a emitir por los constituyentes de la atmósfera se llama *radiación difusa*. La radiación directa proviene en forma directa del Sol, siguiendo una trayectoria recta, en tanto que la difusa viene desde todas las direcciones del cielo. La radiación completa que llega al suelo en un día nublado es difusa. En general, la radiación que llega a una superficie consta de tres componentes: radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada sobre la superficie desde las superficies circundantes (figura 12-47). Las superficies comunes, como la hierba, los árboles, las rocas y el concreto reflejan alrededor de 20% de la radiación absorbiendo al mismo tiempo el resto. Sin embargo, las superficies cubiertas de nieve reflejan 70% de la radiación incidente. La radiación que incide sobre una superficie que no está expuesta directamente al Sol consta de radiación difusa y reflejada. Por lo tanto, al mediodía solar las radiaciones solares que inciden sobre las superficies al este, el oeste y el norte de una casa que da el frente hacia el sur son idénticas, ya que todas constan de las componentes difusa y reflejada. En este caso, la diferencia entre la radiación que incide sobre las paredes sur y norte dan la magnitud de la radiación directa que incide sobre la pared sur.

Cuando la radiación solar choca contra una superficie de vidrio, parte de ella (alrededor de 8% para un vidrio transparente sin recubrimiento) es reflejada de regreso al exterior, parte de ella (de 5 a 50%, dependiendo de la composición y espesor) es absorbida dentro del vidrio y el resto es transmitida hacia el interior, como se muestra en la figura 12-48. El principio de conservación de la energía requiere que la suma de las radiaciones solares transmitida, reflejada y absorbida sea igual a la radiación solar incidente; es decir,

$$\tau_s + \rho_s + \alpha_s = 1$$

en donde τ_s es la transmisividad, ρ_s es la reflectividad y α_s es la absorptividad del vidrio para la energía solar, las cuales son las fracciones transmitida, reflejada y absorbida de la radiación solar incidente, respectivamente. El vidrio transparente estándar para ventana de doble resistencia, una sola hoja y 3 mm ($\frac{1}{8}$ in) de espesor, transmite 86%, refleja 8% y absorbe 6% de la radiación que incide sobre él. Las propiedades relativas a la radiación de los materiales suele darse para la incidencia perpendicular, pero también se puede usar para la radiación que incide en otros ángulos, dado que la transmisividad, reflectividad y absorptividad de los materiales para encristalado permanecen en esencia constantes para ángulos de incidencia de hasta más o menos 60° con respecto a la normal.



1. Lámina regular de 3 mm
2. Placa/flotador gris absorbente del calor de 6 mm
3. Placa/flotador verde absorbente del calor de 6 mm

FIGURA 12-46

Variación de la transmitancia del vidrio arquitectónico típico con la longitud de onda (tomado del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE, Cap. 27, Fig. 11).

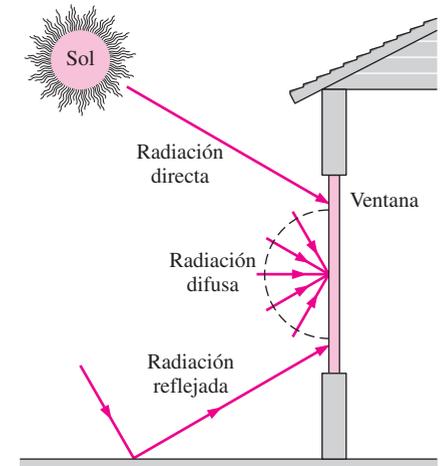


FIGURA 12-47

Componentes directa, difusa y reflejada de la radiación solar que incide sobre una ventana.

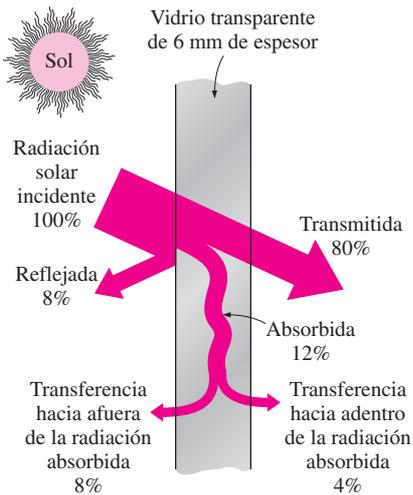


FIGURA 12-48

Distribución de la radiación solar que incide sobre un vidrio transparente.

En la tabla 12-4 se da la variación por horas de la radiación que incide sobre las paredes y ventanas de una casa. La radiación que se transmite hacia el interior es absorbida y reflejada en forma parcial cada vez que choca contra una superficie, pero llega el momento en que toda ella es absorbida como calor sensible por los muebles, las paredes, la gente, etcétera. Por lo tanto, la energía solar transmitida hacia el interior de un edificio representa una ganancia de calor para éste. Asimismo, la radiación solar absorbida por el vidrio es transferida hacia el interior y hacia el exterior por convección y radiación. La suma de la radiación solar *transmitida* y la porción de la radiación *absorbida* que fluye hacia el interior constituye la **ganancia de calor solar** del edificio.

La fracción de la radiación solar incidente que entra a través del encristalado se llama **coeficiente de ganancia de calor solar** (SHGC por sus siglas en inglés) y se expresa como

$$\text{SHGC} = \frac{\text{Ganancia de calor solar a través de la ventana}}{\text{Radiación solar que incide sobre la ventana}} \quad (12-55)$$

$$= \frac{\dot{q}_{\text{solar, ganancia}}}{\dot{q}_{\text{solar, incidente}}} = \tau_s + f_i \alpha_s$$

en donde α_s es la absorptividad solar del vidrio y f_i es la fracción de la radiación solar absorbida que fluye hacia adentro por ese vidrio. Por lo tanto, la cantidad adimensional SHGC es la suma de la fracción transmitida directamente (τ_s) y de la absorbida y vuelta a emitir ($f_i \alpha_s$) de la radiación solar que incide sobre la ventana. El valor de SHGC va desde 0 hasta 1, correspondiendo 1 a la abertura en la pared (o el techo), sin encristalado. Cuando se conoce el SHGC de una ventana, la ganancia total de calor solar a través de ella se determina a partir de

$$\dot{Q}_{\text{solar, ganancia}} = \text{SHGC} \times A_{\text{encristalado}} \times \dot{q}_{\text{solar, incidente}} \quad (\text{W}) \quad (12-56)$$

en donde $A_{\text{encristalado}}$ es el área del encristalado de la ventana y $\dot{q}_{\text{solar, incidente}}$ es el flujo de calor solar que incide sobre la superficie exterior de esta última, en W/m^2 .

Otra manera de expresar las características relativas a la transmisión solar de diferentes clases de encristalado y dispositivos de producción de sombra es compararlos con un material para encristalado bien conocido que pueda servir como un caso base. Esto se hace tomando la hoja de vidrio transparente estándar de doble resistencia y 3 mm ($\frac{1}{8}$ in) de espesor, cuyo SHGC es 0.87, como el *encristalado de referencia* y definiendo un **coeficiente de sombra**, SC, como

$$\text{SC} = \frac{\text{Ganancia de calor solar del producto}}{\text{Ganancia de calor solar del encristalado de referencia}} \quad (12-57)$$

$$= \frac{\text{SHGC}}{\text{SHGC}_{\text{ref}}} = \frac{\text{SHGC}}{0.87} = 1.15 \times \text{SHGC}$$

Por lo tanto, el coeficiente de sombra de una ventana de vidrio transparente de una sola hoja es $\text{SC} = 1$. En la tabla 12-5 se dan los coeficientes de sombra de otros productos de uso común en el ventanaje, para condiciones de diseño de verano. Los valores para las condiciones de diseño de invierno pueden ser ligeramente más bajos en virtud de los coeficientes más altos de transferencia de calor sobre la superficie exterior, debido a los vientos intensos y, como consecuencia, a la mayor rapidez del flujo hacia afuera del calor solar absorbido por el encristalado, pero la diferencia es pequeña.

TABLA 12-4

Variación por horas de la radiación solar que incide sobre varias superficies y los totales diarios durante todo el año, a 40° de latitud (tomado del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE, Cap. 27, tabla 15)

Dirección de la superficie		Radiación solar incidente sobre la superficie, * W/m ²														Total diario	
		Tiempo solar															
		5	6	7	8	9	10	11	12 mediodía	13	14	15	16	17	18		19
Ene.	N	0	0	0	20	43	66	68	71	68	66	43	20	0	0	0	446
	NE	0	0	0	63	47	66	68	71	68	59	43	20	0	0	0	489
	E	0	0	0	402	557	448	222	76	68	59	43	20	0	0	0	1863
	SE	0	0	0	483	811	875	803	647	428	185	48	20	0	0	0	4266
	S	0	0	0	271	579	771	884	922	884	771	579	271	0	0	0	5897
	SO	0	0	0	20	48	185	428	647	803	875	811	483	0	0	0	4266
	O	0	0	0	20	43	59	68	76	222	448	557	402	0	0	0	1863
	NO	0	0	0	20	43	59	68	71	68	66	47	63	0	0	0	489
	Horizontal	0	0	0	51	198	348	448	482	448	348	198	51	0	0	0	2568
Directa	0	0	0	446	753	865	912	926	912	865	753	446	0	0	0	—	
Abr.	N	0	41	57	79	97	110	120	122	120	110	97	79	57	41	0	1117
	NE	0	262	508	462	291	134	123	122	120	110	97	77	52	17	0	2347
	E	0	321	728	810	732	552	293	131	120	110	97	77	52	17	0	4006
	SE	0	189	518	682	736	699	582	392	187	116	97	77	52	17	0	4323
	S	0	18	59	149	333	437	528	559	528	437	333	149	59	18	0	3536
	SO	0	17	52	77	97	116	187	392	582	699	736	682	518	189	0	4323
	O	0	17	52	77	97	110	120	392	293	552	732	810	728	321	0	4006
	NO	0	17	52	77	97	110	120	122	123	134	291	462	508	262	0	2347
	Horizontal	0	39	222	447	640	786	880	911	880	786	640	447	222	39	0	6938
Directa	0	282	651	794	864	901	919	925	919	901	864	794	651	282	0	—	
Julio	N	3	133	109	103	117	126	134	138	134	126	117	103	109	133	3	1621
	NE	8	454	590	540	383	203	144	138	134	126	114	95	71	39	0	3068
	E	7	498	739	782	701	531	294	149	134	126	114	95	71	39	0	4313
	SE	2	248	460	580	617	576	460	291	155	131	114	95	71	39	0	3849
	S	0	39	76	108	190	292	369	395	369	292	190	108	76	39	0	2552
	SO	0	39	71	95	114	131	155	291	460	576	617	580	460	248	2	3849
	O	0	39	71	95	114	126	134	149	294	531	701	782	739	498	7	4313
	NO	0	39	71	95	114	126	134	138	144	203	383	540	590	454	8	3068
	Horizontal	1	115	320	528	702	838	922	949	922	838	702	528	320	115	1	3902
Directa	7	434	656	762	818	850	866	871	866	850	818	762	656	434	7	—	
Oct.	N	0	0	7	40	62	77	87	90	87	77	62	40	7	0	0	453
	NE	0	0	74	178	84	80	87	90	87	87	62	40	7	0	0	869
	E	0	0	163	626	652	505	256	97	87	87	62	40	7	0	0	2578
	SE	0	0	152	680	853	864	770	599	364	137	66	40	7	0	0	4543
	S	0	0	44	321	547	711	813	847	813	711	547	321	44	0	0	5731
	SO	0	0	7	40	66	137	364	599	770	864	853	680	152	0	0	4543
	O	0	0	7	40	62	87	87	97	256	505	652	626	163	0	0	2578
	NO	0	0	7	40	62	87	87	90	87	80	84	178	74	0	0	869
	Horizontal	0	0	14	156	351	509	608	640	608	509	351	156	14	0	0	3917
Directa	0	0	152	643	811	884	917	927	917	884	811	643	152	0	0	—	

*Multiplíquese por 0.3171 para convertir en Btu/h · ft².

Los valores dados son para el día 21 del mes, para días promedios sin nubes. Los valores pueden ser hasta 15% más altos a grandes elevaciones con cielos muy claros y hasta 30% más bajos en lugares muy húmedos con atmósferas industriales muy sucias. Los totales diarios se obtuvieron aplicando la regla de Simpson para la integración, con intervalos de tiempo de 10 min. Se supuso que la reflectancia solar del suelo es 0.2, lo cual es válido para el concreto viejo, la roca triturada y la hierba verde brillante. Para un lugar específico, utilícen los datos sobre la radiación solar obtenidos para ese lugar. La dirección de una superficie indica la orientación de una superficie vertical. Por ejemplo, O representa la radiación solar que incide sobre una pared que da el frente al oeste por unidad de área de la misma.

El tiempo solar puede estar desviado del local. El mediodía solar en un lugar es el tiempo en el que el Sol se encuentra en la parte más alta (y, por consiguiente, cuando las sombras son más cortas). Los datos sobre la radiación solar son simétricos con respecto al mediodía solar: el valor sobre una pared occidental antes del mediodía solar es igual al valor sobre una pared oriental dos horas después de ese mediodía.

TABLA 12-5

Coefficiente de sombra SC y transmisividad solar τ_{solar} para algunos tipos comunes de vidrio, para condiciones de diseño de verano (tomado del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE, Cap. 27, tabla 11).

Tipo de encristalado	Espesor nominal		τ_{solar}	SC*
	mm	in		
a) Encristalado sencillo				
Transparente	3	$\frac{1}{8}$	0.86	1.0
	6	$\frac{1}{4}$	0.78	0.95
	10	$\frac{3}{8}$	0.72	0.92
	13	$\frac{1}{2}$	0.67	0.88
Absorbente de calor	3	$\frac{1}{8}$	0.64	0.85
	6	$\frac{1}{4}$	0.46	0.73
	10	$\frac{3}{8}$	0.33	0.64
	13	$\frac{1}{2}$	0.24	0.58
b) Encristalado doble				
Transparente dentro, transparente afuera	3 ^a	$\frac{1}{8}$	0.71 ^b	0.88
Transparente dentro, absorbente del calor afuera ^c	6	$\frac{1}{4}$	0.61	0.82
	6	$\frac{1}{4}$	0.36	0.58

*Multiplíquese por 0.87 para obtener el SHGC.

^aEspesor de cada hoja de vidrio.

^bTransmitancia combinada para la unidad armada.

^cSe refiere al vidrio flotado absorbente del calor teñido de gris, bronce y verde.

Note que entre mayor es el coeficiente de sombra, menor es el efecto de producción de sombra y, como consecuencia, mayor es la ganancia de calor solar. Un material de encristalado con un coeficiente grande de sombra dejará entrar una fracción grande de radiación solar.

Los dispositivos para producir sombra se clasifican como *de sombreado interno* y *de sombreado externo*, dependiendo de si tal dispositivo se coloca *adentro* o *afuera*. Los dispositivos externos para producir sombra son más eficaces en la reducción de la ganancia de calor solar, dado que interceptan los rayos del Sol antes de que lleguen al encristalado. Se puede reducir la ganancia de calor solar a través de una ventana en tanto como un 80% por medio de la producción de sombra exterior. Los voladizos del techo se han usado durante mucho tiempo para la producción de sombra afuera de las ventanas. El Sol está alto en el horizonte en el verano y bajo en el invierno. Un voladizo del techo de tamaño apropiado o una proyección horizontal bloquean por completo los rayos solares en el verano, en tanto que dejan entrar la mayor parte de ellos en el invierno, como se muestra en la figura 12-49. Estas estructuras para la producción de sombra pueden reducir en forma considerable la ganancia de calor solar en las ventanas que dan hacia el sur, hacia el sureste y hacia el suroeste, en el hemisferio norte. También se le puede dar sombra a una ventana desde el exterior por medio de proyecciones arquitectónicas verticales u horizontales, mallas contra insectos, pantallas para la producción de sombra y pantallas solares. Para que sean eficaces, el aire debe tener libertad de moverse alrededor del dispositivo exterior para llevarse el calor absorbido por los materiales de producción de sombra y el encristalado.

En la mayor parte de las ventanas se usa algún tipo de sombreado interno para proporcionar intimidad y efectos estéticos, así como para tener algún control sobre la ganancia de calor solar. Los dispositivos internos para producir sombra reducen esta ganancia mediante la reflexión de la radiación solar transmitida a través del encristalado antes de que pueda ser absorbida y convertida en calor en el edificio.

Los *cortinajes* reducen las cargas anuales de calefacción y enfriamiento de un edificio de un 5 a un 20%, dependiendo de qué tipo sean y de los hábitos del usuario. En verano reducen la ganancia de calor principalmente al reflejar la radiación solar directa (figura 12-50). El espacio semicerrado de aire que forman los cortinajes sirve como una barrera adicional contra la transferencia de calor, dando por resultado un factor U más bajo para la ventana y, de este modo, una menor velocidad de transferencia de calor en el verano y el invierno. Las propiedades ópticas solares de los cortinajes se pueden medir con exactitud u obtenerse directamente de los fabricantes. El coeficiente de sombra de los cortinajes depende del factor de apertura, el cual es la razón entre el área abierta a través de las fibras que permite que los rayos solares pasen con libertad y el área total de la tela. Las telas de tejido apretado permiten el paso de poca radiación directa y, como consecuencia, tienen un factor de apertura pequeño. La *reflectancia* de la superficie del cortinaje que queda enfrente del encristalado tiene un efecto importante sobre la cantidad de ganancia de calor solar. Los cortinajes *de color claro* hechos de telas con tejido cerrado o apretado maximizan la reflexión y, por ende, minimizan la ganancia solar. Por otra parte, los cortinajes *de color oscuro* hechos con telas de tejido abierto o semiabierto minimizan la reflexión y, como consecuencia, maximizan la ganancia solar.

Los coeficientes de sombra de las cortinas también dependen de la manera en que se cuelgan. Por lo común, el ancho del cortinaje usado duplica el ancho del área cubierta con el fin de permitir que las cortinas se doblen y darles

su apariencia “amplia” u “ondulada”. Una cortina plana se comporta como una persiana común para ventana. Una cortina de este tipo tiene una reflectancia más alta y, por tanto, un coeficiente inferior de sombra que una amplia.

Los *dispositivos externos pasivos para producir sombra*, como los voladizos y los enristalados teñidos, no requieren operación y suministran un servicio confiable durante mucho tiempo, sin degradación significativa durante su vida en servicio. Su operación no depende de una persona o de un sistema automatizado y se consideran plenamente eficaces cuando se determinan la carga pico de enfriamiento y el uso anual de energía. Por otra parte, la eficacia de los dispositivos de operación manual varía mucho, dependiendo de los hábitos del usuario y debe considerarse esta variación al evaluar el rendimiento.

La función primaria de un dispositivo interior para producir sombra es suministrar *comodidad térmica* para los ocupantes. Un vidrio de ventana no sombreado dejará entrar la mayor parte de la radiación solar incidente y, asimismo, disipa parte de la energía solar que absorbe por la emisión de radiación infrarroja hacia el cuarto. La radiación emitida y la luz solar directa transmitida pueden incomodar a los ocupantes cercanos a la ventana. En invierno la temperatura del vidrio es más baja que la del aire del cuarto, causando una pérdida excesiva de calor por radiación de parte de los ocupantes. Un dispositivo para producir sombra permite el control de la radiación solar directa y de la infrarroja, suministrando al mismo tiempo varios grados de intimidad y de visión hacia afuera. El dispositivo también está a una temperatura más alta que el vidrio en invierno y, de este modo, reduce las pérdidas por radiación de los ocupantes. El *resplandor* de los cortinajes se puede minimizar usando colores distintos al blanco. Los dispositivos para interiores, en especial los cortinajes hechos de tela de tejido cerrado, son eficaces en la reducción de los *sonidos* que se originan en el cuarto, pero no lo son tanto contra los sonidos que provienen del exterior.

El tipo de clima en una zona suele regir el tipo de ventanas que deben usarse en los edificios. En los *climas fríos*, en donde la carga de calefacción es mucho mayor que la de enfriamiento, las ventanas deben tener la transmisividad más alta para todo el espectro solar y una alta reflectividad (o baja emisividad) para la radiación infrarroja lejana emitida por las paredes y muebles del cuarto. Las ventanas de baja emisividad resultan muy adecuadas para ese tipo de edificios dominados por la calefacción. Las ventanas diseñadas y operadas en forma adecuada permiten que entre más calor en el edificio durante una temporada de calefacción que el que se pierde, convirtiéndolas en aportadoras de energía, en lugar de perdedoras de ésta. En los *climas cálidos*, en donde la carga de enfriamiento es mucho más grande que la de calefacción, las ventanas deben permitir que entre la radiación solar visible (la luz), pero deben bloquear la radiación solar infrarroja. Ese tipo de ventanas pueden reducir la ganancia de calor solar en un 60%, sin pérdida apreciable en la luz diurna. Se obtiene una aproximación de este comportamiento por medio de enristalados de ventanas recubiertos con una película absorbente del calor por la parte de afuera y una película de baja emisividad por dentro (figura 12-51). Las ventanas seleccionadas en forma apropiada pueden reducir la carga de enfriamiento de un 15 a un 30%, en comparación con las equipadas con vidrio transparente.

Note que la transferencia de calor por radiación entre un cuarto y su ventana es proporcional a la emisividad de la superficie del vidrio que da frente al cuarto, $\varepsilon_{\text{vidrio}}$, y se puede expresar como

$$\dot{Q}_{\text{rad, cuarto-ventana}} = \varepsilon_{\text{vidrio}} A_{\text{vidrio}} \sigma (T_{\text{cuarto}}^4 - T_{\text{ventana}}^4) \quad (12-58)$$

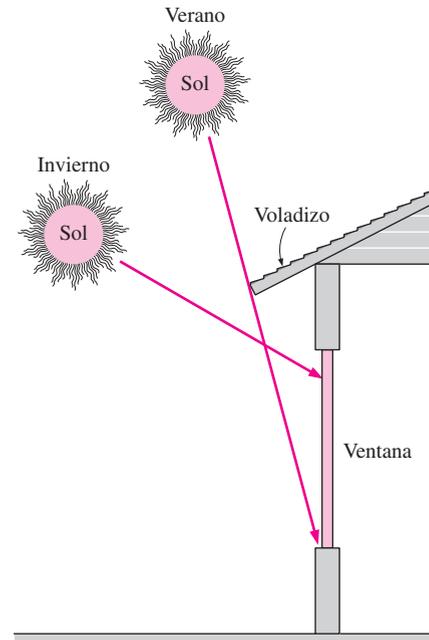


FIGURA 12-49

Un voladizo de tamaño apropiado bloquea por completo los rayos del Sol en verano, en tanto que los deja entrar en invierno.

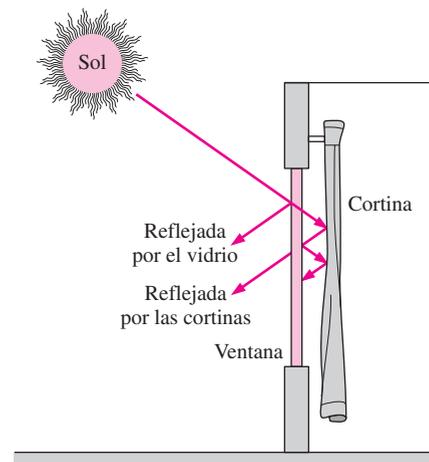


FIGURA 12-50

Los cortinajes reducen la ganancia de calor en el verano al reflejar la radiación solar, y reducen la pérdida de calor en invierno al formar un espacio de aire antes de la ventana.

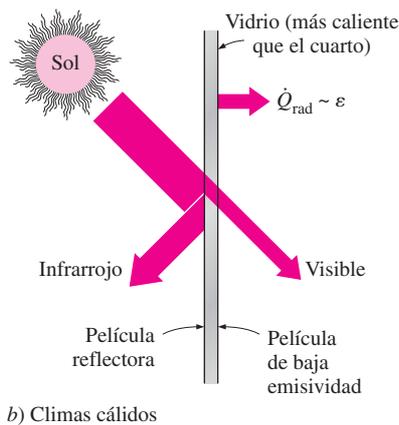
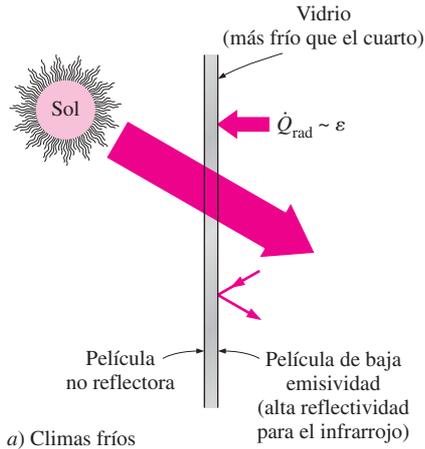


FIGURA 12-51

La transferencia de calor por radiación entre un cuarto y sus ventanas es proporcional a la emisividad de la superficie de vidrio, y los recubrimientos de baja emisividad sobre la superficie interior de las ventanas reducen la pérdida de calor en el invierno y la ganancia de calor en el verano.

Por lo tanto, un vidrio interior de baja emisividad reducirá la pérdida de calor por radiación en el verano ($T_{\text{vidrio}} < T_{\text{cuarto}}$) y la ganancia de calor por el mismo medio en el invierno ($T_{\text{vidrio}} > T_{\text{cuarto}}$).

El vidrio teñido y el recubierto con películas reflectoras reducen la ganancia del calor solar en el verano y la pérdida del calor en el invierno. Las ganancias o pérdidas de calor por conducción se pueden minimizar usando ventanas de hojas múltiples. Las ventanas de hoja doble suelen requerirse en climas en los que la temperatura de diseño en invierno es menor a 7°C (45°F). Las ventanas de hoja doble con películas teñidas o reflectoras son de uso común en los edificios con ventanas de áreas grandes. Para los cuartos de exhibición se prefiere el vidrio transparente, ya que permite una visibilidad máxima desde el exterior, pero en los edificios de oficinas se prefieren los vidrios coloreados de bronce, gris y verde, dado que proporcionan una intimidad considerable reduciendo al mismo tiempo el resplandor.

EJEMPLO 12-6 Instalación de películas reflectoras sobre las ventanas

Una fábrica ubicada a 40° de latitud N tiene un área de en cristalado de 40 m^2 que consta de ventanas de hoja doble hechas de vidrio transparente ($\text{SHGC} = 0.766$). Con el fin de reducir la ganancia de calor solar en verano, se considera una película reflectora que reducirá el SHGC hasta 0.261. La temporada de enfriamiento abarca los meses de junio, julio, agosto y septiembre, y la de calefacción de octubre hasta abril. Los flujos de calor solar diarios promedio que inciden sobre el lado oeste en esta latitud son 1.86, 2.66, 3.43, 4.00, 4.36, 5.13, 4.31, 3.93, 3.28, 2.80, 1.84 y $1.54 \text{ kWh/día} \cdot \text{m}^2$, para enero hasta diciembre, respectivamente. Asimismo, los costos unitarios de la electricidad y el gas natural son de 0.08 dólar/kWh y 0.50 dólar/therm, respectivamente. Si el coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) del sistema de enfriamiento es 2.5 y la eficiencia del hogar es 0.8, determine los ahorros netos en los costos anuales debidos a la instalación del recubrimiento reflector sobre las ventanas. También determine el periodo simple de recuperación de la inversión si el costo de instalación de la película reflectora es de 20 dólares/ m^2 (figura 12-52).

SOLUCIÓN Deben determinarse los ahorros netos en los costos anuales debidos a la instalación de película reflectora sobre las ventanas que dan al oeste de un edificio y el periodo simple de recuperación de la inversión.

Suposiciones 1 Los cálculos que se dan a continuación son para un año promedio. 2 Los costos unitarios de la electricidad y del gas natural permanecen constantes.

Análisis Utilizando los promedios diarios para cada mes y observando el número de días de cada uno de éstos, se determina que los flujos totales de calor solar que inciden sobre el en cristalado durante los meses de verano y de invierno son

$$Q_{\text{solar, verano}} = 5.13 \times 30 + 4.31 \times 31 + 3.93 \times 31 + 3.28 \times 30 = 508 \text{ kWh/año}$$

$$Q_{\text{solar, invierno}} = 2.80 \times 31 + 1.84 \times 30 + 1.54 \times 31 + 1.86 \times 31$$

$$+ 2.66 \times 28 + 3.43 \times 31 + 4.00 \times 30$$

$$= 548 \text{ kWh/año}$$

Entonces la disminución en la carga anual de enfriamiento y el aumento en la carga anual de calefacción debido a la película reflectora quedan

$$\text{Disminución en la carga de enfriamiento} = Q_{\text{solar, verano}} A_{\text{en cristalado}} (\text{SHGC}_{\text{sin película}} - \text{SHGC}_{\text{con película}})$$

$$= (508 \text{ kWh/año})(40 \text{ m}^2)(0.766 - 0.261)$$

$$= 10\,262 \text{ kWh/año}$$

Aumento en la carga de calefacción = $Q_{\text{solar, invierno}} A_{\text{encristalado}} (\text{SHGC}_{\text{sin película}} - \text{SHGC}_{\text{con película}})$
 = $(548 \text{ kWh/año})(40 \text{ m}^2)(0.766 - 0.261)$
 = $11\,070 \text{ kWh/año} = 377.7 \text{ therms/año}$

ya que $1 \text{ therm} = 29.31 \text{ kWh}$. La disminución correspondiente en los costos de enfriamiento y el aumento en los de calefacción son

Disminución en los costos de enfriamiento = $(\text{Disminución en la carga de enfriamiento})(\text{Costo unitario de la electricidad})/\text{COP}$
 = $(10\,262 \text{ kWh/año})(0.08 \text{ dólar/kWh})/2.5 = 328 \text{ dólares/año}$

Aumento en los costos de calefacción = $(\text{Aumento en la carga de calefacción})(\text{Costo unitario del combustible})/\text{Eficiencia}$
 = $(377.7 \text{ therms/año})(0.50 \text{ dólar/therm})/0.80 = 236 \text{ dólares/año}$

Entonces, los ahorros netos en los costos anuales debidos a la película reflectora quedan

Ahorros en los costos = $\text{Disminución en los costos de enfriamiento} - \text{Aumento en los costos de calefacción}$
 = $328 \text{ dólares} - 236 \text{ dólares} = \mathbf{92 \text{ dólares/año}}$

El costo de implantación referente a la instalación de las películas es

Costo de implantación = $(20 \text{ dólares/m}^2)(40 \text{ m}^2) = 800 \text{ dólares}$

Esto da un periodo simple de recuperación de la inversión de

Periodo simple de recuperación = $\frac{\text{Costo de implantación}}{\text{Ahorros en los costos anuales}} = \frac{800 \text{ dólares}}{92 \text{ dólares/año}} = \mathbf{8.7 \text{ años}}$

Discusión En este caso la película reflectora se pagará por sí misma en alrededor de nueve años. Esto es inaceptable para la mayor parte de los fabricantes, ya que no suelen interesarse en medidas para la conservación de la energía que se paguen por sí mismas en más de tres años. Pero la mejora en la comodidad térmica y, en consecuencia, el aumento resultante en la productividad con frecuencia hace que valga la pena instalar la película reflectora.

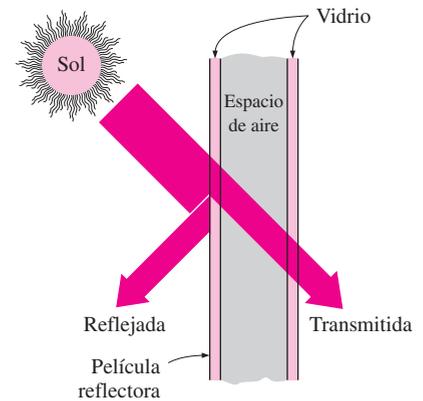


FIGURA 12-52

Esquema para el ejemplo 12-6.

RESUMEN

La radiación se propaga en forma de ondas electromagnéticas. La *frecuencia* ν y la *longitud de onda* λ de las ondas electromagnéticas en un medio están relacionadas por $\lambda = c/\nu$, donde c es la velocidad de propagación en ese medio. Toda la materia emite de manera continua *radiación térmica*, como resultado de los movimientos de vibración y de rotación de las moléculas, átomos y electrones de una sustancia.

Un *cuerpo negro* se define como un emisor y absorbente perfecto de la radiación. A una temperatura y longitud de onda específicas, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Un cuerpo negro absorbe *toda* la radiación incidente, sin importar la longitud de onda y la dirección. La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial se llama *poder de*

emisión de cuerpo negro E_b y se expresa por la *ley de Stefan-Boltzmann* como

$$E_b(T) = \sigma T^4$$

en donde $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la *constante de Stefan-Boltzmann* y T es la temperatura absoluta de la superficie en K. A cualquier temperatura específica, el poder de emisión espectral de cuerpo negro $E_{b\lambda}$ se incrementa con la longitud de onda, alcanza un pico y, a continuación, disminuye al incrementarse la longitud de onda. La longitud de onda a la cual se presenta el pico para una temperatura especificada se expresa por la *ley del desplazamiento de Wien* como

$$(\lambda T)_{\text{poder máx}} = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

La función de radiación f_λ de cuerpo negro representa la fracción de la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura T en la banda de longitudes de onda de $\lambda = 0$ hasta λ . La fracción de energía de radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura T sobre una banda finita de longitudes de onda desde $\lambda = \lambda_1$ hasta $\lambda = \lambda_2$ se determina a partir de

$$f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) = f_{\lambda_2}(T) - f_{\lambda_1}(T)$$

en donde $f_{\lambda_1}(T)$ y $f_{\lambda_2}(T)$ son las funciones de radiación de cuerpo negro correspondientes a $\lambda_1 T$ y $\lambda_2 T$, respectivamente.

La magnitud de un ángulo de visión en el espacio se describe por el ángulo sólido expresado como $d\omega = dA_n/r^2$. La intensidad de radiación $I_e(\theta, \phi)$, se define como la razón a la cual la energía de radiación se emite en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área normal a esta dirección y por unidad de ángulo sólido alrededor de esta última. El flujo de radiación es el poder de emisión E y se expresa como

$$E = \int_{\text{hemisferio}} dE = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

Para una superficie difusamente emisora, la intensidad es independiente de la dirección, por tanto,

$$E = \pi I_e$$

Para un cuerpo negro, tenemos

$$E_b = \pi I_b \quad \text{y} \quad I_b(T) = \frac{E_b(T)}{\pi} = \frac{\sigma T^4}{\pi}$$

El flujo incidente de radiación sobre una superficie desde todas direcciones es la irradiación G y para la radiación difusamente incidente de intensidad I_i se expresa como

$$G = \pi I_i$$

La razón a la cual la energía de radiación sale de una unidad de área en todas direcciones es la radiosidad J y para una superficie que es tanto emisora difusa como reflectora difusa se expresa como

$$J = \pi I_{e+r}$$

en donde I_{e+r} es la suma de las intensidades emitida y reflejada. Las cantidades emitidas espectrales están relacionadas con las cantidades totales como

$$I_e = \int_0^\infty I_{\lambda,e} d\lambda \quad \text{y} \quad E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$

Para una superficie emisora en forma difusiva y para un cuerpo negro, éstas se reducen a

$$E_\lambda = \pi I_{\lambda,e} \quad \text{y} \quad E_{b\lambda}(\lambda, T) = \pi I_{b\lambda}(\lambda, T)$$

La emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Las diferentes emisividades se definen como

Emisividad direccional espectral:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b\lambda}(\lambda, T)}$$

Emisividad direccional total:

$$\varepsilon_\theta(\theta, \phi, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)}$$

Emisividad hemisférica espectral:

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{b\lambda}(\lambda, T)}$$

Emisividad hemisférica total:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T) E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}$$

La emisividad también se puede expresar como una función escalonada, dividiendo el espectro en un número suficiente de bandas de longitudes de onda de emisividad constante como

$$\varepsilon(T) = \varepsilon_1 f_{0-\lambda_1}(T) + \varepsilon_2 f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) + \varepsilon_3 f_{\lambda_2-\infty}(T)$$

La emisividad hemisférica total ε de una superficie es la emisividad promedio en todas las direcciones y longitudes de onda.

Cuando la radiación choca contra una superficie, parte de ella es absorbida, otra es reflejada y la restante, si la hay, es transmitida. La fracción de la radiación incidente (intensidad I o irradiación G) absorbida por la superficie se llama *absortividad*, la reflejada por esa superficie se conoce como *reflectividad* y a la transmitida se le denomina *transmisividad*. Las diversas absorptividades, reflectividades y transmisividades para un medio se expresan como

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,\text{abs}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad \text{y} \quad \rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,\text{ref}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)}$$

$$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,\text{abs}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}, \quad \rho_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,\text{ref}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}, \quad \text{y} \quad \tau_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,\text{tr}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}$$

$$\alpha = \frac{G_{\text{abs}}}{G}, \quad \rho = \frac{G_{\text{ref}}}{G}, \quad \text{y} \quad \tau = \frac{G_{\text{tr}}}{G}$$

La consideración de la dependencia de las propiedades con respecto a la longitud de onda y la dirección hace que los cálculos acerca de la radiación sean muy complicados. Por lo tanto, las aproximaciones *gris* y *difusa* se utilizan en forma común en los cálculos relativos a la radiación. Se dice que una superficie es *difusa* si sus propiedades son independientes de la dirección y *gris* si sus propiedades son independientes de la longitud de onda.

La suma de las fracciones de energía de radiación absorbida, reflejada y transmitida debe ser igual a la unidad,

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Para las superficies *opacas*, $\tau = 0$ y, por tanto,

$$\alpha + \rho = 1$$

Por sencillez suele suponerse que las superficies reflejan de una manera perfectamente *especular* o *difusa*. En la *reflexión especular* el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia del haz de radiación. En la *reflexión difusa*, la radiación se refleja por igual en todas direcciones. La reflexión desde las superficies lisas y pulidas se aproxima a la especular, en tanto que aquella que se produce desde las superficies ásperas se aproxima a la difusa. La *ley de Kirchhoff* de la radiación se expresa como

$$\varepsilon_{\lambda, \theta}(T) = \alpha_{\lambda, \theta}(T), \quad \varepsilon_{\lambda}(T) = \alpha_{\lambda}(T), \quad \text{y} \quad \varepsilon(T) = \alpha(T)$$

Las moléculas de gas así como las partículas suspendidas en la atmósfera emiten radiación y la absorben. La atmósfera

se puede considerar como un cuerpo negro a alguna temperatura ficticia más baja, llamada *temperatura efectiva del cielo* T_{cielo} que emite una cantidad equivalente de energía de radiación,

$$G_{\text{cielo}} = \sigma T_{\text{cielo}}^4$$

La razón neta de transferencia de calor por radiación hacia una superficie expuesta a la radiación solar y atmosférica se determina basándose en un balance de energía expresado como

$$\dot{q}_{\text{neto, rad}} = \alpha_s G_{\text{solar}} + \varepsilon \sigma (T_{\text{cielo}}^4 - T_s^4)$$

en donde T_s es la temperatura superficial en K y ε es la emisividad de la superficie a la temperatura ambiente.

BIBLIOGRAFÍA Y LECTURAS SUGERIDAS

1. American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, *Handbook of Fundamentals*, Atlanta, ASHRAE, 1993.
2. A. G. Dietz, "Diathermanous Materials and Properties of Surfaces", en *Space Heating with Solar Energy*, editor R. W. Hamilton, Cambridge, MA: MIT Press, 1954.
3. J. A. Duffy y W. A. Beckman, *Solar Energy Thermal Process*. Nueva York: John Wiley & Sons, 1974.
4. H. C. Hottel. "Radiant Heat Transmission", en *Heat Transmission*, 3a. ed., editor W. H. McAdams, Nueva York: McGraw-Hill, 1954.
5. M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Nueva York: McGraw-Hill, 1993.
6. M. Planck, *The Theory of Heat Radiation*, Nueva York: Dover, 1959.
7. W. Sieber, *Zeitschrift für Technische Physics* 22 (1941), págs. 130-135.
8. R. Siegel y J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3a. ed., Washington, D. C.: Hemisphere, 1992.
9. Y. S. Touloukain y D. P. DeWitt, "Nonmetallic Solids", en *Thermal Radiative Properties*, Vol. 8, Nueva York: IFI/Plenum, 1970.
10. Y. S. Touloukain y D. P. DeWitt, "Metallic Elements and Alloys", en *Thermal Radiative Properties*, Vol. 7, Nueva York: IFI/Plenum, 1970.

PROBLEMAS*

Radiación electromagnética y térmica

12-1C ¿Qué es una onda electromagnética? ¿En qué difiere de una onda de sonido?

12-2C ¿Por cuáles propiedades se caracteriza una onda electromagnética? ¿Cómo se relacionan estas propiedades entre sí?

* Los problemas designados por una "C" son preguntas de concepto y se alienta a los estudiantes a darles respuesta. Los designados por una "I" están en unidades inglesas y los usuarios del SI pueden ignorarlos. Los problemas con un icono de CD-EES  se resuelven usando el EES, y las soluciones completas junto con los estudios paramétricos se incluyen en el CD que acompaña a este texto. Los problemas con un icono de computadora-EES, , son de naturaleza detallada y se pretende que se resuelvan con una computadora, de preferencia usando el software de EES que acompaña a este texto.

12-3C ¿Qué es luz visible? ¿En qué se diferencia con respecto a las otras formas de radiación electromagnética?

12-4C ¿En qué difieren la radiación ultravioleta y la infrarroja? ¿Piensa el lector que su cuerpo emite alguna radiación en el rango ultravioleta? Explique.

12-5C ¿Qué es radiación térmica? ¿En qué se diferencia con respecto a las otras formas de radiación electromagnética?

12-6C ¿Cuál es la causa del color? ¿Por qué el ojo ve azules algunos objetos en tanto que otros los ve rojos? ¿Está relacionado el color de una superficie a la temperatura ambiente con la radiación que emite?

12-7C ¿Por qué por lo común la radiación se trata como un fenómeno superficial?

12-8C ¿Por qué los esquiadores resultan quemados por el Sol con tanta facilidad?

12-9C ¿En qué se diferencia la cocción con microondas de la cocción convencional?

12-10 La velocidad de la luz en el vacío se expresa como 3.0×10^8 m/s. Determine la velocidad de la luz en el aire ($n = 1$), en el agua ($n = 1.33$) y en el vidrio ($n = 1.5$).

12-11 Se genera electricidad y se transmite en las líneas de transmisión a una frecuencia de 60 Hz (1 Hz = 1 ciclo por segundo). Determine la longitud de las ondas electromagnéticas generadas por el paso de la electricidad en las líneas de transmisión.

12-12 Se diseña un horno de microondas para operar a una frecuencia de 2.8×10^9 Hz. Determine la longitud de onda de las microondas y su energía.

12-13 Una estación de radio está emitiendo ondas de radio a una longitud de onda de 200 m. Determine la frecuencia de las ondas. *Respuesta: 1.5×10^6 Hz*

12-14 Se diseña un teléfono inalámbrico para operar a una frecuencia de 8.5×10^8 Hz. Determine la longitud de onda de estas ondas telefónicas.

Radiación de cuerpo negro

12-15C ¿Qué es un cuerpo negro? ¿En realidad existe un cuerpo negro?

12-16C Defina los poderes de emisión total y espectral de un cuerpo negro. ¿Cómo están relacionados entre sí? ¿En qué difieren?

12-17C ¿Por qué definimos la función de radiación de cuerpo negro? ¿Qué representa? ¿Para qué se usa?

12-18C Considere dos cuerpos idénticos, uno a 1 000 K y el otro a 1 500 K. ¿Cuál de los dos cuerpos emite más radiación en la región de las longitudes de onda más cortas? ¿Cuál de los dos cuerpos emite más radiación a una longitud de onda de $20 \mu\text{m}$?

12-19 Considere una superficie a una temperatura uniforme de 800 K. Determine la razón máxima de radiación térmica que puede ser emitida por esta superficie, en W/m^2 .

12-20 Considere un cuerpo cúbico de $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ a 750 K suspendido en el aire. Suponiendo que el cuerpo se aproxima mucho a un cuerpo negro, determine *a*) la razón a la cual el cubo emite energía de radiación, en W, y *b*) el poder de emisión espectral de cuerpo negro a una longitud de onda de $4 \mu\text{m}$.

12-21I El Sol se puede considerar como un cuerpo negro a una temperatura superficial efectiva de 10 400 R. Determine la razón a la cual el Sol emite radiación de energía de radiación infrarroja ($\lambda = 0.76\text{--}100 \mu\text{m}$), en $\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2$.

12-22  El Sol se puede considerar como un cuerpo negro a 5 780 K. Mediante el *software* EES (o cualquier otro semejante), calcule y trace la gráfica del poder de emisión espectral de cuerpo negro $E_{b\lambda}$ del Sol contra la longitud de onda, en el rango de $0.01 \mu\text{m}$ hasta $1 000 \mu\text{m}$. Discuta los resultados.

12-23 La temperatura del filamento de un foco incandescente es de 3 200 K. Considerando el filamento como un cuerpo negro,

determine la fracción de la energía radiante emitida por él que cae en el rango visible. Asimismo, determine la longitud de onda a la cual la emisión de radiación desde el filamento alcanza el valor pico.

12-24  Vuelva a considerar el problema 12-23. Mediante el *software* EES (o cualquier otro semejante), investigue el efecto de la temperatura sobre la fracción de radiación emitida en el rango visible. Suponga que la temperatura de la superficie varía de 1 000 K hasta 4 000 K y trace la gráfica de la fracción de la radiación emitida en el rango visible contra la temperatura superficial.

12-25 Se desea que un foco incandescente emita por lo menos 15% de su energía a longitudes de onda más cortas que $0.8 \mu\text{m}$. Determine la temperatura mínima a la cual debe calentarse su filamento.

12-26 Se desea que la energía de radiación emitida por una fuente luminosa alcance un máximo en el rango azul ($\lambda = 0.47 \mu\text{m}$). Determine la temperatura de esta fuente luminosa y la fracción de la radiación que emite en el rango visible ($\lambda = 0.40\text{--}0.76 \mu\text{m}$).

12-27 Una ventana con un vidrio de 3 mm de espesor transmite 90% de la radiación entre $\lambda = 0.3$ y $3.0 \mu\text{m}$ y, en esencia, es opaca para la radiación de otras longitudes de onda. Determine la razón de la radiación transmitida a través de una ventana con un vidrio de $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, la cual proviene de fuentes de cuerpo negro a *a*) 5 800 K y *b*) 1 000 K.

Respuestas: a) 218 400 kW, b) 55.8 kW

Intensidad de radiación

12-28C ¿Qué representa un ángulo sólido y en qué se diferencia de un ángulo plano? ¿Cuál es el valor de un ángulo sólido asociado con una esfera?

12-29C ¿Cómo se define la intensidad de la radiación emitida? Para una superficie difusamente emisora, ¿de qué manera se relaciona el poder de emisión con la intensidad de la radiación emitida?

12-30C Para una superficie, ¿cómo se define irradiación? Para la radiación difusamente incidente ¿cómo se relaciona la irradiación sobre una superficie con la intensidad de la radiación incidente?

12-31C Para una superficie, ¿cómo se define radiosidad? Para superficies difusamente emisoras y reflectoras, ¿cómo se relaciona la radiosidad con las intensidades de la radiación emitida y reflejada?

12-32C Cuando se conoce la variación de la cantidad de radiación espectral con la longitud de onda, ¿cómo se determina la cantidad total correspondiente?

12-33 Una superficie pequeña de área $A_1 = 8 \text{ cm}^2$ emite radiación como un cuerpo negro a $T_1 = 800 \text{ K}$. Parte de la radiación emitida por A_1 choca contra otra superficie pequeña de área $A_2 = 8 \text{ cm}^2$ y que está orientada como se muestra en la figura. Determine el ángulo sólido subtendido por A_2 cuando se ve desde A_1 y la razón a la cual la radiación emitida por A_1 choca contra A_2 directamente. ¿Cuál sería la respuesta del lector si A_2 estuviera directamente arriba de A_1 a una distancia de 80 cm?

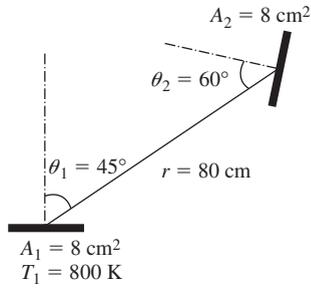


FIGURA P12-33

12-34 Una pequeña superficie circular de área $A_1 = 2 \text{ cm}^2$ ubicada en el centro de una esfera de 2 m de diámetro emite radiación como un cuerpo negro a $T_1 = 1000 \text{ K}$. Determine la razón a la cual está emergiendo energía de radiación a través de un agujero con diámetro $D_2 = 1 \text{ cm}$ ubicado a) en la parte superior de la esfera directamente arriba de A_1 y b) hacia un lado de la esfera en tal forma que la recta que una los centros de A_1 y A_2 forme un ángulo de 45° con la superficie A_1 .

12-35 Repita el problema 12-32 para una esfera de 4 m de diámetro.

12-36 Una superficie pequeña de área $A = 1 \text{ cm}^2$ emite radiación como un cuerpo negro a 1800 K . Determine la razón a la cual se emite energía de radiación a través de una banda definida por $0 \leq \phi \leq 2\pi$ y $45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, en donde θ es el ángulo que un haz de radiación forma con la perpendicular a la superficie y ϕ es el ángulo azimutal.

12-37 Una superficie pequeña de área $A = 1 \text{ cm}^2$ se sujeta a radiación incidente de intensidad constante $I_i = 2.2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$. sr sobre el hemisferio completo. Determine la razón a la cual la energía de radiación incide sobre la superficie a través de a) $0 \leq \theta \leq 45^\circ$ y b) $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, en donde θ es el ángulo que un haz de radiación forma con la perpendicular a la superficie.

Propiedades de radiación

12-38C Defina las propiedades de emisividad y absorptividad. ¿Cuándo estas dos propiedades son iguales entre sí?

12-39C Defina las propiedades de reflectividad y transmisividad y discuta las diferentes formas de reflexión.

12-40C ¿Qué es un cuerpo gris? ¿Cuál es su diferencia con un cuerpo negro? ¿Qué es una superficie gris difusa?

12-41C ¿Qué es el efecto de invernadero? ¿Por qué es un asunto que preocupa mucho a los científicos especializados en la atmósfera?

12-42C Podemos ver el interior de un horno de microondas durante su operación a través de su puerta de vidrio, lo cual indica que radiación visible está escapando de dicho horno. ¿Piensa el lector que también podría estar escapando la peligrosa radiación de microondas?

12-43 La función de emisividad espectral de una superficie opaca a 1000 K se puede expresar aproximadamente como

$$\epsilon_\lambda = \begin{cases} \epsilon_1 = 0.4, & 0 \leq \lambda < 2 \mu\text{m} \\ \epsilon_2 = 0.7, & 2 \mu\text{m} \leq \lambda < 6 \mu\text{m} \\ \epsilon_3 = 0.3, & 6 \mu\text{m} \leq \lambda < \infty \end{cases}$$

Determine la emisividad promedio de la superficie y la razón de la emisión de radiación desde esta última, en W/m^2 .

Respuestas: 0.575, 32.6 kW/m^2

12-44 La reflectividad del aluminio recubierto con sulfato de plomo es 0.35 para la radiación a longitudes de onda menores que $3 \mu\text{m}$ y 0.95 para la radiación a longitudes de onda mayores que $3 \mu\text{m}$. Determine la reflectividad promedio de esta superficie para la radiación solar ($T \approx 5800 \text{ K}$) y para la radiación que proviene de superficies a la temperatura ambiente ($T \approx 300 \text{ K}$). Asimismo, determine la emisividad y la absorptividad de esta superficie a las dos temperaturas. ¿Piensa el lector que este material es adecuado para usarse en colectores solares?

12-45 Un horno que tiene una ventana de vidrio de $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ se puede considerar como un cuerpo negro a 1200 K . Si la transmisividad del vidrio es 0.7 para la radiación a longitudes de onda menores que $3 \mu\text{m}$, y 0 para la radiación a longitudes de onda mayores que $3 \mu\text{m}$, determine la fracción y la razón de la radiación que sale del horno y se transmite a través de la ventana.

12-46 Se puede decir que la emisividad de un filamento de tungsteno es aproximadamente 0.5, para la radiación a longitudes de onda menores que $1 \mu\text{m}$, y 0.15, para la radiación a longitudes de onda mayores que $1 \mu\text{m}$. Determine la emisividad promedio del filamento a a) 2000 K y b) 3000 K . Asimismo, determine la absorptividad y la reflectividad del filamento a las dos temperaturas.

12-47 Las variaciones de la emisividad espectral de dos superficies son como se dan en la figura P12-47. Determine la emisividad promedio de cada una de las superficies a $T = 3000 \text{ K}$. Asimismo, determine la absorptividad y la reflectividad promedios de cada una de ellas para la radiación que viene de una fuente a 3000 K . ¿Cuál de las dos superficies es más apropiada para que sirva como un absorbente solar?

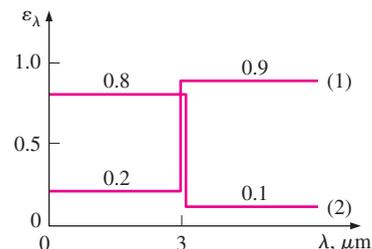


FIGURA P12-47

12-48 Se puede decir que la emisividad de una superficie recubierta con óxido de aluminio es aproximadamente 0.15 para la radiación a longitudes de onda menores que $5 \mu\text{m}$, y 0.9 para la radiación a longitudes de onda mayores que $5 \mu\text{m}$. Determine la emisividad promedio de esta superficie a a) 5800 K y b) 300 K . ¿Qué puede decir el lector acerca de la absorptividad

de esta superficie para la radiación que proviene de fuentes a 5800 K y 300 K? *Respuestas: a) 0.153, b) 0.89*

12-49 La variación de la absorptividad espectral de una superficie es como se muestra en la figura P12-49. Determine la absorptividad y la reflectividad promedios de la superficie para la radiación que se origina en una fuente a $T = 2500$ K. Asimismo, determine la emisividad promedio de esta superficie a 3000 K.

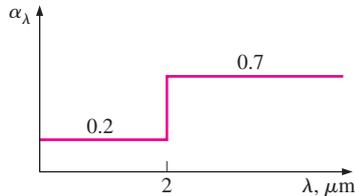


FIGURA P12-49

12-50I Se sabe que una pieza esférica de 5 in de diámetro emite radiación a razón de 550 Btu/h, cuando su temperatura superficial es de 950 R. Determine la emisividad promedio de la pieza a esta temperatura.

12-51 La variación de la transmisividad espectral de una ventana de vidrio de 0.6 cm de espesor es la que se muestra en la figura P12-51. Determine la transmisividad promedio de esta ventana para la radiación solar ($T \approx 5800$ K) y para la radiación que proviene de superficies a la temperatura ambiente ($T \approx 300$ K). Asimismo determine la cantidad de radiación solar transmitida a través de la ventana para una radiación solar incidente de 650 W/m^2 .

Respuestas: 0.848, 0.00015, 551.1 W/m²

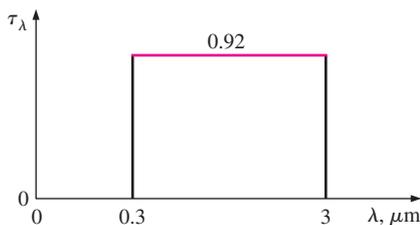


FIGURA P12-51

Radiación atmosférica y solar

12-52C ¿Qué es la constante solar? ¿Cómo se usa para determinar la temperatura superficial efectiva del Sol? ¿Cómo cambiaría el valor de la constante solar si se duplicara la distancia entre la Tierra y el Sol?

12-53C ¿Qué cambios advertiría el lector si el Sol emitiera radiación a una temperatura efectiva de 2000 K, en lugar de 5762 K?

12-54C Explique por qué el cielo es azul y el atardecer es naranja amarillento.

12-55C Cuando la Tierra está lo más cercana al Sol tenemos el invierno en el hemisferio norte. Explique por qué. Asimismo, explique por qué tenemos el verano en el hemisferio norte cuando la Tierra está más alejada del Sol.

12-56C ¿Qué es la temperatura efectiva del cielo?

12-57C Es probable que el lector haya observado las señales de advertencia en las carreteras expresando que los puentes pueden estar cubiertos de hielo cuando las carreteras no lo están. Explique cómo puede suceder esto.

12-58C A menos que el lector viva en un estado del cálido sur, es probable que, en muchas mañanas, haya tenido que raspar el hielo del parabrisas y de las ventanas de su automóvil. Puede ser que haya advertido con frustración que la capa más gruesa de hielo siempre se forma sobre el parabrisas en lugar de sobre las ventanas laterales. Explique por qué ocurre lo anterior.

12-59C Explique por qué las superficies suelen tener absorptividades bastante diferentes para la radiación solar y para la que se origina desde los cuerpos circundantes.

12-60  Una superficie tiene una absorptividad de $\alpha_s = 0.85$ para la radiación solar, y una emisividad de $\varepsilon = 0.5$ a la temperatura ambiente. Se observa que la temperatura de la superficie es de 350 K cuando las componentes directa y difusa de la radiación solar son $G_D = 350$ y $G_d = 400 \text{ W/m}^2$, respectivamente, y la radiación directa forma un ángulo de 30° con la perpendicular a la superficie. Considerando que la temperatura efectiva del cielo es de 280 K, determine la razón neta de la transferencia de calor por radiación hacia la superficie en ese momento.

12-61I Incide radiación solar sobre la superficie exterior de una nave espacial a razón de $400 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2$. La superficie tiene una absorptividad de $\alpha_s = 0.10$ para la radiación solar, y una emisividad de $\varepsilon = 0.6$ a la temperatura ambiente. La superficie exterior irradia calor hacia el espacio que se encuentra a 0 R. Si no se tiene transferencia neta de calor hacia la nave espacial, determine la temperatura de equilibrio de la superficie.

Respuesta: 444 R

12-62 Se observa que la temperatura del aire en una noche clara permanece a alrededor de 4°C . Sin embargo, se informa que el agua se ha congelado debido al efecto de la radiación. Tomando que el coeficiente de transferencia de calor por convección es de $18 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, determine el valor de la temperatura máxima efectiva del cielo esa noche.

12-63 La superficie de absorción de un colector solar está hecha de aluminio recubierto con cromo negro ($\alpha_s = 0.87$ y $\varepsilon = 0.09$). La radiación solar incide sobre la superficie a razón de 600 W/m^2 . Las temperaturas del aire y la efectiva del cielo son 25°C y 15°C , respectivamente, y el coeficiente de transferencia de calor por convección es de $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Para una temperatura de la superficie de absorción de 70°C , determine la razón neta de la energía solar entregada por la placa de absorción al agua que circula detrás de ella.

12-64  Vuelva a considerar el problema 12-63. Mediante el software EES (o cualquier otro semejante). Trace la gráfica de la razón neta de la energía solar transferida al agua en función de la absorptividad de la placa. Suponga que la absorptividad varía de 0.5 hasta 1.0 y discuta los resultados.

12-65 Determine la temperatura de equilibrio de la superficie de absorción del problema 12-63, si el lado posterior del absorbedor está aislado.

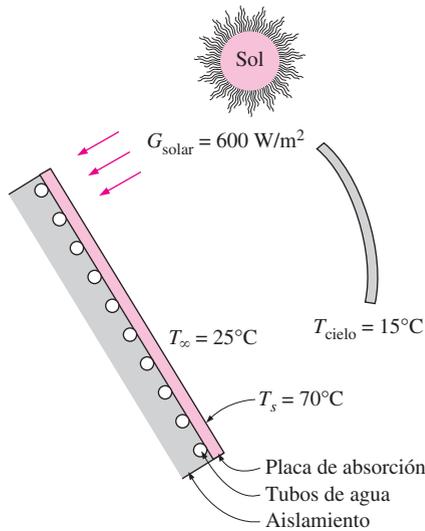


FIGURA P12-63

Tema especial: Ganancia de calor solar a través de las ventanas

12-66C ¿Qué fracción de la energía solar se encuentra en el rango visible *a*) afuera de la atmósfera terrestre y *b*) a nivel del mar sobre la Tierra? Responda la misma pregunta para la radiación infrarroja.

12-67C Describa las propiedades relativas a la radiación solar de una ventana que es idealmente adecuada para minimizar la carga de acondicionamiento del aire.

12-68C Defina el SHGC (coeficiente de ganancia de calor solar) y explique cuál es su diferencia con respecto al SC (coeficiente de sombra). ¿Cuáles son los valores del SHGC y del SC de una ventana de vidrio transparente de una sola hoja?

12-69C ¿Qué representa el SC (coeficiente de sombra) de un dispositivo? ¿Cómo es el SC de un vidrio transparente en comparación con uno absorbente del calor?

12-70C ¿Qué es un dispositivo para producir sombra? ¿Es más eficaz un dispositivo externo, o uno interno en la reducción de la ganancia de calor solar a través de una ventana? ¿De qué manera el color de la superficie de un dispositivo para producir sombra que da el frente hacia el exterior afecta la ganancia de calor solar?

12-71C ¿Cuál es el efecto de un recubrimiento de baja emisividad colocado sobre la superficie interior de un vidrio de ventana en relación con *a*) la pérdida de calor en invierno y *b*) la ganancia de calor en verano a través de la ventana?

12-72C ¿Cuál es el efecto de un recubrimiento reflector colocado sobre la superficie exterior de un vidrio de ventana en relación con *a*) la pérdida de calor en invierno y *b*) la ganancia de calor en verano a través de la ventana?

12-73 Una fábrica ubicada a 32° de latitud N tiene un área de encristalado de 60 m² que da el frente hacia el oeste y que consta de ventanas de hoja doble hechas de vidrio transparente (SHGC = 0.766). Con el fin de reducir la ganancia de calor solar en verano se considera colocar una película reflectora que reducirá el SHGC hasta 0.35. La temporada de enfriamiento

consta de junio, julio, agosto y septiembre, y la de calefacción de octubre hasta abril. Los flujos de calor solar diarios promedios que inciden sobre el lado oeste en esta latitud son 2.35, 3.03, 3.62, 4.00, 4.20, 4.24, 4.16, 3.93, 3.48, 2.94, 2.33 y 2.07 kWh/día · m², para enero a diciembre, respectivamente. Asimismo, los costos unitarios de la electricidad y el gas natural son de 0.09 dólar/kWh y 0.45 dólar/therm, respectivamente. Si el coeficiente de rendimiento del sistema de enfriamiento es 3.2 y la eficiencia del hogar es 0.90, determine los ahorros netos en los costos anuales debidos a la instalación del recubrimiento reflector sobre las ventanas. También determine el periodo simple de recuperación de la inversión, si el costo de instalación de la película reflectora es de 20 dólares/m².

Respuestas: 53 dólares, 23 años

12-74 Una casa ubicada en Boulder, Colorado (40° de latitud N), tiene ventanas comunes de hoja doble con vidrios de 6 mm de espesor y las áreas totales de las ventanas son 8, 6, 6 y 4 m² sobre las paredes sur, oeste, este y norte, respectivamente. Determine la ganancia total de calor solar de la casa en el tiempo solar de las 9:00, 12:00 y 15:00 en julio. Asimismo, determine la cantidad total de ganancia de calor solar diarias, para un día promedio en enero.

12-75 Repita el problema 12-74 para ventanas de hoja doble que están teñidas de gris.

12-76 Considere un edificio en Nueva York (40° de latitud N) que tiene 200 m² de área de ventanas sobre su pared sur. Las ventanas son del tipo de hoja doble y absorbentes del calor, y están equipadas con persianas venecianas con un coeficiente de sombra de SC = 0.30. Determine la ganancia total de calor solar del edificio a través de las ventanas que dan hacia el sur, al medio día solar en abril. ¿Cuál sería la respuesta del lector si no hubiera persianas en las ventanas?

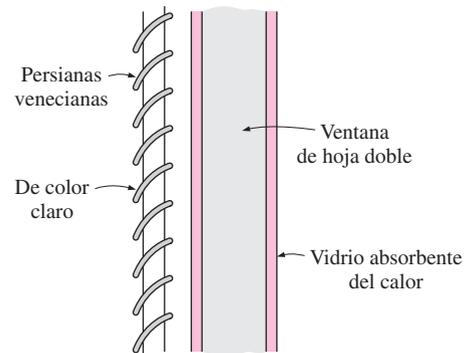


FIGURA P12-76

12-77 Un día típico de invierno en Reno, Nevada (39° de latitud N), podría ser soleado y, como consecuencia, la ganancia de calor solar a través de las ventanas puede ser mayor que la pérdida del mismo a través de ellas durante el transcurso del día. Considere una casa con ventanas del tipo de doble batiente que tienen hoja doble con vidrios de 3 mm de espesor y 6.4 mm de espacio de aire, así como marcos y espaciadores de aluminio. La casa se mantiene a 22°C en todo momento. Determine si la casa está perdiendo más o menos calor del que está ganando proveniente del Sol a través de una ventana que da al oeste, en un día típico de enero y para un periodo de 24 h, si la temperatura promedio en el exterior es de 10°C. *Respuesta: menos*

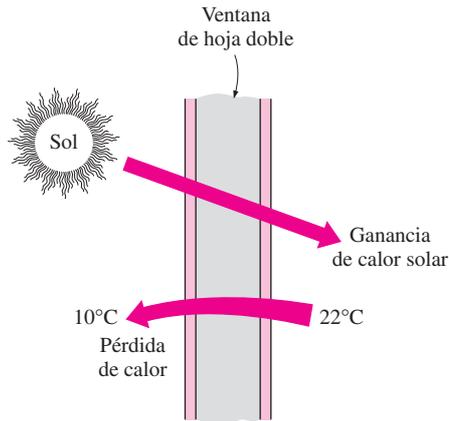


FIGURA P12-77

12-78 Repita el problema 12-77 para una ventana que da al sur.

12-79I Determine la razón de la ganancia (o pérdida) neta de calor a través de una ventana de un solo vidrio fijo de $\frac{1}{8}$ -in, de 9 ft de alto y 15 ft de ancho con marco de aluminio ubicada en la pared oeste, en el tiempo solar de las 3 PM durante un día típico de enero en un lugar cercano a los 40° de latitud N, cuando las temperaturas en el interior y el exterior son de 70°F y 20°F, respectivamente. *Respuesta: ganancia de 12 890 Btu/h*

12-80 Considere un edificio ubicado cerca de los 40° de latitud N que tiene áreas iguales de ventanas por los cuatro lados. La propietaria del edificio está considerando recubrir con película reflectora las ventanas que dan hacia el sur con el fin de reducir la ganancia de calor solar y, de este modo, la carga de enfriamiento. Pero alguien sugiere que la propietaria reducirá incluso más la carga de enfriamiento si, por el contrario, recubre las ventanas que dan al oeste. ¿Qué piensa de ello el lector?

Problemas de repaso

12-81 La emisividad espectral de una superficie opaca a 1 500 K se expresa aproximadamente como

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= 0 & \text{para } \lambda < 2 \mu\text{m} \\ \varepsilon_2 &= 0.85 & \text{para } 2 \leq \lambda \leq 6 \mu\text{m} \\ \varepsilon_3 &= 0 & \text{para } \lambda > 6 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Determine la emisividad total y el flujo de emisión de la superficie.

12-82 La transmisividad espectral de un vidrio común de 3 mm de espesor se puede expresar como

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0 & \text{para } \lambda < 0.35 \mu\text{m} \\ \tau_2 &= 0.85 & \text{para } 0.35 < \lambda < 2.5 \mu\text{m} \\ \tau_3 &= 0 & \text{para } \lambda > 2.5 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Determine la transmisividad de este vidrio para la radiación solar. ¿Cuál es la transmisividad de este vidrio para la luz?

12-83 Una cavidad esférica de 1 m de diámetro se mantiene a una temperatura uniforme de 600 K. Ahora, se perfora un agujero de 5 mm de diámetro. Determine la velocidad máxima de la emisión de energía de radiación a través del agujero. ¿Cuál

sería la respuesta del lector si el diámetro de la cavidad fuera de 3 mm?

12-84 La absorptividad espectral de una superficie opaca es como la que se muestra en la gráfica. Determine la absorptividad de la superficie para la radiación emitida por una fuente a a) 1 000 K y b) 3 000 K.

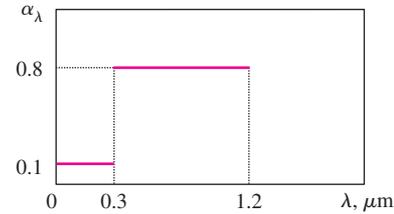


FIGURA P12-84

12-85 La superficie del problema 12-84 recibe radiación solar a razón de 470 W/m². Determine la absorptividad solar de la superficie y la velocidad de absorción de la radiación solar.

12-86 La transmisividad espectral de una cubierta de vidrio usada en un colector solar se expresa como

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0 & \text{para } \lambda < 0.3 \mu\text{m} \\ \tau_2 &= 0.9 & \text{para } 0.3 < \lambda < 3 \mu\text{m} \\ \tau_3 &= 0 & \text{para } \lambda > 3 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Incide radiación solar a razón de 950 W/m² y la placa de absorción, la cual se puede considerar como negra, se mantiene a 340 K por el agua de enfriamiento. Determine a) el flujo solar incidente sobre la placa de absorción, b) la transmisividad de la cubierta de vidrio para la radiación emitida por la placa de absorción y c) la razón de la transferencia de calor hacia el agua de enfriamiento, si la temperatura de la cubierta de vidrio también es de 340 K.

12-87 Considere una pequeña superficie negra de área $A = 3.5 \text{ cm}^2$ que se mantiene a 600 K. Determine la razón a la cual la energía de radiación es emitida por la superficie a través de una abertura con forma de anillo definida por $0 \leq \phi \leq 2\pi$ y $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$, en donde ϕ es el ángulo azimutal y θ es el ángulo que el haz de radiación forma con la perpendicular a la superficie.

12-88 Incide radiación solar sobre la superficie del frente de una placa delgada con las componentes directa y difusa de 300 y 250 W/m², respectivamente. La radiación directa forma un ángulo de 30° con la normal a la superficie. Las superficies de la placa tienen una absorptividad solar de 0.63 y una emisividad de 0.93. La temperatura del aire es de 5°C y el coeficiente de transferencia de calor por convección es de 20 W/m² · °C.

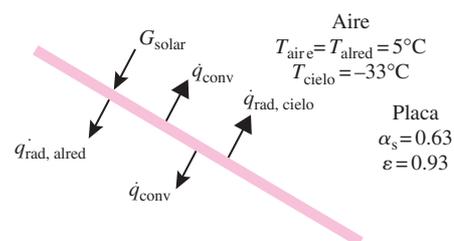


FIGURA P12-88

La temperatura efectiva del cielo para la superficie del frente es -33°C , en tanto que las superficies circundantes están a 5°C para la superficie posterior. Determine la temperatura de equilibrio de la placa.

Problemas de examen de fundamentos de ingeniería (FI)

12-89 Considere una superficie a -5°C en un ambiente a 25°C . La razón máxima de calor que se puede emitir desde esta superficie por radiación es

- a) 0 W/m^2 b) 155 W/m^2 c) 293 W/m^2
d) 354 W/m^2 e) 567 W/m^2

12-90 La longitud de onda a la cual la potencia de emisión del cuerpo negro alcanza su valor máximo a 300 K es

- a) $5.1\ \mu\text{m}$ b) $9.7\ \mu\text{m}$ c) $15.5\ \mu\text{m}$
d) $38.0\ \mu\text{m}$ e) $73.1\ \mu\text{m}$

12-91 Considere una superficie a 500 K . La potencia de emisión espectral del cuerpo negro a una longitud de onda de $50\ \mu\text{m}$ es

- a) $1.54\text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ b) $26.3\text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$
c) $108.4\text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ d) $2750\text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$
e) $8392\text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$

12-92 Una superficie absorbe 10% de radiación a longitudes de onda menores que $3\ \mu\text{m}$ y 50% a longitudes de onda mayores que $3\ \mu\text{m}$. La absorptividad promedio de esta superficie para la radiación emitida por una fuente a 3000 K es

- a) 0.14 b) 0.22 c) 0.30 d) 0.38 e) 0.42

12-93 Considere una barra cilíndrica de 4 cm de diámetro y 6 cm de largo a 1000 K . Si la emisividad de la superficie de la barra es 0.75, la cantidad total de radiación emitida por todas las superficies de ella en 20 min es

- a) 43 kJ b) 385 kJ c) 434 kJ
d) 513 kJ e) 684 kJ

12-94 Incide radiación solar sobre un cuerpo semitransparente a razón de 500 W/m^2 . Si 150 W/m^2 de esta radiación incidente se refleja de regreso y 225 W/m^2 se transmite a través del cuerpo, la absorptividad de éste es

- a) 0 b) 0.25 c) 0.30 d) 0.45 e) 1

12-95 Incide radiación solar sobre una superficie opaca a razón de 400 W/m^2 . La emisividad de la superficie es 0.65 y la absorptividad a la radiación solar es 0.85. El coeficiente de con-

vección entre la superficie y el medio ambiente a 25°C es $6\text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Si la superficie está expuesta a la atmósfera con una temperatura efectiva del cielo de 250 K , la temperatura de equilibrio de esa superficie es

- a) 281 K b) 298 K c) 303 K
d) 317 K e) 339 K

12-96 Una superficie está expuesta a radiación solar. Las componentes directa y difusa de la radiación solar son 350 y 250 W/m^2 , respectivamente, y la radiación directa forma un ángulo de 35° con la normal a la superficie. La absorptividad solar y la emisividad de la superficie son 0.24 y 0.41, respectivamente. Si se observa que la superficie está a 315 K y la temperatura efectiva del cielo es de 256 K , la razón neta de la transferencia de calor por radiación a la superficie es

- a) -129 W/m^2 b) -44 W/m^2 c) 0 W/m^2
d) 129 W/m^2 e) 537 W/m^2

12-97 Una superficie a 300°C tiene una emisividad de 0.7 en el rango de longitud de onda de $0 - 4.4\ \mu\text{m}$ y de 0.3 sobre el resto del rango de la longitud de onda. A una temperatura de 300°C , 19% de la potencia de emisión del cuerpo negro se encuentra en el rango de longitud de onda hasta $4.4\ \mu\text{m}$. La emisividad total de esta superficie es

- a) 0.300 b) 0.376 c) 0.624
d) 0.70 e) 0.50

Problemas de diseño y ensayo

12-98 Escriba un ensayo sobre las propiedades relativas a la radiación de las superficies selectivas que se usan en las placas de absorción de los colectores solares. Averigüe acerca de las diversas clases de esas superficies y discuta su rendimiento y su costo. Recomiende una superficie selectora que optimice el costo y el rendimiento.

12-99 Según un informe de la Atomic Energy Commission, una bomba de hidrógeno se puede considerar como una gran bola de fuego a una temperatura de 7200 K . El lector debe valorar el impacto de la explosión de una bomba de ese tipo a 5 km por encima de una ciudad. Suponga que el diámetro de la bola de fuego es de 1 km y que la explosión dura 15 s . Investigue el nivel de radiación al que quedarán expuestas la gente, las plantas y las casas y de qué manera resultarán afectadas adversamente por la explosión.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

En el capítulo 12 se han considerado los aspectos fundamentales de la radiación y de las propiedades relativas a la radiación de las superficies. Ahora nos encontramos en posición de considerar el intercambio de radiación entre dos o más superficies, que es la cantidad que más interesa en la mayor parte de los problemas acerca de la radiación.

Se inicia este capítulo con una discusión de los factores de visión y de las reglas asociadas con ellos. Se dan expresiones para esos factores y los diagramas para algunas configuraciones comunes, y se presenta el método de las cuerdas cruzadas. A continuación se discute la transferencia de calor por radiación, en primer lugar entre superficies negras y, enseguida, entre superficies no negras, aplicando el enfoque de redes de radiación. Se continúa con los blindajes contra la radiación y se discute el efecto de ésta sobre las mediciones de temperatura y sobre la comodidad. Por último, se considera la radiación de los gases y se discuten las emisividades y absortividades de cuerpos gaseosos de varias formas. También se aborda el intercambio de radiación entre las paredes de las cámaras de combustión y los gases emisores y absorbentes a alta temperatura que se encuentran en el interior de esas cámaras.

OBJETIVOS

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

- Definir el factor de visión y entender su importancia en los cálculos de transferencia de calor por radiación
- Desarrollar relaciones del factor de visión y calcular factores de visión desconocidos en un recinto, aplicando estas relaciones
- Calcular la transferencia de calor por radiación entre superficies negras
- Determinar la transferencia de calor por radiación entre superficies difusas y grises en un recinto, usando el concepto de radiosidad
- Obtener relaciones para la razón neta de transferencia de calor por radiación entre las superficies de un recinto de dos superficies, incluyendo dos placas grandes paralelas, dos cilindros concéntricos largos y dos esferas concéntricas
- Cuantificar el efecto de los blindajes contra la radiación sobre la reducción de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies, y adquirir conciencia de la importancia del efecto de la radiación en las mediciones de temperatura.



CONTENIDO

- 13-1 El factor de visión 710
- 13-2 Relaciones del factor de visión 713
- 13-3 Transferencia de calor por radiación: superficies negras 724
- 13-4 Transferencia de calor por radiación: superficies grises y difusas 727
- 13-5 Blindajes contra la radiación y el efecto de la radiación 739
- 13-6 Intercambio de radiación con gases emisores y absorbentes 743

Tema de interés especial:

Transferencia de calor desde el cuerpo humano 753

Resumen 757

Bibliografía y lecturas sugeridas 759

Problemas 759

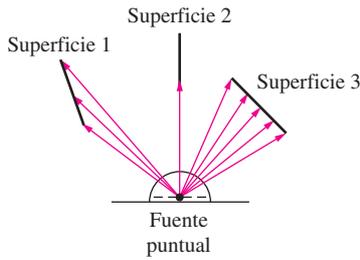


FIGURA 13-1

El intercambio de calor por radiación entre las superficies depende de la *orientación* de unas en relación con las otras, y esta dependencia con respecto a la orientación se toma en cuenta mediante el *factor de visión*.

13-1 ■ EL FACTOR DE VISIÓN

La transferencia de calor por radiación entre las superficies depende de la *orientación* de unas en relación con las otras, así como de sus propiedades con respecto a la radiación y de las temperaturas, como se ilustra en la figura 13-1. Por ejemplo, una excursionista hará el mejor uso de una fogata en una noche fría colocándose tan cerca del fuego como le sea posible y bloqueando el máximo de radiación que provenga de éste poniéndose de frente hacia ésta y no de lado. Del mismo modo, una persona aprovechará la mayor cantidad de radiación solar que incide sobre ella y tomará un baño de sol tendiéndose sobre su espalda en lugar de permanecer de pie.

Para tomar en cuenta los efectos de la orientación sobre la transferencia de calor por radiación entre dos superficies, definimos un nuevo parámetro llamado *factor de visión*, el cual es una cantidad puramente geométrica independiente de las propiedades de la superficie y de la temperatura. También se llama *factor de forma*, *factor de configuración* y *factor de ángulo*. El factor de visión que se basa en la hipótesis de que las superficies son emisoras y reflectoras difusas se llama *factor de visión difusa*, y el que se basa en la hipótesis de que las superficies son emisoras difusas pero reflectoras especulares se llama *factor de visión especular*. En este libro se considera el intercambio de radiación sólo entre superficies difusas y, por tanto, el término *factor de visión* sencillamente significa *factor de visión difusa*.

El factor de visión de una superficie i hacia una superficie j se denota por $F_{i \rightarrow j}$, o sólo F_{ij} , y se define como

$$F_{ij} = \text{la fracción de la radiación que sale de la superficie } i \text{ y choca directamente contra la superficie } j$$

La notación $F_{i \rightarrow j}$ resulta instructiva para los principiantes, ya que hace resaltar que el factor de visión es para la radiación que viaja de la superficie i hacia la j . Sin embargo, esta notación se vuelve un tanto incómoda cuando tiene que usarse muchas veces en un problema. En esos casos, resulta conveniente reemplazarla por su versión *abreviada* F_{ij} .

El factor de visión F_{12} representa la fracción de radiación que sale de la superficie 1 y choca directamente contra la 2, y F_{21} representa la fracción de la radiación que sale de la superficie 2 y choca directamente contra la 1. Note que la radiación que choca contra una superficie no necesariamente es absorbida por esa superficie. Asimismo, en la evaluación de los factores de visión no se considera la radiación que choca contra una superficie después de ser reflejada por otras.

Con el fin de desarrollar una expresión general para el factor de visión, considere dos superficies diferenciales, dA_1 y dA_2 , sobre dos superficies orientadas de manera arbitraria, A_1 y A_2 , respectivamente, como se muestra en la figura 13-2. La distancia entre dA_1 y dA_2 es r y los ángulos entre las normales a las superficies y la recta que une a dA_1 con dA_2 son θ_1 y θ_2 , respectivamente. La superficie 1 emite y refleja radiación de manera difusa en todas direcciones, con una intensidad constante de I_1 , y el ángulo sólido subtendido por dA_2 cuando se ve desde dA_1 es $d\omega_{21}$.

La razón a la cual la radiación sale de dA_1 en la dirección de θ_1 es $I_1 \cos \theta_1 dA_1$. Dado que $d\omega_{21} = dA_2 \cos \theta_2 / r^2$, la porción de esta radiación que choca contra dA_2 es

$$\dot{Q}_{dA_1 \rightarrow dA_2} = I_1 \cos \theta_1 dA_1 d\omega_{21} = I_1 \cos \theta_1 dA_1 \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad (13-1)$$

La razón total a la cual la radiación sale de dA_1 (a través de la emisión y la reflexión) en todas direcciones es la radiosidad (la cual es $J_1 = \pi I_1$) multiplicada por el área superficial,

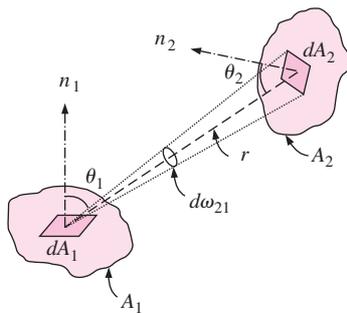


FIGURA 13-2

Configuración geométrica para la determinación del factor de visión entre dos superficies.

$$\dot{Q}_{dA_1} = J_1 dA_1 = \pi I_1 dA_1 \quad (13-2)$$

Entonces el *factor diferencial de visión*, $dF_{dA_1 \rightarrow dA_2}$, el cual es la fracción de radiación que sale de dA_1 y que choca directamente contra dA_2 , queda

$$dF_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \frac{\dot{Q}_{dA_1 \rightarrow dA_2}}{\dot{Q}_{dA_1}} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (13-3)$$

Se puede determinar el factor diferencial de visión $dF_{dA_2 \rightarrow dA_1}$, a partir de la ecuación 13-3, intercambiando los subíndices 1 y 2.

Se puede determinar el factor de visión de un área diferencial dA_1 hacia un área finita A_2 basándose en el hecho de que la fracción de radiación que sale de dA_1 y que choca contra A_2 es la suma de las fracciones de radiación que chocan contra las áreas diferenciales dA_2 . Por lo tanto, el factor de visión $F_{dA_1 \rightarrow A_2}$ se determina al integrar $dF_{dA_1 \rightarrow dA_2}$ sobre A_2 ,

$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (13-4)$$

La razón total a la cual la radiación sale de A_1 (a través de la emisión y la reflexión) en todas direcciones es

$$\dot{Q}_{A_1} = J_1 A_1 = \pi I_1 A_1 \quad (13-5)$$

La porción de esta radiación que choca contra dA_2 se determina al considerar la radiación que sale de dA_1 y choca contra dA_2 (dada por la ecuación 13-1) e integrándola sobre A_1 ,

$$\dot{Q}_{A_1 \rightarrow dA_2} = \int_{A_1} \dot{Q}_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \int_{A_1} \frac{I_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2}{r^2} dA_1 \quad (13-6)$$

La integración de esta relación sobre A_2 da la radiación que choca contra A_2 ,

$$\dot{Q}_{A_1 \rightarrow A_2} = \int_{A_2} \dot{Q}_{A_1 \rightarrow dA_2} = \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{I_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (13-7)$$

Si se divide esto entre la radiación total que sale de A_1 (tomada de la ecuación 13-5) da la fracción de radiación que sale de A_1 y que choca contra A_2 , la cual es el factor de visión $F_{A_1 \rightarrow A_2}$ (o, en forma abreviada, F_{12}),

$$F_{12} = F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{\dot{Q}_{A_1 \rightarrow A_2}}{\dot{Q}_{A_1}} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (13-8)$$

El factor de visión $F_{A_2 \rightarrow A_1}$ se determina con facilidad basándose en la ecuación 13-8, intercambiando los subíndices 1 y 2,

$$F_{21} = F_{A_2 \rightarrow A_1} = \frac{\dot{Q}_{A_2 \rightarrow A_1}}{\dot{Q}_{A_2}} = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (13-9)$$

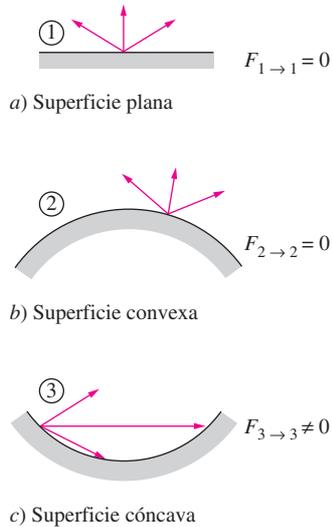


FIGURA 13-3

El factor de visión de una superficie hacia sí misma es *cero* para las superficies *planas* o *convexas*, y *diferente de cero* para las superficies *cóncavas*.

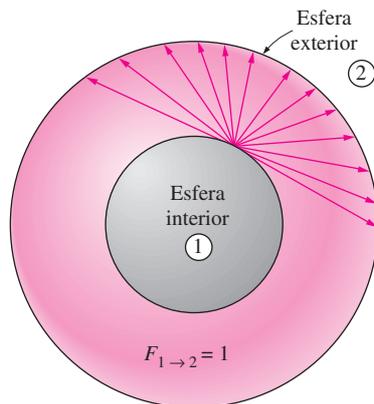


FIGURA 13-4

En una configuración geométrica que consta de dos esferas concéntricas, el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2} = 1$, ya que toda la radiación que sale de la superficie de la esfera más pequeña será interceptada por la más grande.

Note que I_1 es constante pero r , θ_1 y θ_2 son variables. También las integraciones se pueden llevar a cabo en cualquier orden, puesto que los límites de integración son constantes. Estas relaciones confirman que el factor de visión entre dos superficies depende de su orientación mutua y de la distancia entre ellas.

Combinando las ecuaciones 13-8 y 13-9, después de multiplicar la primera por A_1 y la segunda por A_2 , da

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (13-10)$$

la cual se conoce como **relación de reciprocidad** para los factores de visión. Ésta permite el cálculo de uno de los factores de visión si se conoce el otro.

Las relaciones del factor de visión antes desarrolladas son aplicables a cualesquiera dos superficies i y j , siempre que ambas sean emisoras y reflectoras difusas (de modo que sea válida la hipótesis de intensidad constante). Para el caso especial de $j = i$, tenemos

$$F_{i \rightarrow i} = \text{la fracción de radiación que sale de la superficie } i \text{ y que choca directamente consigo misma}$$

Puesto que en ausencia de campos electromagnéticos fuertes los haces de radiación viajan en trayectorias rectas, el factor de visión de una superficie hacia sí misma será cero, a menos que la superficie “se vea” a sí misma. Por lo tanto, $F_{i \rightarrow i} = 0$ para las superficies *planas* o *convexas* y $F_{i \rightarrow i} \neq 0$ para las superficies *cóncavas*, como se ilustra en la figura 13-3.

El valor del factor de visión va desde *cero* hasta *uno*. El caso límite $F_{i \rightarrow j} = 0$ indica que las superficies no tienen una visión directa entre sí y, por tanto, la radiación que sale de la superficie i no puede chocar en forma directa contra la superficie j . El otro caso límite $F_{i \rightarrow j} = 1$ indica que la superficie j rodea por completo a la i , de modo que toda la radiación que sale de esta última es interceptada por aquella. Por ejemplo, en una configuración geométrica que consta de dos esferas concéntricas, toda la radiación que sale de la superficie de la esfera más pequeña (superficie 1) chocará contra la esfera más grande (superficie 2) y, como consecuencia, $F_{1 \rightarrow 2} = 1$, como se ilustra en la figura 13-4.

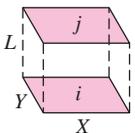
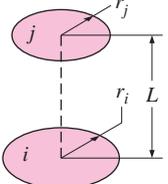
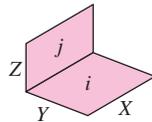
El factor de visión ha probado ser muy útil en el análisis de la radiación en virtud de que nos permite expresar la *fracción de radiación* que sale de una superficie y que choca contra otra en términos de la orientación de una en relación con la otra. La hipótesis subyacente en este proceso es que la radiación que una superficie recibe de una fuente es directamente proporcional al ángulo que dicha superficie subtende cuando se ve desde la fuente. Éste sería el caso sólo si la radiación que sale de la fuente es *uniforme* en todas direcciones sobre toda su superficie y si el medio entre las superficies no *absorbe*, *emite* ni *dispersa* la radiación. Es decir, será el caso cuando las superficies sean *isotérmicas* así como emisoras y reflectoras *difusas*, y que estén separadas por un medio *no participante*, como el vacío o aire.

Se puede determinar el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ entre dos superficies A_1 y A_2 de manera sistemática expresando en primer lugar el factor de visión entre las dos áreas diferenciales dA_1 y dA_2 en términos de las variables espaciales y , a continuación, llevar a cabo las integraciones necesarias. Sin embargo, este procedimiento no resulta práctico, ya que, incluso para las configuraciones geométricas más sencillas, las integraciones resultantes suelen ser muy complejas y difíciles de realizar.

Se tienen evaluados los factores de visión de cientos de configuraciones geométricas comunes, en varias publicaciones se dan los resultados en forma

TABLA 13-1

Expresiones del factor de visión para algunas configuraciones geométricas comunes de tamaño finito (3D)

Configuración geométrica	Relación
<p>Rectángulos paralelos alineados</p> 	$\bar{X} = X/L \text{ y } \bar{Y} = Y/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} \right.$ $+ \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}}$ $+ \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}}$ $\left. - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
<p>Discos paralelos coaxiales</p> 	$R_i = r_i/L \text{ y } R_j = r_j/L$ $S = 1 + \frac{1 + R_j^2}{R_i^2}$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ S - \left[S^2 - 4 \left(\frac{r_j}{r_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$
<p>Rectángulos perpendiculares con una arista común</p> 	$H = Z/X \text{ y } W = Y/X$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} \right.$ $- (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}}$ $+ \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \right.$ $\times \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2}$ $\left. \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\}$

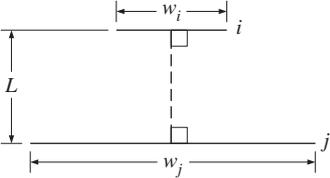
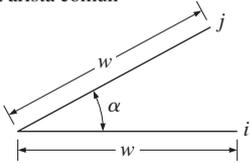
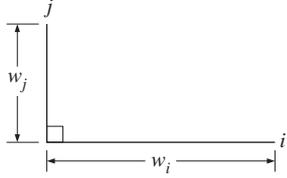
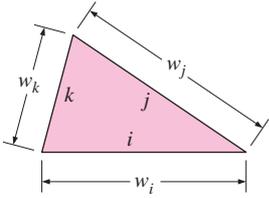
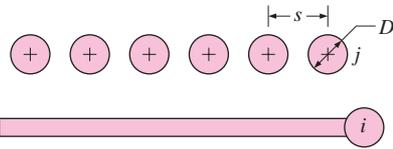
analítica, gráfica o tabular. En las tablas 13-1 y 13-2, se dan los factores de visión para configuraciones geométricas seleccionadas, en forma *analítica*, y en las figuras 13-5 a 13-8, en forma *gráfica*. Los factores de visión de la tabla 13-1 son para configuraciones geométricas tridimensionales. Por otra parte, los de la tabla 13-2 son para configuraciones geométricas que son *infinitamente largas* en la dirección perpendicular al plano del papel y, por lo tanto, son bidimensionales.

13-2 ■ RELACIONES DEL FACTOR DE VISIÓN

El análisis de radiación sobre un recinto cerrado que consta de N superficies requiere la evaluación de N^2 factores de visión y este proceso de evaluación quizá sea la parte que requiere más tiempo en ese tipo de análisis. Sin embargo, no resulta práctico ni es necesario evaluar en forma directa todos los factores de visión. Una vez que se dispone de un número suficiente de ellos, el resto se puede determinar utilizando algunas relaciones fundamentales que existen entre los mismos, como se discutirá enseguida.

TABLA 13-2

Expresiones del factor de visión para algunas configuraciones geométricas infinitamente largas (2D)

Configuración geométrica	Relación
<p>Placas paralelas con sus líneas medias conectadas mediante una recta perpendicular</p> 	$W_i = w_i/L \text{ y } W_j = w_j/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - (W_j - W_i)^2 + 4]^{1/2}}{2W_i}$
<p>Placas inclinadas de anchos iguales y con una arista común</p> 	$F_{i \rightarrow j} = 1 - \operatorname{sen} \frac{1}{2} \alpha$
<p>Placas perpendiculares con una arista común</p> 	$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{w_j}{w_i} - \left[1 + \left(\frac{w_j}{w_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$
<p>Recinto cerrado de tres lados</p> 	$F_{i \rightarrow j} = \frac{w_i + w_j - w_k}{2w_i}$
<p>Plano infinito y fila de cilindros</p> 	$F_{i \rightarrow j} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{D}{s} \tan^{-1} \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2}$

1 La relación de reciprocidad

Los factores de visión $F_{i \rightarrow j}$ y $F_{j \rightarrow i}$ *no* son iguales entre sí, a menos que las áreas de las dos superficies lo sean; es decir,

$$F_{j \rightarrow i} = F_{i \rightarrow j} \quad \text{cuando} \quad A_i = A_j$$

$$F_{j \rightarrow i} \neq F_{i \rightarrow j} \quad \text{cuando} \quad A_i \neq A_j$$

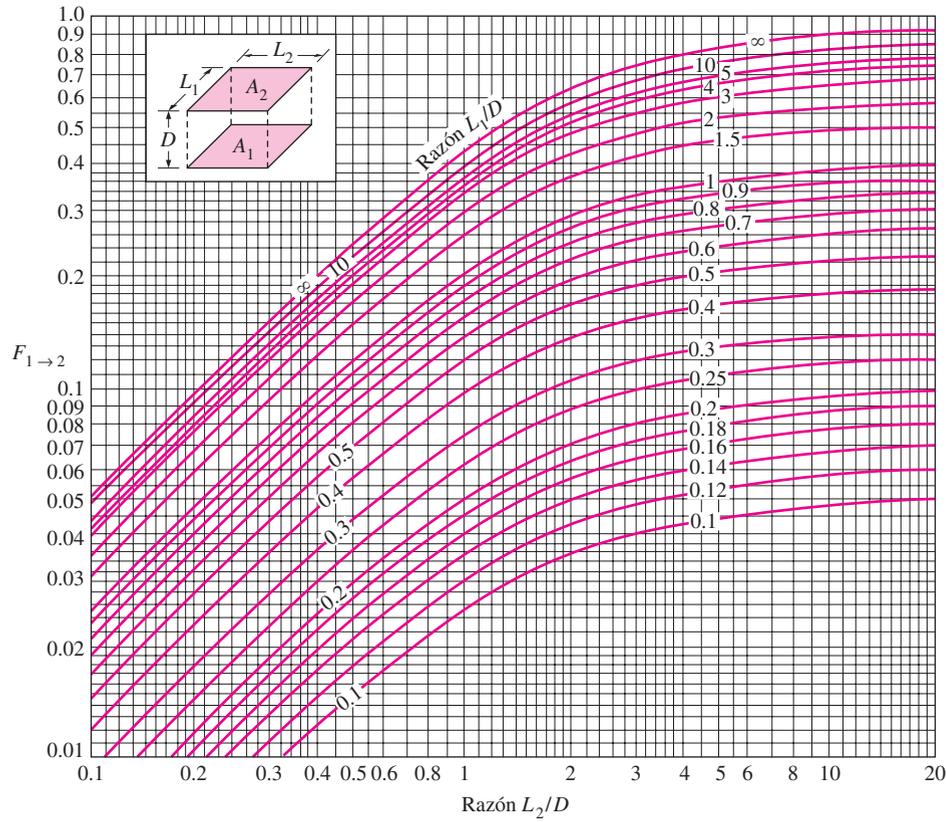


FIGURA 13-5
Factor de visión entre dos rectángulos paralelos alineados de igual tamaño.

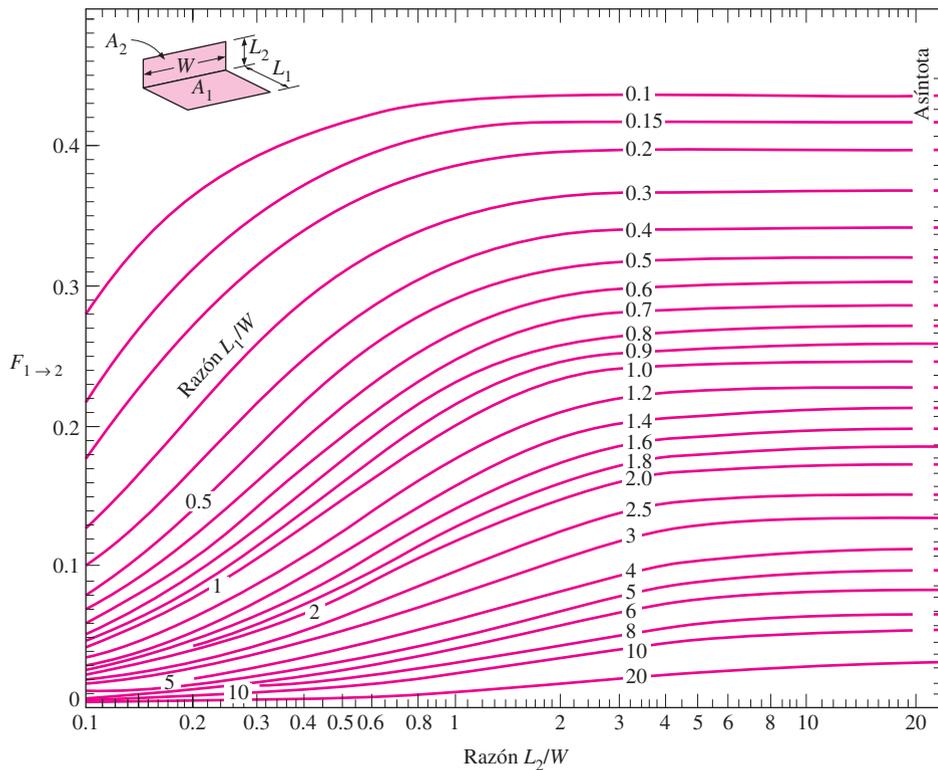


FIGURA 13-6
Factor de visión entre dos rectángulos perpendiculares con una arista común.

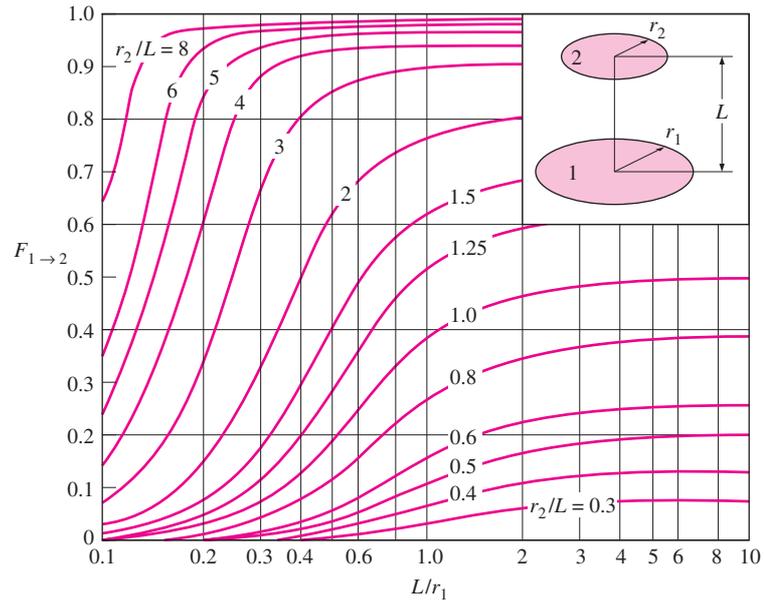


FIGURA 13-7

Factor de visión entre dos discos paralelos coaxiales.

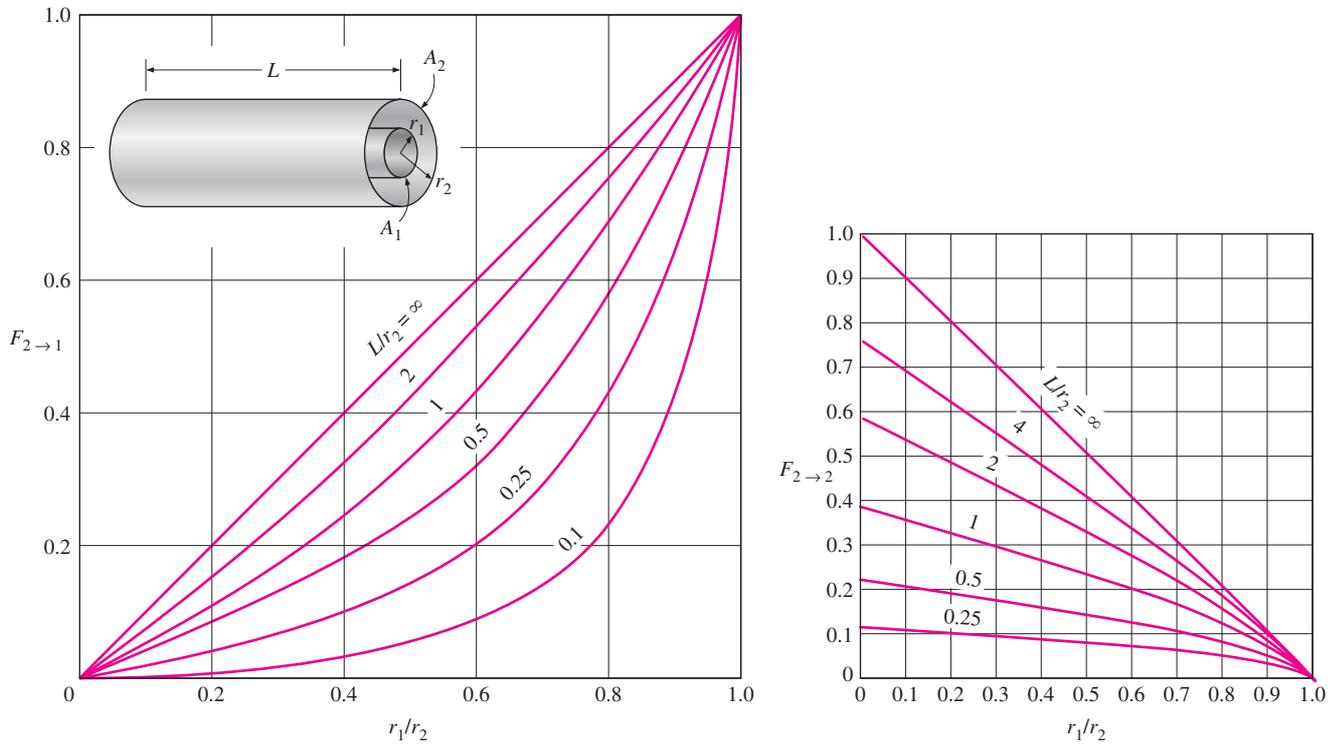


FIGURA 13-8

Factores de visión para dos cilindros concéntricos de longitud finita: a) del cilindro exterior hacia el interior; b) del cilindro exterior hacia sí mismo.

Al principio hemos demostrado que la pareja de factores de visión $F_{i \rightarrow j}$ y $F_{j \rightarrow i}$ están relacionados entre sí por

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (13-11)$$

A esta relación se le menciona como **relación de reciprocidad** o **regla de reciprocidad**, y permite determinar la contraparte de un factor de visión a partir del conocimiento del propio factor y de las áreas de las dos superficies. Cuando se determina la pareja de factores de visión $F_{i \rightarrow j}$ y $F_{j \rightarrow i}$, tiene sentido evaluar en forma directa el más fácil de ellos y, enseguida, el más difícil mediante la aplicación de la relación de reciprocidad.

2 La regla de la suma

Normalmente, el análisis relativo a la radiación de una superficie requiere la consideración de la radiación que entra y sale en todas direcciones. Por lo tanto, la mayor parte de los problemas relativos a la radiación que se encuentran en la práctica comprenden espacios cerrados. Al formular un problema de radiación solemos formar un *recinto cerrado* que contenga las superficies que interactúan por radiación. Incluso las aberturas se tratan como superficies imaginarias con propiedades relativas a la radiación equivalentes a las de la abertura.

El principio de conservación de la energía requiere que toda la radiación que sale de cualquier superficie i de un recinto cerrado sea interceptada por las superficies del propio recinto. Por lo tanto, *la suma de los factores de visión desde la superficie i de un recinto cerrado hacia todas las superficies del propio recinto, incluso hacia sí misma, debe ser igual a la unidad*. Esto se conoce como **regla de la suma** para un recinto cerrado y se expresa como (figura 13-9)

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (13-12)$$

en donde N es el número de superficies del recinto. Por ejemplo, la aplicación de la regla de la suma a la superficie 1 de un recinto cerrado de tres superficies da

$$\sum_{j=1}^3 F_{1 \rightarrow j} = F_{1 \rightarrow 1} + F_{1 \rightarrow 2} + F_{1 \rightarrow 3} = 1$$

Se puede aplicar la regla de la suma a cada superficie de un recinto al hacer variar i desde 1 hasta N . Por lo tanto, la regla de suma aplicada a cada una de las N superficies de un recinto conduce a N relaciones para la determinación de los factores de visión. Asimismo, la regla de reciprocidad produce $\frac{1}{2} N(N - 1)$ relaciones adicionales. Entonces el número total de factores de visión que es necesario evaluar en forma directa para un recinto de N superficies queda

$$N^2 - [N + \frac{1}{2} N(N - 1)] = \frac{1}{2} N(N - 1)$$

Por ejemplo, para un recinto de seis superficies sólo es necesario determinar en forma directa $\frac{1}{2} \times 6(6 - 1) = 15$ factores de visión de los $6^2 = 36$. Los 21 factores de visión restantes se pueden determinar a partir de las 21 ecuaciones que se obtienen por la aplicación de las reglas de reciprocidad y de la suma.

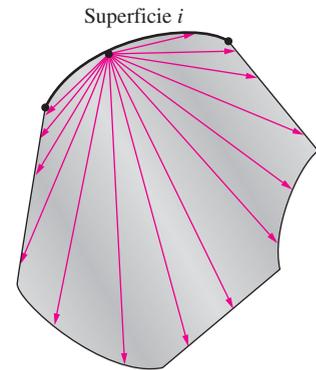


FIGURA 13-9

La radiación que sale de cualquier superficie i de un recinto cerrado debe ser interceptada por completo por las superficies del propio recinto. Por lo tanto, la suma de los factores de visión desde la superficie i hacia cada una de las superficies del recinto debe ser igual a la unidad.

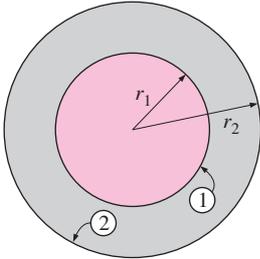


FIGURA 13-10

Configuración geométrica considerada en el ejemplo 13-1.

EJEMPLO 13-1 Factores de visión asociados con dos esferas concéntricas

Determine los factores de visión asociados con un recinto formado por dos esferas concéntricas, mostrado en la figura 13-10.

SOLUCIÓN Se deben determinar los factores de visión asociados con dos esferas concéntricas.

Suposición Las superficies son emisoras y reflectoras difusas.

Análisis La superficie exterior de la esfera más pequeña (superficie 1) y la interior de la esfera más grande (superficie 2) forman un recinto cerrado de dos superficies. Por lo tanto $N = 2$ y este recinto comprende $N^2 = 2^2 = 4$ factores de visión, los cuales son F_{11} , F_{12} , F_{21} y F_{22} . En este recinto de dos superficies, sólo es necesario determinar en forma directa

$$\frac{1}{2}N(N - 1) = \frac{1}{2} \times 2(2 - 1) = 1$$

factor de visión. Los tres factores restantes se pueden determinar por la aplicación de las reglas de la suma y de reciprocidad. Pero resulta que en este caso no sólo se pueden determinar en forma directa uno sino *dos* factores de visión por simple *inspección*:

$F_{11} = 0$, puesto que nada de la radiación que sale de la superficie 1 choca contra ella misma

$F_{12} = 1$, puesto que toda la radiación que sale de la superficie 1 choca contra la superficie 2

En realidad sólo sería suficiente determinar uno de estos factores de visión por inspección, puesto que siempre se puede determinar el otro basándose en la regla de la suma aplicada a la superficie 1 como $F_{11} + F_{12} = 1$.

El factor de visión F_{21} se define por la aplicación de la relación de reciprocidad a las superficies 1 y 2:

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

lo cual da

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} F_{12} = \frac{4\pi r_1^2}{4\pi r_2^2} \times 1 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

Por último, el factor de visión F_{22} se determina aplicando la regla de la suma a la superficie 2:

$$F_{21} + F_{22} = 1$$

y, por tanto,

$$F_{22} = 1 - F_{21} = 1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

Discusión Note que cuando la esfera exterior es mucho más grande que la interior ($r_2 \gg r_1$), F_{22} tiende a uno. Esto es de esperarse, dado que en ese caso la fracción de radiación que sale de la esfera exterior y que es interceptada por la interior será despreciable. Asimismo, note que las dos esferas antes consideradas no necesitan ser concéntricas. Sin embargo, el análisis acerca de la radiación será más exacto por el caso de las que sí lo son, ya que en ese caso es más probable que la radiación sea uniforme sobre las superficies.

3 La regla de superposición

A veces en las tablas y diagramas estándar no se cuenta con el factor de visión asociado con una configuración geométrica dada. En esos casos, resulta conveniente expresar la configuración geométrica como la suma o diferencia de algunas configuraciones con factores de visión conocidos y, a continuación, aplicar la **regla de superposición**, la cual se expresa como: *el factor de visión desde una superficie i hacia una superficie j que es igual a la suma de los factores de visión desde la superficie i hacia las partes de la superficie j* . Note que la proposición inversa no es verdadera. Es decir, el factor de visión desde una superficie j hacia una superficie i no es igual a la suma de los factores de visión desde las partes de la superficie j hacia la superficie i .

Considere la configuración geométrica de la figura 13-11, la cual es infinitamente larga en la dirección perpendicular al plano del papel. La radiación que sale de la superficie 1 y choca contra las superficies combinadas 2 y 3 es igual a la suma de la radiación que choca contra las superficies 2 y 3. Por lo tanto, el factor de visión desde la superficie 1 hacia las superficies combinadas de 2 y 3 es

$$F_{1 \rightarrow (2,3)} = F_{1 \rightarrow 2} + F_{1 \rightarrow 3} \quad (13-13)$$

Suponga que se necesita hallar el factor de visión $F_{1 \rightarrow 3}$. Una comprobación rápida de las expresiones y diagramas de los factores de visión que se dan en esta sección revelará que no se puede evaluar ese factor en forma directa. Sin embargo, se puede determinar con base en la ecuación 13-13 después de determinar tanto $F_{1 \rightarrow 2}$ como $F_{1 \rightarrow (2,3)}$ basándose en el diagrama de la figura 13-12. Por lo tanto puede ser posible determinar algunos factores de visión complicados con relativa facilidad expresando una o las dos áreas como la suma o diferencia de otras y, a continuación, aplicando la regla de superposición.

Para obtener una relación para el factor $F_{(2,3) \rightarrow 1}$, multiplicamos la ecuación 13-13 por A_1 ,

$$A_1 F_{1 \rightarrow (2,3)} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} + A_1 F_{1 \rightarrow 3}$$

y aplicamos la relación de reciprocidad a cada término para obtener

$$(A_2 + A_3)F_{(2,3) \rightarrow 1} = A_2 F_{2 \rightarrow 1} + A_3 F_{3 \rightarrow 1}$$

o bien,

$$F_{(2,3) \rightarrow 1} = \frac{A_2 F_{2 \rightarrow 1} + A_3 F_{3 \rightarrow 1}}{A_2 + A_3} \quad (13-14)$$

Las áreas que se expresan como la suma de más de dos partes se pueden manejar de manera semejante.

EJEMPLO 13-2 Fracción de radiación que sale por una abertura

Determine la fracción de la radiación que sale por la base del recinto cilíndrico mostrado en la figura 13-12 y que escapa a través de una abertura en forma de anillo coaxial en su superficie superior. El radio y la longitud del recinto son $r_1 = 10$ cm y $L = 10$ cm, en tanto que los radios interior y exterior del anillo son $r_2 = 5$ cm y $r_3 = 8$ cm, respectivamente.

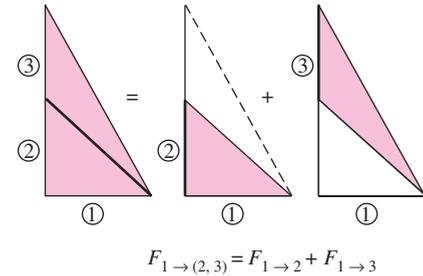


FIGURA 13-11

El factor de visión de una superficie hacia una superficie compuesta es igual a la suma de los factores de visión de aquella hacia las partes de la superficie compuesta.

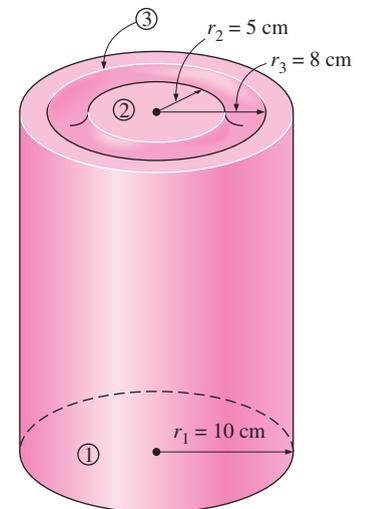


FIGURA 13-12

Recinto cilíndrico considerado en el ejemplo 13-2.

SOLUCIÓN Se debe determinar la fracción de radiación que sale de la base de un recinto cilíndrico a través de una abertura en forma de anillo coaxial.

Suposición La superficie de la base es un emisor y reflector difuso.

Análisis Se pide determinar la fracción de radiación que sale de la base del recinto y escapa por una abertura en la superficie superior. En realidad lo que se pide es determinar el *factor de visión* $F_{1 \rightarrow \text{anillo}}$, desde la base del recinto hacia la superficie con forma de anillo que está en la parte superior.

No se tiene una expresión analítica o diagrama para los factores de visión entre un área circular y un anillo coaxial y, por tanto, no es posible determinar $F_{1 \rightarrow \text{anillo}}$ en forma directa. Sin embargo, sí contamos con un diagrama para los factores de visión entre dos discos paralelos coaxiales y siempre podemos expresar un anillo en términos de discos.

Suponga que la superficie de la base, de radio $r_1 = 10$ cm, sea la superficie 1, el área circular de $r_2 = 5$ cm que está en la parte de arriba es la superficie 2 y el área circular de $r_3 = 8$ cm es la superficie 3. Aplicando la regla de superposición, el factor de visión de la superficie 1 hacia la 3 se puede expresar como

$$F_{1 \rightarrow 3} = F_{1 \rightarrow 2} + F_{1 \rightarrow \text{anillo}}$$

puesto que la superficie 3 es la suma de la superficie 2 y el área anular. Los factores de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ y $F_{1 \rightarrow 3}$ se determinan basándose en el diagrama de la figura 13-7.

$$\frac{L}{r_1} = \frac{10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 1 \quad \text{y} \quad \frac{r_2}{L} = \frac{5 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 0.5 \quad \xrightarrow{\text{(figura 13-7)}} \quad F_{1 \rightarrow 2} = 0.11$$

$$\frac{L}{r_1} = \frac{10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 1 \quad \text{y} \quad \frac{r_3}{L} = \frac{8 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 0.8 \quad \xrightarrow{\text{(figura 13-7)}} \quad F_{1 \rightarrow 3} = 0.28$$

Por lo tanto,

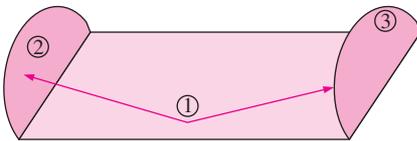
$$F_{1 \rightarrow \text{anillo}} = F_{1 \rightarrow 3} - F_{1 \rightarrow 2} = 0.28 - 0.11 = \mathbf{0.17}$$

el cual es el resultado que se desea. Note que $F_{1 \rightarrow 2}$ y $F_{1 \rightarrow 3}$ representan las fracciones de radiación que salen de la base y que chocan contra las superficies circulares 2 y 3, respectivamente, y su diferencia da la fracción que choca contra el área anular.

4 La regla de simetría

Se puede simplificar todavía más la determinación de los factores de visión en un problema si la configuración geométrica con la que está relacionado posee algún tipo de simetría. Por lo tanto, es una buena práctica comprobar la presencia de cualquier *simetría* en un problema antes de intentar determinar los factores de visión en forma directa. La presencia de la simetría se puede determinar *por inspección*, teniendo presente la definición de factor de visión. Superficies idénticas que están orientadas de una manera idéntica con respecto a una tercera interceptarán cantidades idénticas de la radiación que salga de dicha superficie. Por lo tanto, la **regla de simetría** se puede expresar como: *dos (o más) superficies que poseen simetría con respecto a una tercera tendrán factores de visión idénticos desde esa superficie* (figura 13-13).

La regla de simetría también se puede expresar como: *si las j y k son simétricas con respecto a la superficie i entonces $F_{i \rightarrow j} = F_{i \rightarrow k}$* . Aplicando la regla de reciprocidad podemos demostrar que, en este caso, la relación $F_{j \rightarrow i} = F_{k \rightarrow i}$ también es verdadera.



$$F_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 3}$$

(Asimismo, $F_{2 \rightarrow 1} = F_{3 \rightarrow 1}$)

FIGURA 13-13

Dos superficies que son simétricas con respecto a una tercera tendrán el mismo factor de visión desde esta última.

EJEMPLO 13-3 Factores de visión asociados con un tetrágono

Determine los factores de visión desde la base de la pirámide mostrada en la figura 13-14 hacia cada una de las cuatro superficies laterales. La base de la pirámide es un cuadrado y las superficies laterales son triángulos isósceles.

SOLUCIÓN Se deben determinar los factores de visión desde la base de una pirámide hacia cada una de sus cuatro superficies laterales, para el caso de una base cuadrada.

Suposición Las superficies son emisoras y reflectoras difusas.

Análisis La base de la pirámide (superficie 1) y sus cuatro superficies laterales (superficies 2, 3, 4 y 5) forman un recinto cerrado de cinco superficies. Lo primero que advertimos acerca de este recinto es su simetría. Las cuatro superficies laterales son simétricas con respecto a la superficie base. Entonces, apoyándonos en la *regla de simetría*, se tiene

$$F_{12} = F_{13} = F_{14} = F_{15}$$

Asimismo, la *regla de la suma* aplicada a la superficie 1 da

$$\sum_{j=1}^5 F_{1j} = F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15} = 1$$

Sin embargo, $F_{11} = 0$, puesto que la base es una superficie *plana*. Entonces las dos relaciones antes dadas conducen a

$$F_{12} = F_{13} = F_{14} = F_{15} = \mathbf{0.25}$$

Discusión Note que cada una de las cuatro superficies laterales de la pirámide reciben la cuarta parte de toda la radiación que sale de la superficie base, como era de esperarse. También note que la presencia de la simetría simplifica mucho la determinación de los factores de visión.

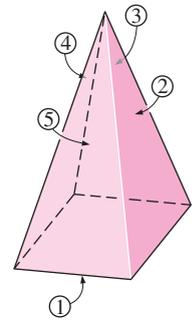


FIGURA 13-14
Pirámide considerada en el ejemplo 13-3.

EJEMPLO 13-4 Factores de visión asociados con un ducto triangular

Determine el factor de visión desde uno de los lados hacia cualquier otro de los que forman el ducto triangular infinitamente largo, cuya sección transversal se da en la figura 13-15.

SOLUCIÓN Se deben determinar los factores de visión asociados con un ducto triangular infinitamente largo.

Suposición Las superficies son emisoras y reflectoras difusas.

Análisis Los anchos de los lados de la sección transversal triangular del ducto son L_1 , L_2 y L_3 , y las áreas superficiales correspondientes a ellos son A_1 , A_2 y A_3 , respectivamente. Puesto que el ducto es infinitamente largo, la fracción de radiación que sale de cualquiera de las superficies y que escapa por los extremos del mismo es despreciable. Por lo tanto, se puede considerar que el ducto infinitamente largo es un recinto cerrado de tres superficies, $N = 3$.

Este recinto comprende $N^2 = 3^2 = 9$ factores de visión y es necesario determinar en forma directa

$$\frac{1}{2}N(N - 1) = \frac{1}{2} \times 3(3 - 1) = 3$$

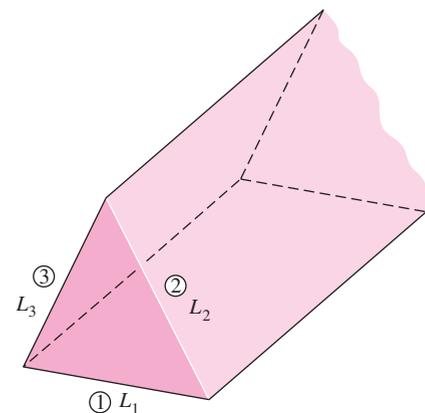


FIGURA 13-15
Ducto triangular infinitamente largo considerado en el ejemplo 13-4.

de estos factores. Por fortuna, se puede determinar por inspección que tres de ellos son

$$F_{11} = F_{22} = F_{33} = 0$$

dado que las tres superficies son planas. Los seis factores restantes se pueden determinar por la aplicación de las reglas de la suma y de reciprocidad.

Aplicando la regla de la suma a cada una de las tres superficies da

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} = 1$$

$$F_{21} + F_{22} + F_{23} = 1$$

$$F_{31} + F_{32} + F_{33} = 1$$

Puesto que $F_{11} = F_{22} = F_{33} = 0$ y multiplicando la primera ecuación por A_1 , la segunda por A_2 y la tercera por A_3 da

$$A_1 F_{12} + A_1 F_{13} = A_1$$

$$A_2 F_{21} + A_2 F_{23} = A_2$$

$$A_3 F_{31} + A_3 F_{32} = A_3$$

Por último, aplicando las tres relaciones de reciprocidad $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$, $A_1 F_{13} = A_3 F_{31}$, y $A_2 F_{23} = A_3 F_{32}$ da

$$A_1 F_{12} + A_1 F_{13} = A_1$$

$$A_1 F_{12} + A_2 F_{23} = A_2$$

$$A_1 F_{13} + A_2 F_{23} = A_3$$

El anterior es un conjunto de tres ecuaciones algebraicas con tres incógnitas, las cuales se pueden resolver para obtener

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2A_1} = \frac{L_1 + L_2 - L_3}{2L_1} \\ F_{13} &= \frac{A_1 + A_3 - A_2}{2A_1} = \frac{L_1 + L_3 - L_2}{2L_1} \\ F_{23} &= \frac{A_2 + A_3 - A_1}{2A_2} = \frac{L_2 + L_3 - L_1}{2L_2} \end{aligned} \quad (13-15)$$

Discusión Note que por sencillez se han reemplazado las áreas de las superficies laterales por sus anchos correspondientes, dado que $A = Ls$ y la longitud s se puede extraer como factor común y cancelarse. Podemos generalizar este resultado como: *el factor de visión desde una de las superficies de un ducto triangular muy largo hacia otra de las superficies es igual a la suma de sus anchos menos el ancho de la tercera, divididas entre el doble del ancho de la primera superficie mencionada.*

Factores de visión entre superficies infinitamente largas: el método de las cuerdas cruzadas

Muchos problemas que se encuentran en la práctica se relacionan con configuraciones de sección transversal constante, como los canales y los ductos, que son *muy largas* en una dirección con respecto a las otras dimensiones. Se puede considerar de manera conveniente que ese tipo de configuraciones geométricas son *bidimensionales*, puesto que cualquier interacción por radiación a través de las superficies de los extremos es despreciable. Posteriormente, estas configuraciones geométricas se pueden considerar como si fueran *infinitamente largas* y el factor de visión entre sus superficies se puede determinar

por el increíblemente sencillo *método de las cuerdas cruzadas* desarrollado por H. C. Hottel en la década de 1950. No es necesario que las superficies de la configuración sean planas; pueden ser convexas, cóncavas o tener cualquier forma irregular.

Con el fin de demostrar este método considere la configuración geométrica que se muestra en la figura 13-16 para intentar hallar el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ entre las superficies 1 y 2. Lo primero que hacemos es identificar los puntos extremos de las superficies (los puntos A, B, C y D) y unirlos entre sí con cuerdas firmemente tensas, las cuales se encuentran indicadas por medio de las rectas punteadas. Hottel ha demostrado que el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ se puede expresar en términos de las longitudes de estas cuerdas, las cuales son rectas, como

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2L_1} \quad (13-16)$$

Note que $L_5 + L_6$ es la suma de las longitudes de las *cuerdas cruzadas* y $L_3 + L_4$ es la suma de las longitudes de las *cuerdas no cruzadas* sujetas a los puntos extremos. Por lo tanto, el método de las cuerdas cruzadas de Hottel se puede expresar de manera verbal como

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{\Sigma (\text{Cuerdas cruzadas}) - \Sigma (\text{Cuerdas no cruzadas})}{2 \times (\text{Cuerda sobre la superficie } i)} \quad (13-17)$$

El método de las cuerdas cruzadas es aplicable incluso cuando las dos superficies consideradas comparten una arista común, como en un triángulo. En esos casos, la arista común se puede tratar como una cuerda imaginaria de longitud cero. El método también se puede aplicar a superficies que están parcialmente bloqueadas por otras, dejando que las cuerdas cambien de dirección alrededor de las superficies que bloquean.

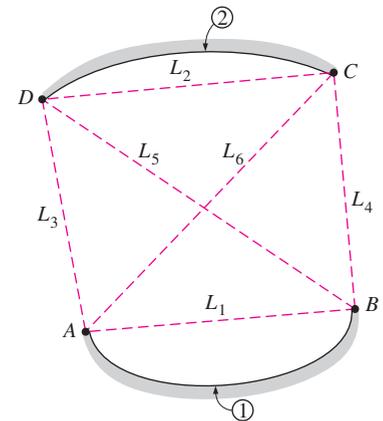


FIGURA 13-16

Determinación del factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ por la aplicación del método de las cuerdas cruzadas.

EJEMPLO 13-5 El método de las cuerdas cruzadas para los factores de visión

Dos placas paralelas infinitamente largas de anchos $a = 12$ cm y $b = 5$ cm están ubicadas con una separación de $c = 6$ cm, como se muestra en la figura 13-17. a) Determine el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ de la superficie 1 hacia la 2, aplicando el método de las cuerdas cruzadas. b) Deduzca la fórmula de las cuerdas cruzadas formando triángulos sobre la configuración geométrica dada y aplicando la ecuación 13-15 para los factores de visión entre los lados de los triángulos.

SOLUCIÓN Se deben determinar los factores de visión entre dos placas paralelas infinitamente largas aplicando el método de las cuerdas cruzadas y debe deducirse la fórmula para el factor de visión.

Suposición Las superficies son emisoras y reflectoras difusas.

Análisis a) En primer lugar asignamos una letra a los puntos extremos de las dos superficies y trazamos las rectas punteadas entre ellas, como se muestra en la figura 13-17. Enseguida identificamos las cuerdas cruzadas y no cruzadas y aplicamos el método mencionado (ecuación 13-17) para determinar el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{\Sigma (\text{Cuerdas cruzadas}) - \Sigma (\text{Cuerdas no cruzadas})}{2 \times (\text{Cuerda sobre la superficie 1})} = \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2L_1}$$

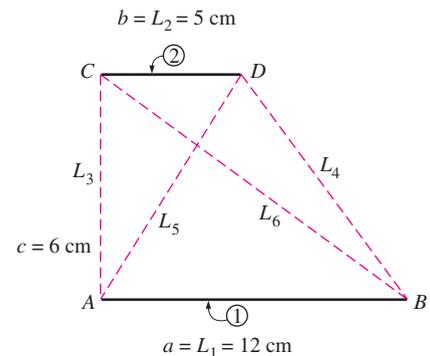


FIGURA 13-17

Las dos placas paralelas infinitamente largas consideradas en el ejemplo 13-5.

en donde

$$\begin{aligned} L_1 &= a = 12 \text{ cm} & L_4 &= \sqrt{7^2 + 6^2} = 9.22 \text{ cm} \\ L_2 &= b = 5 \text{ cm} & L_5 &= \sqrt{5^2 + 6^2} = 7.81 \text{ cm} \\ L_3 &= c = 6 \text{ cm} & L_6 &= \sqrt{12^2 + 6^2} = 13.42 \text{ cm} \end{aligned}$$

Sustituyendo,

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{[(7.81 + 13.42) - (6 + 9.22)] \text{ cm}}{2 \times 12 \text{ cm}} = \mathbf{0.250}$$

b) La configuración geométrica es infinitamente larga en la dirección perpendicular al plano del papel y, por consiguiente, las dos placas (superficies 1 y 2) y las dos aberturas (superficies imaginarias 3 y 4) forman un recinto cerrado de cuatro superficies. A continuación, al aplicar la regla de la suma a la superficie 1 da

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} = 1$$

Pero $F_{11} = 0$, dado que es una superficie plana. Por lo tanto,

$$F_{12} = 1 - F_{13} - F_{14}$$

en donde se pueden determinar los dos factores de visión F_{13} y F_{14} al considerar los triángulos ABC y ABD , respectivamente, y aplicando la ecuación 13-15 para los factores de visión entre los lados de triángulos. Obtenemos

$$F_{13} = \frac{L_1 + L_3 - L_6}{2L_1}, \quad F_{14} = \frac{L_1 + L_4 - L_5}{2L_1}$$

Sustituyendo,

$$\begin{aligned} F_{12} &= 1 - \frac{L_1 + L_3 - L_6}{2L_1} - \frac{L_1 + L_4 - L_5}{2L_1} \\ &= \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2L_1} \end{aligned}$$

lo cual es el resultado deseado. Lo anterior también es una pequeña demostración del método de las cuerdas cruzadas para el caso de dos superficies paralelas planas infinitamente largas.

13-3 ■ TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN: SUPERFICIES NEGRAS

Hasta ahora hemos considerado la naturaleza de la radiación, las propiedades con respecto a ella de los materiales y los factores de visión, y ahora nos encontramos en posición de considerar la velocidad de la transferencia de calor entre superficies por radiación. En general, el análisis del intercambio por radiación entre superficies es complicado debido a la reflexión: un haz de radiación que sale de una superficie puede ser reflejado varias veces, teniéndose reflexión parcial en cada superficie, antes de que sea absorbido por completo. El análisis se simplifica mucho cuando se puede hacer una aproximación de las superficies que intervienen como cuerpos negros, en virtud de la no existencia de reflexión. En esta sección consideramos el intercambio por radiación

sólo entre *superficies negras*; en la sección siguiente extendemos el análisis hacia superficies reflectoras.

Considere dos superficies negras de forma arbitraria mantenidas a las temperaturas uniformes T_1 y T_2 , como se muestra en la figura 13-18. Reconociendo que la radiación sale de una superficie negra a razón de $E_b = \sigma T^4$ por unidad de área superficial y que el factor de visión $F_{1 \rightarrow 2}$ representa la fracción de la radiación que sale de la superficie 1 y que choca contra la 2, la razón *net*a de la transferencia de calor por radiación de la superficie 1 hacia la 2 se puede expresar como

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} &= \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale} \\ \text{de toda la superficie 1} \\ \text{y choca contra la superficie 2} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale} \\ \text{de toda la superficie 2} \\ \text{y choca contra la superficie 1} \end{array} \right) \\ &= A_1 E_{b1} F_{1 \rightarrow 2} - A_2 E_{b2} F_{2 \rightarrow 1} \quad (\text{W}) \quad (13-18) \end{aligned}$$

Aplicando la relación de reciprocidad $A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}$ se obtiene

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (13-19)$$

que es la relación deseada. Un valor negativo para $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$ indica que la transferencia neta de calor por radiación es de la superficie 2 hacia la 1.

Considere ahora un *recinto cerrado* que consta de N superficies *negras* mantenidas a temperaturas específicas. La transferencia *net*a de calor por radiación *desde* cualquier superficie i de este recinto se determina sumando las transferencias netas de calor por radiación desde la superficie i hacia cada una de las superficies del recinto:

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \sum_{j=1}^N A_i F_{i \rightarrow j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (\text{W}) \quad (13-20)$$

Una vez más, un valor negativo para \dot{Q} indica que la transferencia neta de calor por radiación es *hacia* la superficie i (es decir, la superficie i *gana* energía por radiación en lugar de perderla). Asimismo, la transferencia neta de calor desde una superficie hacia sí misma es cero, sin importar su forma.

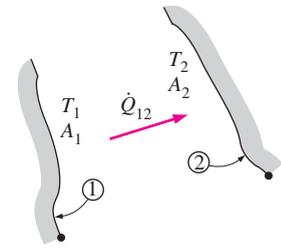


FIGURA 13-18

Dos superficies negras generales mantenidas a las temperaturas uniformes T_1 y T_2 .

EJEMPLO 13-6 Transferencia de calor por radiación en un horno negro

Considere el horno cúbico de $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ que se muestra en la figura 13-19, cuyas superficies se aproximan mucho a ser negras. La base, la parte superior y las superficies laterales del horno se mantienen a las temperaturas uniformes de 800 K, 1 500 K y 500 K, respectivamente. Determine *a*) la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre la base y las superficies laterales, *b*) la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre la base y la superficie superior y *c*) la razón neta de la transferencia de calor por radiación desde la base.

SOLUCIÓN Las superficies de un horno cúbico son negras y se mantienen a temperaturas uniformes. Se deben determinar la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre la base y las superficies laterales, entre la base y la superficie superior y desde la base.

Suposición Las superficies son negras e isotérmicas.

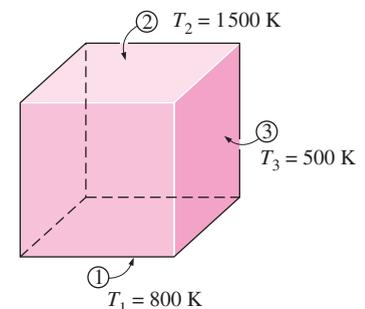


FIGURA 13-19

El horno cúbico de superficies negras considerado en el ejemplo 13-6.

Análisis a) La configuración geométrica comprende seis superficies y, por consiguiente, podemos intentar en un principio tratar el horno como un recinto de seis superficies. No obstante, las de los cuatro costados poseen las mismas propiedades, por lo que, en el análisis de la radiación, podemos tratarlas como una sola superficie lateral. Consideremos la superficie de la base como la 1, la superior como la 2 y la lateral como la superficie 3. Entonces el problema se reduce a determinar $\dot{Q}_{1 \rightarrow 3}$, $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$, y \dot{Q}_1 .

Se puede determinar la razón neta $\dot{Q}_{1 \rightarrow 3}$ de la transferencia de calor por radiación de la superficie 1 a la 3 basándose en la ecuación 13-19, puesto que las dos superficies que intervienen son negras, reemplazando el subíndice 2 por 3:

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 3} = A_1 F_{1 \rightarrow 3} \sigma (T_1^4 - T_3^4)$$

Pero primero es necesario evaluar el factor de visión $F_{1 \rightarrow 3}$. Después de revisar los diagramas y tablas de factores de visión nos damos cuenta de que no podemos determinar este factor en forma directa. Sin embargo, con base en la figura 13-5, podemos encontrar que el factor $F_{1 \rightarrow 2}$ es $F_{1 \rightarrow 2} = 0.2$ y sabemos que $F_{1 \rightarrow 1} = 0$, dado que la superficie 1 es un plano. Entonces, aplicando la regla de la suma a la superficie 1 da

$$F_{1 \rightarrow 1} + F_{1 \rightarrow 2} + F_{1 \rightarrow 3} = 1$$

o bien,

$$F_{1 \rightarrow 3} = 1 - F_{1 \rightarrow 1} - F_{1 \rightarrow 2} = 1 - 0 - 0.2 = 0.8$$

Sustituyendo,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{1 \rightarrow 3} &= (25 \text{ m}^2)(0.8)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(800 \text{ K})^4 - (500 \text{ K})^4] \\ &= \mathbf{394 \text{ kW}} \end{aligned}$$

b) De manera semejante, a partir de la ecuación 13-19 se encuentra que la razón neta de la transferencia de calor por radiación $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$ de la superficie 1 hacia la 2 es

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} &= A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ &= (25 \text{ m}^2)(0.2)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(800 \text{ K})^4 - (1500 \text{ K})^4] \\ &= \mathbf{-1319 \text{ kW}} \end{aligned}$$

El signo negativo indica que la transferencia neta de calor por radiación es de la superficie 2 hacia la 1.

c) La transferencia neta de calor por radiación desde la base \dot{Q}_1 se calcula con base en la ecuación 13-20, reemplazando el subíndice i por 1 y tomando $N = 3$:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= \sum_{j=1}^3 \dot{Q}_{1 \rightarrow j} = \dot{Q}_{1 \rightarrow 1} + \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} + \dot{Q}_{1 \rightarrow 3} \\ &= 0 + (-1319 \text{ kW}) + (394 \text{ kW}) \\ &= \mathbf{-925 \text{ kW}} \end{aligned}$$

Una vez más, el signo negativo indica que la transferencia neta de calor por radiación es hacia la superficie 1. Es decir, la base del horno está ganando radiación a razón de alrededor de 925 kW.

13-4 ■ TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN: SUPERFICIES GRISES Y DIFUSAS

El análisis de la transferencia de calor por radiación en los recintos que constan de superficies negras es relativamente fácil, como hemos visto, pero la mayor parte de los recintos que se encuentran en la práctica están relacionados con superficies no negras, las cuales permiten que ocurran reflexiones múltiples. El análisis relativo a la radiación en ese tipo de recintos se vuelve muy complicado, a menos que se establezcan algunas hipótesis.

Para hacer posible un análisis sencillo con respecto a la radiación es común suponer que las superficies de un recinto son *opacas*, *difusas* o *grises*. Es decir, las superficies no son transparentes, son emisoras y reflectoras difusas y sus propiedades relativas a la radiación son independientes de la longitud de onda. Asimismo, cada superficie del recinto es *isotérmica* y tanto la radiación entrante como la saliente son *uniformes* sobre cada superficie. Pero, en primer lugar, repasaremos el concepto de radiosidad introducido en el capítulo 12.

Radiosidad

Las superficies emiten radiación y la reflejan y, por consiguiente, la radiación que sale de una superficie consta de las partes emitida y reflejada. El cálculo de la transferencia de calor entre superficies comprende la energía *total* de radiación que emana de una superficie, sin importar cuál sea su origen. La *energía total de radiación que sale de una superficie por unidad de tiempo y por unidad área* es la **radiosidad** y se denota por J (figura 13-20).

Para una superficie i que es *gris* y *opaca* ($\varepsilon_i = \alpha_i$ y $\alpha_i + \rho_i = 1$), la radiosidad se puede expresar como

$$\begin{aligned} J_i &= \left(\begin{array}{l} \text{Radiación emitida} \\ \text{por la superficie } i \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Radiación reflejada} \\ \text{por la superficie } i \end{array} \right) \\ &= \varepsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i \\ &= \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (\text{W/m}^2) \end{aligned} \quad (13-21)$$

en donde $E_{bi} = \sigma T_i^4$ es el poder de emisión de cuerpo negro de la superficie i y G_i es la irradiación (es decir, la energía de radiación que incide sobre la superficie i por unidad de tiempo por unidad de área).

Para una superficie que se puede considerar como un *cuerpo negro* ($\varepsilon_i = 1$), la relación de la radiosidad se reduce a

$$J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (\text{cuerpo negro}) \quad (13-22)$$

Es decir, *la radiosidad de un cuerpo negro es igual a su poder de emisión*. Esto es de esperarse, ya que un cuerpo negro no refleja la radiación y, como consecuencia, la que proviene de un cuerpo de ese tipo sólo se debe a la emisión.

Transferencia neta de calor por radiación hacia una superficie o desde una superficie

Durante una interacción por radiación, una superficie *pierde* energía por emisión y *gana* energía al absorber la emitida por otras superficies. Una superficie experimenta una ganancia neta o una pérdida neta de energía, dependiendo de cuál de las dos cantidades es la mayor. La razón *net*a de transferencia de calor por radiación desde una superficie i de área A_i se denota por \dot{Q}_i y se expresa como

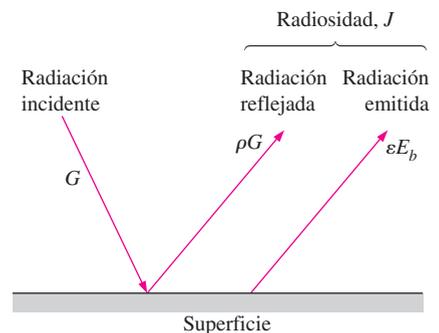


FIGURA 13-20

La radiosidad representa la suma de la energía de radiación emitida y reflejada por una superficie.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_i &= \left(\text{Radiación que sale} \right) - \left(\text{Radiación que incide} \right) \\ &= \left(\text{de toda la superficie } i \right) - \left(\text{sobre toda la superficie } i \right) \\ &= A_i(J_i - G_i) \quad (\text{W}) \quad (13-23)\end{aligned}$$

Despejando G_i de la ecuación 13-21 y sustituyendo en la 13-23 da

$$\dot{Q}_i = A_i \left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{bi}}{1 - \varepsilon_i} \right) = \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{bi} - J_i) \quad (\text{W}) \quad (13-24)$$

En una analogía eléctrica con la ley de Ohm, esta ecuación se puede volver a acomodar como

$$\dot{Q}_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i} \quad (\text{W}) \quad (13-25)$$

en donde

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i} \quad (13-26)$$

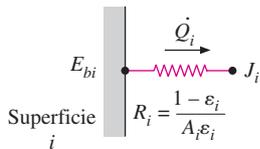


FIGURA 13-21

Analogía eléctrica de la resistencia superficial a la radiación.

es la **resistencia de la superficie** a la radiación. La cantidad $E_{bi} - J_i$ corresponde a una *diferencia de potencial* y la razón neta de transferencia de calor por radiación corresponde a la *corriente* en la analogía eléctrica, como se ilustra en la figura 13-21.

La dirección de la transferencia neta de calor por radiación depende de las magnitudes relativas de J_i (la radiosidad) y E_{bi} (el poder de emisión de un cuerpo negro a la temperatura de la superficie). Es *desde* la superficie si $E_{bi} > J_i$ y *hacia* la superficie si $J_i > E_{bi}$. Un valor negativo para \dot{Q}_i indica que la transferencia de calor es *hacia* la superficie. Toda esta energía de radiación ganada debe ser eliminada desde el otro lado de la superficie a través de algún mecanismo si la temperatura superficial debe permanecer constante.

La resistencia superficial a la radiación para un *cuerpo negro* es *cero*, puesto que $\varepsilon_i = 1$ y $J_i = E_{bi}$. En este caso, la razón neta de la transferencia de calor por radiación se determina en forma directa con base en la ecuación 13-23.

Algunas superficies que se encuentran en numerosas aplicaciones prácticas de la transferencia de calor se consideran *adiabáticas*, dado que sus lados negros están bien aislados y la transferencia de calor a través de ellos es cero. Cuando los efectos de convección sobre el lado del frente (transferencia de calor) de una superficie de ese tipo son despreciables y se alcanzan condiciones de estado estacionario, dicha superficie debe perder tanta energía de radiación como la que gana y, por consiguiente, $\dot{Q}_i = 0$. En esos casos, se dice que la superficie *vuelve a irradiar* toda la energía de radiación que recibe y se le conoce como **superficie reirradiante**. Haciendo $\dot{Q}_i = 0$ en la ecuación 13-25 se obtiene

$$J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (13-27)$$

Por lo tanto, en condiciones estacionarias se puede determinar con facilidad la *temperatura* de una superficie reirradiante, con base en la ecuación que se acaba de dar, una vez que se conoce la radiosidad. Note que la temperatura de una superficie reirradiante es *independiente de su emisividad*. En el análisis de la radiación se descarta la resistencia superficial de una que sea reirradiante, puesto que no se tiene transferencia neta de calor a través de ella. (Esto es semejante al hecho de que no es necesario considerar una resistencia en una red eléctrica si no está fluyendo corriente por ella.)

Transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies cualesquiera

Considere dos superficies difusas, grises y opacas de forma arbitraria que se mantienen a temperaturas uniformes, como se muestra en la figura 13-22. Reconociendo que la radiosidad J representa la razón a que la radiación sale de una superficie por unidad de área superficial y que el factor de visión $F_{i \rightarrow j}$ representa la fracción de radiación que sale de la superficie i y que choca contra la superficie j , la razón *net*a de transferencia de calor por radiación de la superficie i hacia la j se puede expresar como

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{i \rightarrow j} &= \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de toda} \\ \text{la superficie } i \text{ y que} \\ \text{choca contra la superficie } j \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de toda} \\ \text{la superficie } j \text{ y que} \\ \text{choca contra la superficie } i \end{array} \right) \quad (13-28) \\ &= A_i J_i F_{i \rightarrow j} - A_j J_j F_{j \rightarrow i} \quad (W) \end{aligned}$$

Aplicando la relación de reciprocidad $A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$ se obtiene

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = A_i F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (W) \quad (13-29)$$

Una vez más, en analogía con la ley de Ohm, esta ecuación se puede reacomodar como

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}} \quad (W) \quad (13-30)$$

en donde

$$R_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i F_{i \rightarrow j}} \quad (13-31)$$

es la **resistencia del espacio** a la radiación. De nuevo, la cantidad $J_i - J_j$ corresponde a una *diferencia de potencial* y la velocidad neta de la transferencia de calor entre las dos superficies corresponde a la *corriente* en la analogía eléctrica, como se ilustra en la figura 13-22.

La dirección de la transferencia neta de calor por radiación entre las dos superficies depende de las magnitudes relativas de J_i y J_j . Un valor positivo para $\dot{Q}_{i \rightarrow j}$ indica que la transferencia neta de calor es *desde* la superficie i *hacia* la j . Un valor negativo indica lo opuesto.

En un recinto de N superficies el principio de conservación de la energía requiere que la transferencia neta de calor desde la superficie i sea igual a la suma de las transferencias netas de calor desde la superficie i hacia cada una de las N superficies del recinto; es decir,

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \sum_{j=1}^N A_i F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}} \quad (W) \quad (13-32)$$

En la figura 13-23 se da la representación de red de la transferencia neta de calor de la superficie i hacia las superficies restantes de un recinto de N superficies. Note que $\dot{Q}_{i \rightarrow i}$ (la razón neta de transferencia de calor de una superficie hacia sí misma) es cero, sin importar la forma de la superficie. Combinando las ecuaciones 13-25 y 13-32 da

$$\frac{E_{bi} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}} \quad (W) \quad (13-33)$$

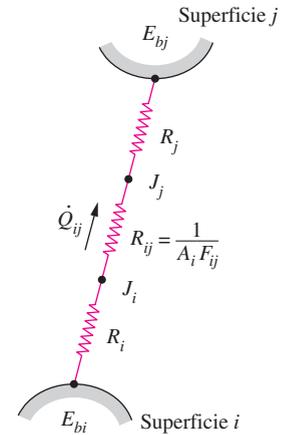


FIGURA 13-22

Analogía eléctrica de la resistencia espacial a la radiación.

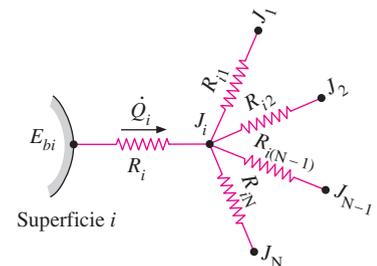


FIGURA 13-23

Representación de red de la transferencia neta de calor por radiación desde la superficie i hacia las superficies restantes de un recinto de N superficies.

la cual tiene la interpretación según la analogía eléctrica de que *el flujo neto de radiación desde una superficie a través de su resistencia superficial es igual a la suma de los flujos de radiación desde esa superficie hacia todas las demás a través de las resistencias correspondientes del espacio.*

Métodos de resolución de problemas sobre radiación

En el análisis de la radiación de un recinto debe darse la temperatura o la razón neta de transferencia de calor por radiación para cada una de las superficies con el fin de obtener una solución única para las temperaturas superficiales y las razones de transferencia de calor desconocidas. Existen dos métodos comunes para resolver problemas de radiación. En el primero de ellos las ecuaciones 13-32 (para superficies con razones específicas de la transferencia de calor) y la 13-33 (para superficies con temperaturas específicas) se simplifican y reacomodan como

$$\text{Superficies con razón específica de transferencia neta de calor } \dot{Q}_i \quad \dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (13-34)$$

$$\text{Superficies con temperatura específica } T_i \quad \sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (13-35)$$

Note que $\dot{Q}_i = 0$, para las superficies aisladas (o reirradiantes), y $\sigma T_i^4 = J_i$, para las superficies negras, ya que, en ese caso, $\varepsilon_i = 1$. Asimismo, se cancela el término correspondiente a $j = i$ de cualquiera de las dos relaciones ya que, en ese caso, $J_i - J_j = J_i - J_i = 0$.

Las ecuaciones antes dadas conducen a N ecuaciones algebraicas para la determinación de las N radiosidades desconocidas para un recinto de N superficies. Una vez que se dispone de las radiosidades J_1, J_2, \dots, J_N se pueden determinar las razones desconocidas de la transferencia de calor con base en la ecuación 13-34, en tanto que las temperaturas superficiales desconocidas se pueden determinar a partir de la ecuación 13-35. Las temperaturas de las superficies aisladas o reirradiantes se pueden determinar a partir de $\sigma T_i^4 = J_i$. Un valor positivo para \dot{Q}_i indica transferencia neta de calor por radiación *desde* la superficie i hacia las otras superficies del recinto, en tanto que un valor negativo indica transferencia neta de calor por radiación *hacia* la superficie.

El enfoque sistemático antes descrito para la resolución de problemas de transferencia de calor por radiación resulta muy adecuado para aplicarse con los populares programas para resolver ecuaciones existentes hoy en día, como EES, Mathcad y Matlab, en especial cuando se tiene un gran número de superficies y se conoce como el **método directo** (antes conocido como *método matricial*, ya que conducía a matrices y la resolución requería conocimientos de álgebra lineal). El segundo método que se describe a continuación, llamado **método de redes**, se basa en la analogía con las redes eléctricas.

El método de redes fue presentado por primera vez por A. K. Oppenheim en la década de 1950 y encontró una amplia aceptación debido a su sencillez y a que hacía resaltar la física del problema. La aplicación del método es directa: dibuje una red de resistencias superficiales asociada con cada superficie de un recinto y únalas con las resistencias del espacio. A continuación, resuelva el problema de radiación tratándolo como de redes eléctricas, en donde la transferencia de calor por radiación reemplaza a la corriente y la radiosidad reemplaza al potencial.

Sin embargo, el método de redes no resulta práctico para recintos con más de tres o cuatro superficies, debido a la mayor complejidad de la red. A continuación aplicamos el método para resolver problemas sobre radiación en recintos de dos y tres superficies.

Transferencia de calor por radiación en recintos cerrados de dos superficies

Considere un recinto cerrado que consta de dos superficies opacas a las temperaturas específicas T_1 y T_2 , como se muestra en la figura 13-24, e intente determinar la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre las dos superficies con el método de redes. Las superficies 1 y 2 tienen las emisividades ε_1 y ε_2 y las áreas superficiales A_1 y A_2 , y se mantienen a las temperaturas uniformes T_1 y T_2 , respectivamente. Sólo se tienen dos superficies en el recinto y, por tanto, podemos escribir

$$\dot{Q}_{12} = \dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2$$

Es decir, la razón neta de transferencia de calor por radiación de la superficie 1 a la 2 debe ser igual a la razón neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie 1 y la razón neta de transferencia de calor por radiación hacia la superficie 2.

La red de radiación de este recinto de dos superficies consta de dos resistencias superficiales y una del espacio, como se muestra en la figura 13-24. En una red eléctrica se determinaría la corriente que fluye por estas resistencias conectadas en serie dividiendo la diferencia de potencial existente entre los puntos A y B entre la resistencia total existente entre los mismos dos puntos. La razón neta de transferencia por radiación se determina de la misma manera y se expresa como

$$\dot{Q}_{12} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_{12} + R_2} = \dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2$$

o bien,

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}} \quad (\text{W}) \quad (13-36)$$

Este importante resultado es aplicable a cualesquiera superficies grises, difusas y opacas que formen un recinto cerrado. El factor de visión F_{12} depende de la configuración geométrica y debe determinarse primero. En la tabla 13-3 se dan formas simplificadas de la ecuación 13-36 para algunas disposiciones conocidas que forman un recinto cerrado de dos superficies. Note que para todos estos casos especiales, $F_{12} = 1$.

EJEMPLO 13-7 Transferencia de calor por radiación entre placas paralelas

Dos placas paralelas muy grandes se mantienen a las temperaturas uniformes $T_1 = 800$ K y $T_2 = 500$ K y tienen las emisividades $\varepsilon_1 = 0.2$ y $\varepsilon_2 = 0.7$, respectivamente, como se muestra en la figura 13-25. Determine la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre las dos superficies por unidad de área superficial de las placas.

SOLUCIÓN Dos placas paralelas grandes se mantienen a temperaturas uniformes. Debe determinarse la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre las placas.

Suposición Las dos superficies son opacas, difusas y grises.

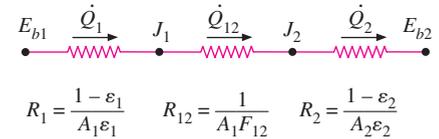
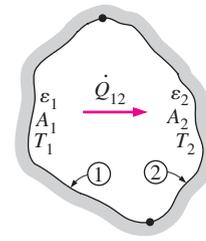


FIGURA 13-24

Esquema de un recinto cerrado de dos superficies y la red de radiación asociado con él.

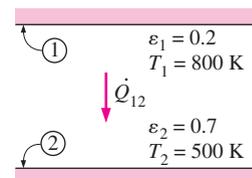
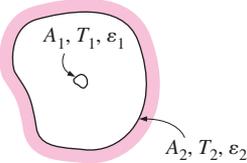
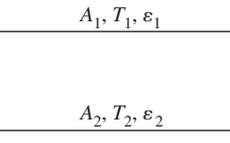
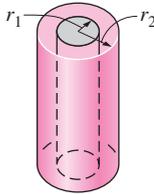
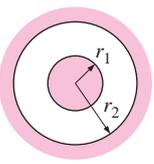


FIGURA 13-25

Las dos placas paralelas consideradas en el ejemplo 13-7.

TABLA 13-3

<p>Objeto pequeño en una cavidad grande</p> 	$\frac{A_1}{A_2} \approx 0$ $F_{12} = 1$	$\dot{Q}_{12} = A_1 \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (13-37)$
<p>Placas paralelas infinitamente grandes</p> 	$A_1 = A_2 = A$ $F_{12} = 1$	$\dot{Q}_{12} = \frac{A \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (13-38)$
<p>Cilindros concéntricos infinitamente largos</p> 	$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$ $F_{12} = 1$	$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (13-39)$
<p>Esferas concéntricas</p> 	$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ $F_{12} = 1$	$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (13-40)$

Análisis A partir de la ecuación 13-38 se determina con facilidad que la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre las dos placas por unidad de área es

$$\begin{aligned} \dot{q}_{12} &= \frac{\dot{Q}_{12}}{A} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(800 \text{ K})^4 - (500 \text{ K})^4]}{\frac{1}{0.2} + \frac{1}{0.7} - 1} \\ &= \mathbf{3625 \text{ W/m}^2} \end{aligned}$$

Discusión Note que se transfiere calor a una razón neta de 3625 W de la placa 1 a la 2, por radiación por unidad de área superficial de cualquiera de las dos placas.

Transferencia de calor por radiación en recintos cerrados de tres superficies

Considere ahora un recinto cerrado que consta de tres superficies opacas, difusas y grises, como se muestra en la figura 13-26. Las superficies 1, 2 y 3 tienen las áreas superficiales A_1 , A_2 y A_3 ; emisividades ε_1 , ε_2 y ε_3 y temperaturas uniformes T_1 , T_2 y T_3 , respectivamente. La red de radiación de esta configuración geométrica se construye siguiendo el procedimiento estándar: trace una resistencia superficial asociada con cada una de las tres superficies y conecte estas resistencias con las del espacio, como se muestra en la figura. Por medio de las ecuaciones 13-26 y 13-31, se dan las relaciones para las resistencias de las superficies y del espacio. Se considera que se conocen los tres potenciales en los puntos extremos, E_{b1} , E_{b2} y E_{b3} , puesto que se especifican las temperaturas superficiales. Entonces, todo lo que necesitamos hallar son las radiosidades J_1 , J_2 y J_3 . Las tres ecuaciones para la determinación de estas tres incógnitas se obtienen con base en el requisito de que *la suma algebraica de las corrientes (transferencia neta de calor por radiación) en cada nodo debe ser igual a cero*; es decir,

$$\begin{aligned} \frac{E_{b1} - J_1}{R_1} + \frac{J_2 - J_1}{R_{12}} + \frac{J_3 - J_1}{R_{13}} &= 0 \\ \frac{J_1 - J_2}{R_{12}} + \frac{E_{b2} - J_2}{R_2} + \frac{J_3 - J_2}{R_{23}} &= 0 \\ \frac{J_1 - J_3}{R_{13}} + \frac{J_2 - J_3}{R_{23}} + \frac{E_{b3} - J_3}{R_3} &= 0 \end{aligned} \quad (13-41)$$

Una vez que se dispone de las radiosidades J_1 , J_2 y J_3 , con base en la ecuación 13-32 se puede determinar la razón neta de las transferencias de calor por radiación en cada superficie.

El conjunto de ecuaciones que se acaba de dar se puede simplificar todavía más si una o más de las superficies son “especiales” de alguna manera. Por ejemplo, $J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4$ para una superficie *negra* o *reirradiante*. También, $\dot{Q}_i = 0$ para una superficie reirradiante. Por último, cuando se especifica la razón neta de la transferencia de calor por radiación \dot{Q}_i en una superficie i en lugar de la temperatura, el término $(E_{bi} - J_i)/R_i$ debe reemplazarse por la \dot{Q}_i especificada.

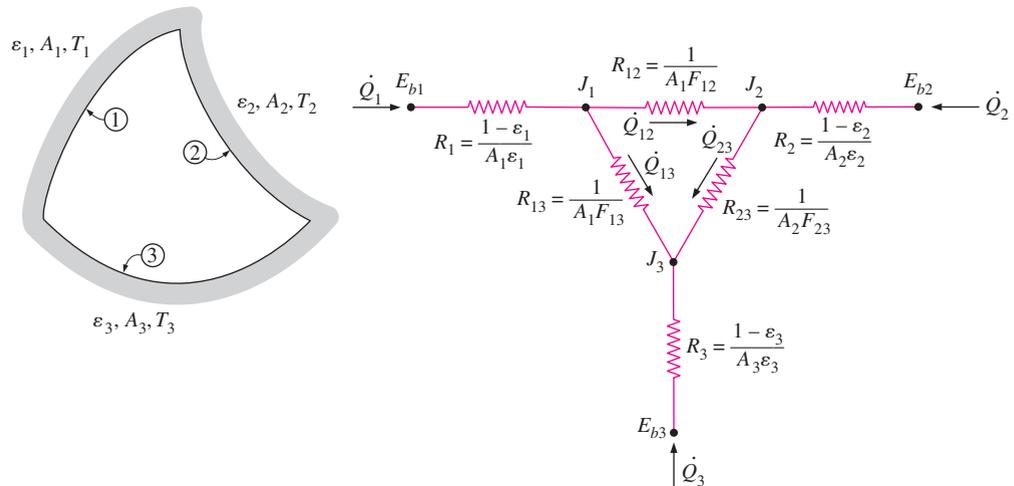


FIGURA 13-26

Esquema de un recinto cerrado de tres superficies y la red de radiación asociada con él.

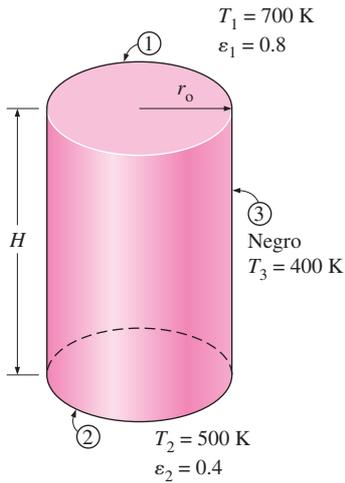


FIGURA 13-27

El horno cilíndrico considerado en el ejemplo 13-8.

EJEMPLO 13-8 Transferencia de calor por radiación en un horno cilíndrico

Considere un horno cilíndrico con $r_o = H = 1$ m, como se muestra en la figura 13-27. La superficie superior (superficie 1) y la base (superficie 2) del horno tienen $\varepsilon_1 = 0.8$ y $\varepsilon_2 = 0.4$, respectivamente, y se mantienen a las temperaturas uniformes $T_1 = 700$ K y $T_2 = 500$ K. La superficie lateral se aproxima mucho a un cuerpo negro y se mantiene a una temperatura $T_3 = 400$ K. Determine la razón neta de transferencia de calor por radiación en cada superficie durante la operación estacionaria y explique de qué manera se pueden mantener estas superficies a las temperaturas especificadas.

SOLUCIÓN Las superficies de un horno cilíndrico se mantienen a temperaturas uniformes. Se debe determinar la razón neta de transferencia de calor por radiación en cada superficie durante la operación estacionaria.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias de operación. 2 Las superficies son opacas, difusas y grises. 3 No se considera la transferencia de calor por convección.

Análisis Este problema se resolverá de manera sistemática aplicando el método directo con el fin de demostrar su uso. Se puede considerar que el horno cilíndrico es un recinto cerrado de tres superficies

$$A_1 = A_2 = \pi r_o^2 = \pi(1 \text{ m})^2 = 3.14 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 2\pi r_o H = 2\pi(1 \text{ m})(1 \text{ m}) = 6.28 \text{ m}^2$$

El factor de visión de la base hacia la superficie superior es, con base en la figura 13-7, $F_{12} = 0.38$. Entonces, aplicando la regla de la suma, se determina que el factor de visión de la base a la superficie lateral es

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} = 1 \rightarrow F_{13} = 1 - F_{11} - F_{12} = 1 - 0 - 0.38 = 0.62$$

puesto que la superficie base es plana y, por tanto, $F_{11} = 0$. Dado que las superficies superior e inferior son simétricas respecto a la superficie lateral, $F_{21} = F_{12} = 0.38$ y $F_{23} = F_{13} = 0.62$. El factor de visión F_{31} se determina a partir de la relación de reciprocidad,

$$A_1 F_{13} = A_3 F_{31} \rightarrow F_{31} = F_{13}(A_1/A_3) = (0.62)(0.314/0.628) = 0.31$$

Asimismo, $F_{32} = F_{31} = 0.31$, debido a la simetría. Ahora que se dispone de todos los factores de visión, aplicamos la ecuación 13-35 a cada una de las superficies para determinar las radiosidades:

Superficie superior ($i = 1$): $\sigma T_1^4 = J_1 + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} [F_{1 \rightarrow 2}(J_1 - J_2) + F_{1 \rightarrow 3}(J_1 - J_3)]$

Superficie inferior ($i = 2$): $\sigma T_2^4 = J_2 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} [F_{2 \rightarrow 1}(J_2 - J_1) + F_{2 \rightarrow 3}(J_2 - J_3)]$

Superficie lateral ($i = 3$): $\sigma T_3^4 = J_3 + 0$ (dado que la superficie 3 es negra, por lo tanto $\varepsilon_3 = 1$)

Sustituyendo las cantidades conocidas,

$$(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(700 \text{ K})^4 = J_1 + \frac{1 - 0.8}{0.8} [0.38(J_1 - J_2) + 0.62(J_1 - J_3)]$$

$$(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(500 \text{ K})^4 = J_2 + \frac{1 - 0.4}{0.4} [0.38(J_2 - J_1) + 0.62(J_2 - J_3)]$$

$$(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(400 \text{ K})^4 = J_3$$

Resolviendo estas últimas ecuaciones para J_1 , J_2 y J_3 da

$$J_1 = 11\,418 \text{ W/m}^2, J_2 = 4\,562 \text{ W/m}^2, \text{ y } J_3 = 1\,452 \text{ W/m}^2$$

Entonces, a partir de la ecuación 13-34 se determina que las razones netas de transferencia de calor por radiación en las tres superficies son

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= A_1[F_{1 \rightarrow 2}(J_1 - J_2) + F_{1 \rightarrow 3}(J_1 - J_3)] \\ &= (3.14 \text{ m}^2)[0.38(11\,418 - 4\,562) + 0.62(11\,418 - 1\,452)] \text{ W/m}^2 \\ &= \mathbf{27.6 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= A_2[F_{2 \rightarrow 1}(J_2 - J_1) + F_{2 \rightarrow 3}(J_2 - J_3)] \\ &= (3.12 \text{ m}^2)[0.38(4\,562 - 11\,418) + 0.62(4\,562 - 1\,452)] \text{ W/m}^2 \\ &= \mathbf{-2.13 \text{ kW}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_3 &= A_3[F_{3 \rightarrow 1}(J_3 - J_1) + F_{3 \rightarrow 2}(J_3 - J_2)] \\ &= (6.28 \text{ m}^2)[0.31(1\,452 - 11\,418) + 0.31(1\,452 - 4\,562)] \text{ W/m}^2 \\ &= \mathbf{-25.5 \text{ kW}} \end{aligned}$$

Note que la dirección de la transferencia neta de calor por radiación es *de* la superficie superior *hacia* las superficies base y lateral, y la suma algebraica de estas tres cantidades debe ser igual a cero; es decir,

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = 27.6 + (-2.13) + (-25.5) \cong 0$$

Discusión Para mantener las superficies a las temperaturas especificadas, debemos suministrar calor a la superior en forma continua a razón de 27.6 kW, eliminando al mismo tiempo 2.13 kW de la superficie base y 25.5 kW de la superficie lateral.

El método directo presentado aquí se aplica tal y como es y no requiere la evaluación de resistencias a la radiación. Asimismo, se puede aplicar de la misma manera a recintos con cualquier número de superficies.

EJEMPLO 13-9 Transferencia de calor por radiación en un horno triangular

A un horno se le da la forma de un ducto largo con una sección transversal de triángulo equilátero, como se muestra en la figura 13-28. El ancho de cada lado es de 1 m. La superficie base tiene una emisividad de 0.7 y se mantiene a una temperatura uniforme de 600 K. La superficie lateral izquierda calentada se aproxima mucho a un cuerpo negro a 1 000 K. La superficie lateral derecha está bien aislada. Determine la razón a la cual debe suministrarse calor externamente al lado calentado, por unidad de longitud del ducto, con el fin de mantener estas condiciones de operación.

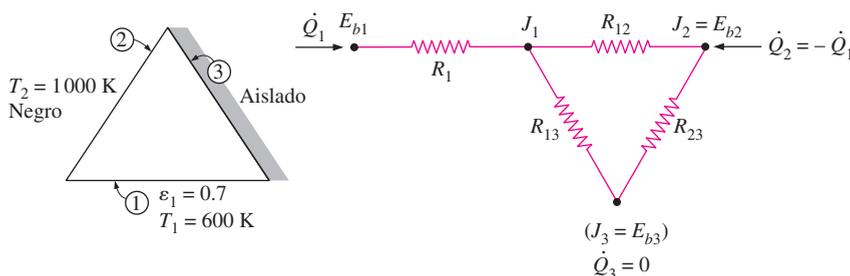


FIGURA 13-28
El horno triangular considerado en el ejemplo 13-9.

SOLUCIÓN Dos de las superficies de un horno largo de sección transversal de triángulo equilátero se mantienen a temperaturas uniformes, en tanto que la tercera está aislada. Se debe determinar la razón externa de transferencia de calor hacia el lado calentado, por unidad de longitud del ducto, durante la operación estacionaria.

Suposiciones **1** Existen condiciones estacionarias de operación. **2** Las superficies son opacas, difusas y grises. **3** No se considera la transferencia de calor por convección.

Análisis Se puede considerar que el horno es un recinto cerrado de tres superficies con una red de radiación como la que se muestra en la figura, puesto que el ducto es muy largo y los efectos de los extremos son despreciables. Observamos que el factor de visión desde cualquiera de las superficies del recinto hacia cualquiera de las otras es 0.5, en virtud de la simetría. La superficie 3 es reirradiante, dado que la razón neta de la transferencia de calor en esa superficie es cero. Entonces, debemos tener $\dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2$, ya que todo el calor perdido por la superficie 1 debe ganarse por la 2. En este caso la red de radiación es una simple conexión serie-paralela y podemos determinar \dot{Q}_1 de manera directa a partir de

$$\dot{Q}_1 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13} + R_{23}} \right)^{-1}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \left(A_1 F_{12} + \frac{1}{1/A_1 F_{13} + 1/A_2 F_{23}} \right)^{-1}}$$

en donde

$$A_1 = A_2 = A_3 = wL = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2 \quad (\text{por unidad de longitud del ducto})$$

$$F_{12} = F_{13} = F_{23} = 0.5 \quad (\text{simetría})$$

$$E_{b1} = \sigma T_1^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(600 \text{ K})^4 = 7348 \text{ W/m}^2$$

$$E_{b2} = \sigma T_2^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1000 \text{ K})^4 = 56700 \text{ W/m}^2$$

Sustituyendo,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= \frac{(56700 - 7348) \text{ W/m}^2}{\frac{1 - 0.7}{0.7 \times 1 \text{ m}^2} + \left[(0.5 \times 1 \text{ m}^2) + \frac{1}{1/(0.5 \times 1 \text{ m}^2) + 1/(0.5 \times 1 \text{ m}^2)} \right]^{-1}} \\ &= 28.0 \text{ kW} \end{aligned}$$

Por lo tanto se debe suministrar calor a razón de 28 kW a la superficie calentada, por unidad de longitud del ducto, para mantener la operación estacionaria en el horno.

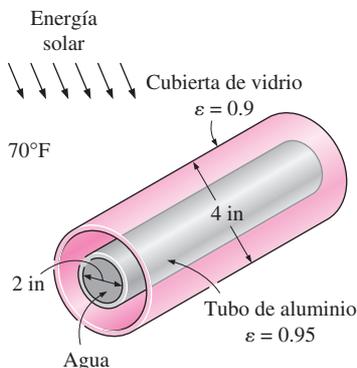


FIGURA 13-29

Esquema para el ejemplo 13-10.

EJEMPLO 13-10 Transferencia de calor a través de un colector solar tubular

Un colector solar consta de un tubo horizontal de aluminio que tiene un diámetro exterior de 2 in, encerrado en un tubo concéntrico de vidrio delgado de 4 in de diámetro, como se muestra en la figura 13-29. Se calienta agua conforme fluye por el tubo, y el espacio entre los tubos de aluminio y de vidrio está lleno con aire a la presión de 1 atm. Durante un día claro la bomba que hace circular el agua falla y la temperatura de la que se encuentra en el tubo empieza a elevarse. El tubo de aluminio absorbe radiación solar a razón de 30 Btu/h por pie de longitud y la temperatura del aire ambiente en el exterior es de 70°F. Las emisividades del tubo y de la cubierta de vidrio son 0.95 y 0.9, respectivamente. Tomando la temperatura efectiva del cielo como de 50°F, determine la tem-

peratura del tubo de aluminio cuando se establecen condiciones estacionarias de operación (es decir, cuando la razón de la pérdida de calor del tubo es igual a la cantidad de energía solar ganada por el mismo).

SOLUCIÓN Falla la bomba de circulación de un colector solar que consta de un tubo horizontal y su cubierta de vidrio. Se debe determinar la temperatura de equilibrio del tubo.

Hipótesis **1** Existen condiciones estacionarias de operación. **2** El tubo y su cubierta son isotérmicos. **3** El aire es un gas ideal. **4** Las superficies son opacas, difusas y grises para la radiación infrarroja. **5** La cubierta de vidrio es transparente a la radiación solar.

Propiedades Las propiedades del aire deben evaluarse a la temperatura promedio. Pero no se conoce la temperatura de salida del aire que está en el ducto y, por consiguiente, en este punto no es posible determinar las temperaturas de las masas de fluido ni de la cubierta de vidrio, por tanto, no se pueden evaluar las temperaturas promedio. Entonces, suponga que la temperatura del vidrio es de 110°F y use las propiedades a una temperatura promedio anticipada de $(70 + 110)/2 = 90^\circ\text{F}$ (tabla A-15I),

$$k = 0.01505 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$$

$$\text{Pr} = 0.7275$$

$$\nu = 1.753 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}$$

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{prom}}} = \frac{1}{550 \text{ R}}$$

Análisis En el capítulo 9 se resolvió este problema descartando la transferencia de calor por radiación. Ahora se repite la resolución considerando la ocurrencia simultánea de la convección natural y de la radiación.

Tenemos un recinto cerrado cilíndrico horizontal lleno con aire a la presión de 1 atm. El problema comprende la transferencia de calor del tubo de aluminio hacia la cubierta de vidrio y de la superficie exterior de esta cubierta hacia el aire ambiente circundante. Cuando se alcanza la operación estacionaria, estas dos razones de transferencia de calor deben ser iguales a la de la ganancia de calor; esto es,

$$\dot{Q}_{\text{tubo-vidrio}} = \dot{Q}_{\text{vidrio-ambiente}} = \dot{Q}_{\text{ganancia solar}} = 30 \text{ Btu/h} \quad (\text{por pie de tubo})$$

El área superficial para la transferencia de calor de la cubierta de vidrio es

$$A_o = A_{\text{vidrio}} = (\pi D_o L) = \pi(4/12 \text{ ft})(1 \text{ ft}) = 1.047 \text{ ft}^2 \quad (\text{por pie de tubo})$$

A fin de determinar el número de Rayleigh es necesario conocer la temperatura superficial del vidrio, de la cual no se dispone. Por lo tanto resulta evidente que la resolución requiere un procedimiento por tanteos. Suponiendo que la temperatura de la cubierta de vidrio sea de 110°F , se determina que el número de Rayleigh, el número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor por convección y la razón de la transferencia de calor por convección natural de la cubierta de vidrio hacia el aire ambiente son

$$\begin{aligned} \text{Ra}_{D_o} &= \frac{g\beta(T_o - T_\infty) D_o^3}{\nu^2} \text{Pr} \\ &= \frac{(32.2 \text{ ft/s}^2)[1/(550 \text{ R})](110 - 70 \text{ R})(4/12 \text{ ft})^3}{(1.753 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s})^2} (0.7275) = 2.054 \times 10^6 \\ \text{Nu} &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387 \text{ Ra}_{D_o}^{1/6}}{[1 + (0.559/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = \left\{ 0.6 + \frac{0.387(2.054 \times 10^6)^{1/6}}{[1 + (0.559/0.7275)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= 17.89 \end{aligned}$$

$$h_o = \frac{k}{D_o} \text{Nu} = \frac{0.01505 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot \text{R}^\circ\text{F}}{4/12 \text{ ft}} (17.88) = 0.8073 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^\circ\text{F}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{o, \text{conv}} &= h_o A_o (T_o - T_\infty) = (0.8073 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^\circ\text{F})(1.047 \text{ ft}^2)(110 - 70)^\circ\text{F} \\ &= 33.8 \text{ Btu/h} \end{aligned}$$

Asimismo,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{o, \text{rad}} &= \varepsilon_o \sigma A_o (T_o^4 - T_{\text{cielo}}^4) \\ &= (0.9)(0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4)(1.047 \text{ ft}^2)[(570 \text{ R})^4 - (510 \text{ R})^4] \\ &= 61.2 \text{ Btu/h} \end{aligned}$$

Entonces la razón total de la pérdida de calor desde la cubierta de vidrio queda

$$\dot{Q}_{o, \text{total}} = \dot{Q}_{o, \text{conv}} + \dot{Q}_{o, \text{rad}} = 33.8 + 61.2 = 95.0 \text{ Btu/h}$$

lo cual es mucho mayor que 30 Btu/h. Por lo tanto, la temperatura supuesta de 110°F para la cubierta de vidrio es alta. Repitiendo los cálculos con temperaturas más bajas (incluyendo la evaluación de las propiedades), se determina que la temperatura de dicha cubierta correspondiente a 30 Btu/h es de 78°F (sería de 106°F si se ignorara la radiación).

De manera semejante se determina la temperatura del tubo de aluminio usando las relaciones de la convección natural y de la radiación para dos cilindros concéntricos horizontales. En este caso la longitud característica es la distancia entre los dos cilindros, la cual es

$$L_c = (D_o - D_i)/2 = (4 - 2)/2 = 1 \text{ in} = 1/12 \text{ ft}$$

También,

$$A_i = A_{\text{tubo}} = (\pi D_i L) = \pi(2/12 \text{ ft})(1 \text{ ft}) = 0.5236 \text{ ft}^2 \quad (\text{por pie de tubo})$$

Se inician los cálculos suponiendo que la temperatura del tubo es de 122°F y, en consecuencia, una temperatura promedio de $(78 + 122)/2 = 100^\circ\text{F} = 560 \text{ R}$. Usando las propiedades a 100°F,

$$\begin{aligned} \text{Ra}_L &= \frac{g\beta(T_i - T_o)L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \\ &= \frac{(32.2 \text{ ft/s}^2)[1/(560 \text{ R})](122 - 78 \text{ R})(1/12 \text{ ft})^3}{(1.809 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s})^2} (0.726) = 3.246 \times 10^4 \end{aligned}$$

La conductividad térmica efectiva es

$$\begin{aligned} F_{\text{cil}} &= \frac{[\ln(D_o/D_i)]^4}{L_c^3 (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^5} \\ &= \frac{[\ln(4/2)]^4}{(1/12 \text{ ft})^3 [(2/12 \text{ ft})^{-3/5} + (4/12 \text{ ft})^{-3/5}]^5} = 0.1466 \\ k_{\text{ef}} &= 0.386k \left(\frac{\text{Pr}}{0.861 + \text{Pr}} \right)^{1/4} (F_{\text{cil}} \text{Ra}_L)^{1/4} \\ &= 0.386(0.01529 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot \text{R}^\circ\text{F}) \left(\frac{0.726}{0.861 + 0.726} \right) (0.1466 \times 3.248 \times 10^4)^{1/4} \\ &= 0.04032 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot \text{R}^\circ\text{F} \end{aligned}$$

Entonces la razón de la transferencia de calor entre los cilindros por convección queda

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{i, \text{conv}} &= \frac{2\pi k_{\text{ef}}}{\ln(D_o/D_i)} (T_i - T_o) \\ &= \frac{2\pi(0.04032 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F})}{\ln(4/2)} (122 - 78)^\circ\text{F} = 16.1 \text{ Btu/h}\end{aligned}$$

También,

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{i, \text{rad}} &= \frac{\sigma A_i (T_i^4 - T_o^4)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1 - \varepsilon_o}{\varepsilon_o} \left(\frac{D_i}{D_o}\right)} \\ &= \frac{(0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4)(0.5236 \text{ ft}^2)[(582 \text{ R})^4 - (538 \text{ R})^4]}{\frac{1}{0.95} + \frac{1 - 0.9}{0.9} \left(\frac{2 \text{ in}}{4 \text{ in}}\right)} \\ &= 25.1 \text{ Btu/h}\end{aligned}$$

Entonces la razón total de la pérdida de calor desde la cubierta de vidrio queda

$$\dot{Q}_{i, \text{total}} = \dot{Q}_{i, \text{conv}} + \dot{Q}_{i, \text{rad}} = 16.1 + 25.1 = 41.2 \text{ Btu/h}$$

la cual es mayor que 30 Btu/h. Por lo tanto, la temperatura supuesta de 122°F para el tubo es alta. Probando otros valores se determina que la temperatura del tubo correspondiente a 30 Btu/h es de **112°F** (sería de 180°F si se ignorara la radiación). Por lo tanto, el tubo alcanzará una temperatura de equilibrio de 112°F cuando la bomba falla.

Discusión Basándose en los resultados obtenidos resulta evidente que siempre debe considerarse la radiación en los sistemas que se calientan o enfrían por convección natural, a menos que las superficies que intervengan estén pulidas y, por consiguiente, tengan emisividades muy bajas.

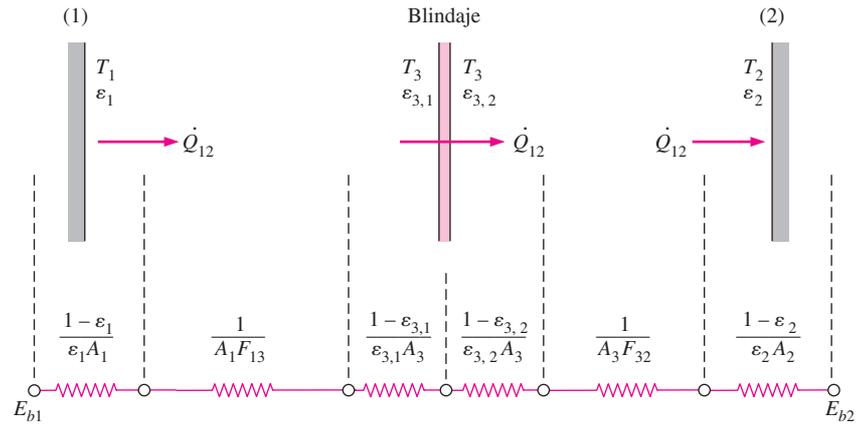
13-5 ■ BLINDAJES CONTRA LA RADIACIÓN Y EL EFECTO DE LA RADIACIÓN

La transferencia de calor por radiación entre dos superficies se puede reducir mucho insertando una lámina delgada de material de alta reflectividad (baja emisividad) entre ellas. Esas placas o cascos delgados intensamente reflectores se llaman **blindajes contra la radiación**. En aplicaciones criogénicas y espaciales son de uso común los blindajes contra la radiación de capas múltiples construidos con alrededor de 20 láminas por cm de espesor, separadas por un espacio en donde se hace el vacío. Los blindajes contra la radiación también se usan en las mediciones de temperaturas de fluidos con el fin de reducir el error causado por el efecto de la radiación cuando el sensor de temperatura se expone a superficies que están mucho más calientes o más frías que el propio fluido. El papel del blindaje es reducir la velocidad de la transferencia de calor por radiación colocando resistencias adicionales en la trayectoria del flujo de calor por radiación. Entre más baja sea la emisividad del blindaje, más elevada es la resistencia.

La transferencia de calor por radiación entre dos placas paralelas grandes de emisividades ε_1 y ε_2 , mantenidas a las temperaturas uniformes T_1 y T_2 , se expresa por medio de la ecuación 13-38.

FIGURA 13-30

Blindaje contra la radiación colocado entre dos placas paralelas y la red de radiación asociada con él.



$$\dot{Q}_{12, \text{ sin blindaje}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Considere ahora un blindaje contra la radiación entre estas dos placas, como se muestra en la figura 13-30. Suponga que las emisividades del blindaje de frente a las placas 1 y 2 son $\varepsilon_{3,1}$ y $\varepsilon_{3,2}$, respectivamente. Note que la emisividad de superficies diferentes del blindaje puede variar. La red de radiación de esta configuración geométrica se construye como es costumbre, trazando una resistencia superficial asociada con cada superficie y conectándolas con las resistencias del espacio, como se muestra en la figura. Las resistencias están conectadas en serie y, por tanto, la razón de la transferencia de calor por radiación es

$$\dot{Q}_{12, \text{ un blindaje}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_{3,1}}{A_3 \varepsilon_{3,1}} + \frac{1 - \varepsilon_{3,2}}{A_3 \varepsilon_{3,2}} + \frac{1}{A_3 F_{32}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}} \quad (13-42)$$

Dado que $F_{13} = F_{23} = 1$ y $A_1 = A_2 = A_3 = A$ para placas infinitas paralelas, la ecuación 13-42 se simplifica a

$$\dot{Q}_{12, \text{ un blindaje}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1\right)} \quad (13-43)$$

en donde los términos que se encuentran en el segundo juego de paréntesis en el denominador representan la resistencia adicional a la radiación introducida por el blindaje. El aspecto de esta última ecuación sugiere que las placas paralelas que comprenden blindajes múltiples contra la radiación se pueden manejar agregando al denominador un grupo de términos como éstos, en el segundo juego de paréntesis, por cada blindaje contra la radiación. Entonces la transferencia de calor por radiación a través de placas paralelas grandes separadas por N blindajes contra la radiación queda

$$\dot{Q}_{12, N \text{ blindajes}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1\right) + \cdots + \left(\frac{1}{\varepsilon_{N,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{N,2}} - 1\right)} \quad (13-44)$$

Si las emisividades de todas las superficies son iguales, la ecuación 13-44 se reduce a

$$\dot{Q}_{12, N \text{ blindajes}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(N + 1)\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1\right)} = \frac{1}{N + 1} \dot{Q}_{12, \text{ sin blindaje}} \quad (13-45)$$

Por lo tanto, cuando todas las emisividades son iguales, un blindaje reduce la razón de la transferencia de calor por radiación a la mitad, 9 blindajes la reducen a un décimo y 19 blindajes la reducen a un vigésimo (o 5%) de la que era cuando no había blindajes.

Se puede determinar la temperatura de equilibrio T_3 del blindaje contra la radiación de la figura 13-30 expresando la ecuación 13-43 para \dot{Q}_{13} o \dot{Q}_{23} (la cual comprende T_3), evaluando después \dot{Q}_{12} basándose en esa ecuación y notando que $\dot{Q}_{12} = \dot{Q}_{13} = \dot{Q}_{23}$ cuando se alcanzan las condiciones estacionarias.

De manera semejante se pueden manejar los blindajes contra la radiación usados para reducir la razón de la transferencia de calor por radiación entre cilindros y esferas concéntricos. En el caso de un blindaje, se puede usar la ecuación 13-42, tomando $F_{13} = F_{23} = 1$ para ambos casos y reemplazando las A por las relaciones apropiadas de área.

Efecto de la radiación sobre las mediciones de temperatura

Un instrumento de medición de temperatura indica la temperatura de su *sensor*, la cual se supone que es, mas no necesariamente, la temperatura del medio con el que ese sensor se encuentra en contacto. Cuando un termómetro (o cualquier otro aparato para medir temperaturas, como un termopar) se coloca en un medio, tiene lugar una transferencia de calor por convección entre el sensor de ese termómetro y el medio, hasta que dicho sensor alcanza la temperatura del medio. Pero cuando el sensor está rodeado por superficies que se encuentran a temperaturas diferentes a la del fluido, tendrá a efecto un intercambio por radiación entre el sensor y las superficies circundantes. Cuando se equilibran entre sí las transferencias de calor por convección y radiación, el sensor indicará una temperatura que cae entre la del fluido y la de las superficies. Enseguida se desarrolla un procedimiento para tomar en cuenta el efecto de la radiación y determinar la temperatura real del fluido.

Considere un termómetro que se usa para medir la temperatura de un fluido que fluye por un canal largo cuyas paredes se encuentran a temperaturas más bajas que las de dicho fluido (figura 13-31). El equilibrio se establecerá y la lectura del termómetro se estabilizará cuando la ganancia de calor por convección, según la mide el sensor, es igual a la pérdida de calor por radiación (o viceversa). Es decir, en términos de la unidad de área,

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{conv, hacia el sensor}} &= \dot{q}_{\text{rad, desde el sensor}} \\ h(T_f - T_{\text{term}}) &= \varepsilon_{\text{term}} \sigma(T_{\text{term}}^4 - T_w^4) \end{aligned}$$

o bien,

$$T_f = T_{\text{term}} + \frac{\varepsilon_{\text{term}} \sigma(T_{\text{term}}^4 - T_w^4)}{h} \quad (K) \quad (13-46)$$

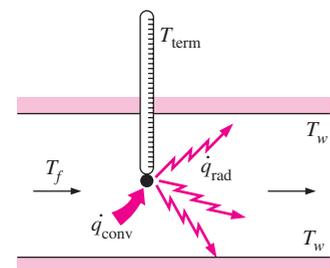


FIGURA 13-31

Un termómetro usado para medir la temperatura de un fluido en un canal.

en donde

$$\begin{aligned}
 T_f &= \text{temperatura real del fluido, K} \\
 T_{\text{term}} &= \text{valor de temperatura medido por el termómetro, K} \\
 T_w &= \text{temperatura de las superficies circundantes, K} \\
 h &= \text{coeficiente de transferencia de calor por convección, W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 \varepsilon &= \text{emisividad del sensor del termómetro}
 \end{aligned}$$

El último término de la ecuación 13-46 se debe al *efecto de la radiación* y representa la *corrección por radiación*. Note que el término de corrección por radiación es más significativo cuando el coeficiente de transferencia de calor por convección es pequeño y la emisividad de la superficie del sensor es grande. Por lo tanto, el sensor debe recubrirse con un material de alta reflectividad (o baja emisividad) para reducir el efecto de la radiación.

Colocar el sensor en un blindaje contra la radiación, sin interferir con el movimiento del fluido, también reduce el efecto de la radiación. Los sensores de los aparatos para medición de la temperatura que se usan en el exterior deben protegerse contra la luz solar directa, ya que en ese caso el efecto de la radiación es seguro que alcance niveles inaceptables.

El efecto de la radiación también es significativo en la *comodidad humana* en lo referente a los sistemas de calefacción y acondicionamiento del aire. Una persona que se siente bien en un cuarto puede sentir frío en otro a la misma temperatura como resultado del efecto de la radiación, en el caso de que las paredes del segundo cuarto se encuentran a una temperatura considerablemente más baja. Por ejemplo, la mayoría de las personas se sentirán confortables en un cuarto a 22°C si las paredes se encuentran aproximadamente a esa temperatura. Cuando por alguna razón la temperatura de las paredes cae hasta 5°C, la temperatura interior del cuarto debe elevarse hasta por lo menos 27°C para mantener el mismo nivel de comodidad. Por lo tanto, los edificios bien aislados no sólo conservan la energía al reducir la pérdida o ganancia de calor, sino también al permitir que los termostatos se ajusten a una temperatura más baja en invierno y a una más elevada en verano, sin comprometer el nivel de comodidad.

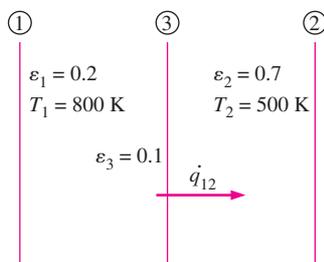


FIGURA 13-32

Esquema para el ejemplo 13-11.

EJEMPLO 13-11 Blindajes contra la radiación

Se coloca una hoja delgada de aluminio con una emisividad de 0.1 en ambos lados, entre dos placas paralelas muy grandes que se mantienen a las temperaturas uniformes $T_1 = 800 \text{ K}$ y $T_2 = 500 \text{ K}$ y tienen las emisividades $\varepsilon_1 = 0.2$ y $\varepsilon_2 = 0.7$, respectivamente, como se muestra en la figura 13-32. Determine la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre las dos placas, por unidad de área superficial de las mismas y compare el resultado con el correspondiente si no existiera el blindaje.

SOLUCIÓN Se coloca una hoja delgada de aluminio entre dos placas paralelas grandes mantenidas a temperaturas uniformes. Se deben determinar las razones netas de la transferencia de calor por radiación entre las dos placas, con y sin el blindaje.

Suposición Las superficies son opacas, difusas y grises.

Análisis En el ejemplo 13-7 se determinó que la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos placas, sin el blindaje, era de 3625 W/m². A partir de la ecuación 13-43 se determina que la transferencia de calor en presencia de un blindaje es

$$\begin{aligned}\dot{q}_{12, \text{ un blindaje}} &= \frac{\dot{Q}_{12, \text{ un blindaje}}}{A} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1\right)} \\ &= \frac{(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(800 \text{ K})^4 - (500 \text{ K})^4]}{\left(\frac{1}{0.2} + \frac{1}{0.7} - 1\right) + \left(\frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.1} - 1\right)} \\ &= \mathbf{806 \text{ W/m}^2}\end{aligned}$$

Discusión Note que la razón de transferencia de calor por radiación se reduce a alrededor de la cuarta parte de la que fue, como resultado de la colocación de un blindaje contra la radiación entre las dos placas paralelas.

EJEMPLO 13-12 Efecto de la radiación sobre las mediciones de temperatura

Un termómetro que se usa para medir la temperatura del aire caliente que fluye en un ducto cuyas paredes se mantienen a $T_w = 400 \text{ K}$ muestra una lectura de $T_{\text{term}} = 650 \text{ K}$ (figura 13-33). Suponiendo que la emisividad de la unión del termopar es $\varepsilon = 0.6$ y el coeficiente de transferencia de calor por convección es $h = 80 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, determine la temperatura real del aire.

SOLUCIÓN Se mide la temperatura del aire en un ducto. Se debe determinar la temperatura real del aire, tomando en cuenta el efecto de la radiación.

Suposición Las superficies son opacas, difusas y grises.

Análisis Las paredes del ducto se encuentran a una temperatura considerablemente más baja que la del aire en su interior y, por consiguiente, esperamos que el termopar muestre una lectura más baja que la temperatura real del aire como resultado del efecto de la radiación. Basándose en la ecuación 13-46 se determina que la temperatura real del aire es

$$\begin{aligned}T_f &= T_{\text{term}} + \frac{\varepsilon_{\text{term}} \sigma (T_{\text{term}}^4 - T_w^4)}{h} \\ &= (650 \text{ K}) + \frac{0.6 \times (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(650 \text{ K})^4 - (400 \text{ K})^4]}{80 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \\ &= \mathbf{715 \text{ K}}\end{aligned}$$

Note que en este caso el efecto de la radiación causa una diferencia de 65°C (o 65 K , puesto que $^\circ\text{C} = \text{K}$ para las diferencias de temperatura) en la lectura de la temperatura.

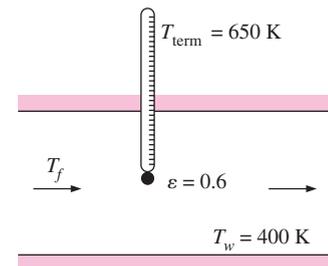


FIGURA 13-33
Esquema para el ejemplo 13-12.

13-6 ■ INTERCAMBIO DE RADIACIÓN CON GASES EMISORES Y ABSORBENTES

Hasta ahora se ha considerado la transferencia de calor por radiación entre superficies separadas por un medio que no emite, absorbe o dispersa la radiación; un medio no participante que es por completo transparente a la radiación térmica. Un vacío satisface esta condición a la perfección y el aire a temperaturas y presiones comunes se aproxima mucho. Los gases que constan de moléculas monoatómicas, como el Ar y el He, y de moléculas biatómicas

simétricas, como el N_2 y el O_2 , son bastante transparentes a la radiación, excepto a temperaturas extremadamente elevadas en las cuales ocurre la ionización. Por lo tanto, el aire atmosférico se puede considerar como un medio no participante en los cálculos relativos a la radiación.

Los gases con moléculas asimétricas, como el H_2O , CO_2 , CO , SO_2 y los hidrocarburos H_nC_m , puede ser que participen en el proceso de radiación por absorción, a temperaturas moderadas y por absorción y emisión a temperaturas elevadas como las que se encuentran en las cámaras de combustión. Por lo tanto, el aire o cualquier otro medio que contenga ese tipo de gases con moléculas asimétricas en concentraciones suficientes debe tratarse como un medio participante en los cálculos relativos a la radiación. Por ejemplo, los gases de la combustión en un horno o una cámara de combustión contienen cantidades suficientes de H_2O y CO_2 y, por consiguiente, debe tomarse en consideración la emisión y la absorción de los gases en los hornos.

La presencia de un medio participante complica de manera considerable el análisis relativo a la radiación por varias razones:

- Un medio participante emite y absorbe radiación en todo su volumen. Es decir, la radiación gaseosa es un *fenómeno volumétrico* y, por tanto, depende del tamaño y de la forma del cuerpo. Éste es el caso incluso si la temperatura es uniforme en todo el medio.
- Los gases emiten y absorben radiación en varias bandas angostas de longitudes de onda. Esto contrasta con los sólidos, los cuales emiten y absorben radiación sobre todo el espectro. Por lo tanto, la hipótesis de ser gris no siempre puede ser apropiada para un gas, incluso cuando las superficies circundantes sean grises.
- Las características de emisión y absorción de los constituyentes de una mezcla de gases también dependen de la temperatura, presión y composición de esa mezcla. Por lo tanto, la presencia de otros gases participantes afecta las características de radiación de un gas en particular.

La propagación de la radiación a través de un medio se puede complicar todavía más por la presencia de *aerosoles*, como el polvo, las partículas de hielo, las gotitas de líquido y las partículas de hollín (carbón no quemado) que *dispersan* la radiación. La dispersión se refiere al cambio de dirección de la radiación debido a la reflexión, refracción y difracción. La dispersión causada por las propias moléculas de gas se conoce como *dispersión de Rayleigh* y tiene un efecto despreciable sobre la transferencia de calor. La transferencia por radiación en medios dispersantes se considera en libros avanzados como los de Modest (1993) y de Siegel y Howell (1992).

Los medios participantes también pueden ser líquidos o sólidos semitransparentes, como el agua, el vidrio y los plásticos. Para mantener los aspectos complejos en un nivel manejable, limitemos nuestra consideración a los gases que emiten y absorben radiación. En particular consideremos la emisión y absorción de radiación sólo por el H_2O y el CO_2 , dado que son los gases participantes que se encuentran con mayor frecuencia en la práctica (los productos de la combustión en los hornos y las cámaras de combustión en los que se queman hidrocarburos contienen los dos gases en concentraciones elevadas) y bastan para demostrar los principios básicos que intervienen.

Propiedades relativas a la radiación de un medio participante

Considere un medio participante de espesor L . Sobre el medio incide un haz de radiación espectral de intensidad $I_{\lambda, 0}$, el cual es atenuado conforme se pro-

paga debido a la absorción. La disminución en la intensidad de la radiación a medida que pasa a través de una capa de espesor dx es proporcional a la propia intensidad y al espesor dx . Esto se conoce como **ley de Beer** y se expresa como (figura 13-34)

$$dI_\lambda(x) = -\kappa_\lambda I_\lambda(x) dx \quad (13-47)$$

en donde la constante de proporcionalidad κ_λ es el **coeficiente de absorción espectral** del medio y cuya unidad es m^{-1} (a partir del requisito de homogeneidad dimensional). Esto es precisamente como el monto del interés ganado por una cuenta bancaria durante un intervalo de tiempo, siendo proporcional a la cantidad de dinero en la cuenta y al intervalo de tiempo, siendo la tasa de interés la constante de proporcionalidad.

Separando las variables e integrando desde $x = 0$ hasta $x = L$ da

$$\frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{-\kappa_\lambda L} \quad (13-48)$$

en donde hemos supuesto que la absorptividad del medio es independiente de x . Note que la intensidad de la radiación decae en forma exponencial según la ley de Beer.

La **transmisividad espectral** de un medio se puede definir como la razón entre la intensidad de la radiación que sale del medio y la que entra en éste; es decir,

$$\tau_\lambda = \frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{-\kappa_\lambda L} \quad (13-49)$$

Note que $\tau_\lambda = 1$ cuando no se absorbe radiación y, como consecuencia, su intensidad permanece constante. También la transmisividad espectral de un medio representa la fracción de la radiación transmitida por ese medio a cierta longitud de onda.

La radiación que pasa a través de un medio no dispersante (y, por consiguiente, no reflector) es absorbida o transmitida. Por lo tanto, $\alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1$, y la **absortividad espectral** de un medio de espesor L es

$$\alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda = 1 - e^{-\kappa_\lambda L} \quad (13-50)$$

Con base en la ley de Kirchoff, la **emisividad espectral** del medio es

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - e^{-\kappa_\lambda L} \quad (13-51)$$

Note que la absorptividad, transmisividad y emisividad espectrales de un medio son cantidades adimensionales, con valores menores o iguales a 1. En general, el coeficiente de absorción espectral de un medio (y, por tanto, ε_λ , α_λ y τ_λ) varía con la longitud de onda, la temperatura, la presión y la composición.

Para un medio *ópticamente grueso* (un medio con un valor grande de $\kappa_\lambda L$), la ecuación 13-51 da $\varepsilon_\lambda \approx \alpha_\lambda \approx 1$. Por ejemplo, para $\kappa_\lambda L = 5$, $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \approx 0.993$. Por lo tanto, un medio ópticamente grueso emite como un cuerpo negro a una longitud de onda dada. Como resultado, un medio absorbente-emisor ópticamente grueso con dispersión no significativa a una temperatura dada T_g se puede concebir como una “superficie negra” a T_g , ya que absorberá casi toda la radiación que pase a través de él y emitirá la máxima radiación que pueda ser emitida por una superficie a T_g , la cual es $E_{b\lambda}(T_g)$.

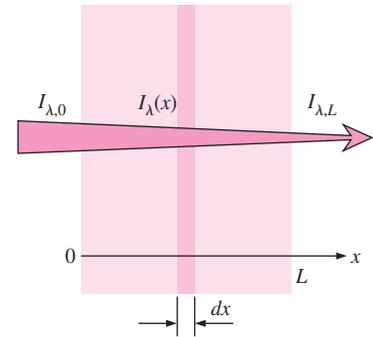


FIGURA 13-34

Atenuación de un haz de radiación mientras pasa a través de un medio absorbente de espesor L .

Emisividad y absorptividad de gases y mezclas de ellos

En la figura 13-35 se da la absorptividad espectral del CO_2 en función de la longitud de onda. Las diversos picos y valles en la figura, junto con las discontinuidades, muestran con claridad la naturaleza de las bandas de absorción y las fuertes características de no gris. La forma y ancho de las bandas de absorción varían con la temperatura y la presión, pero la magnitud de la absorptividad también varía con el espesor de la capa de gas. Por lo tanto, los valores de la absorptividad sin espesor y presión especificados no tienen significado.

Para tener una gran exactitud debe considerarse la naturaleza de no gris de las propiedades en los cálculos relativos a la radiación. Esto se puede realizar usando un modelo de bandas y, de este modo, realizando los cálculos para cada banda de absorción. Sin embargo, se pueden obtener resultados satisfactorios suponiendo que el gas es gris y usando una absorptividad y una emisividad totales efectivas determinadas por algún proceso en el que se establezca un promedio. Hottel (1954) presentó por primera vez diagramas para las emisividades totales de gases y se han usado con amplitud en los cálculos referentes a la radiación, con exactitud razonable. En fecha más reciente Edwards y Matavosian (1984) han desarrollado diagramas y procedimientos de cálculo alternativos para las emisividades. Por su sencillez, en este texto presentamos el enfoque de Hottel.

Incluso con la hipótesis de ser gris, la emisividad y absorptividad totales de un gas dependen de la configuración geométrica de su masa, así como de la temperatura, presión y composición. Los gases que participan en el intercambio de radiación, como el CO_2 y el H_2O , típicamente coexisten con gases no participantes, como el N_2 y el O_2 , y por consiguiente suelen darse los datos de las propiedades relativas a la radiación para una mezcla en lugar de para el gas puro. La emisividad y la absorptividad de un componente gaseoso en una mezcla dependen principalmente de su densidad, la cual es función de la temperatura y de la presión parcial de ese gas.

En la figura 13-36a se tiene la gráfica de la emisividad del vapor de H_2O en una mezcla de gases no participantes, para una presión total de $P = 1$ atm, como función de la temperatura T_g del gas para un rango de valores de $P_w L$, en donde P_w es la presión parcial del vapor de agua y L es la distancia media recorrida por el haz de radiación. La emisividad a una presión total P distinta a

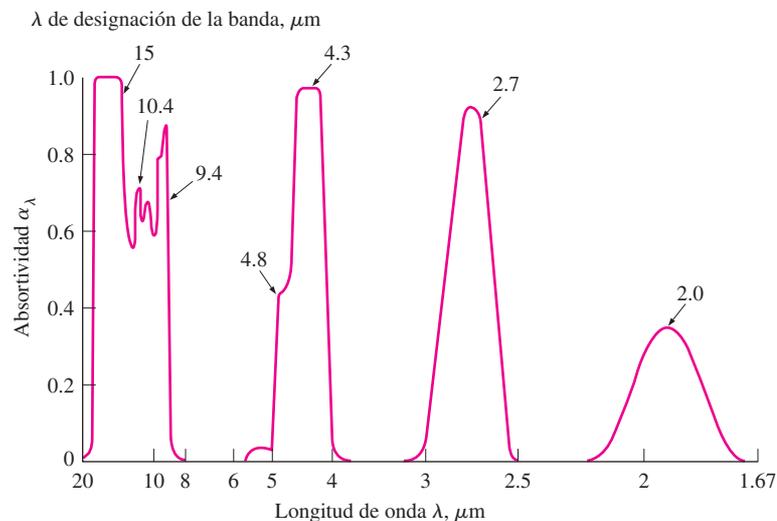


FIGURA 13-35

Absorptividad espectral del CO_2 a 830 K y 10 atm para una longitud de trayectoria de 38.8 cm.

(Tomado de Siegel y Howell, 1992.)

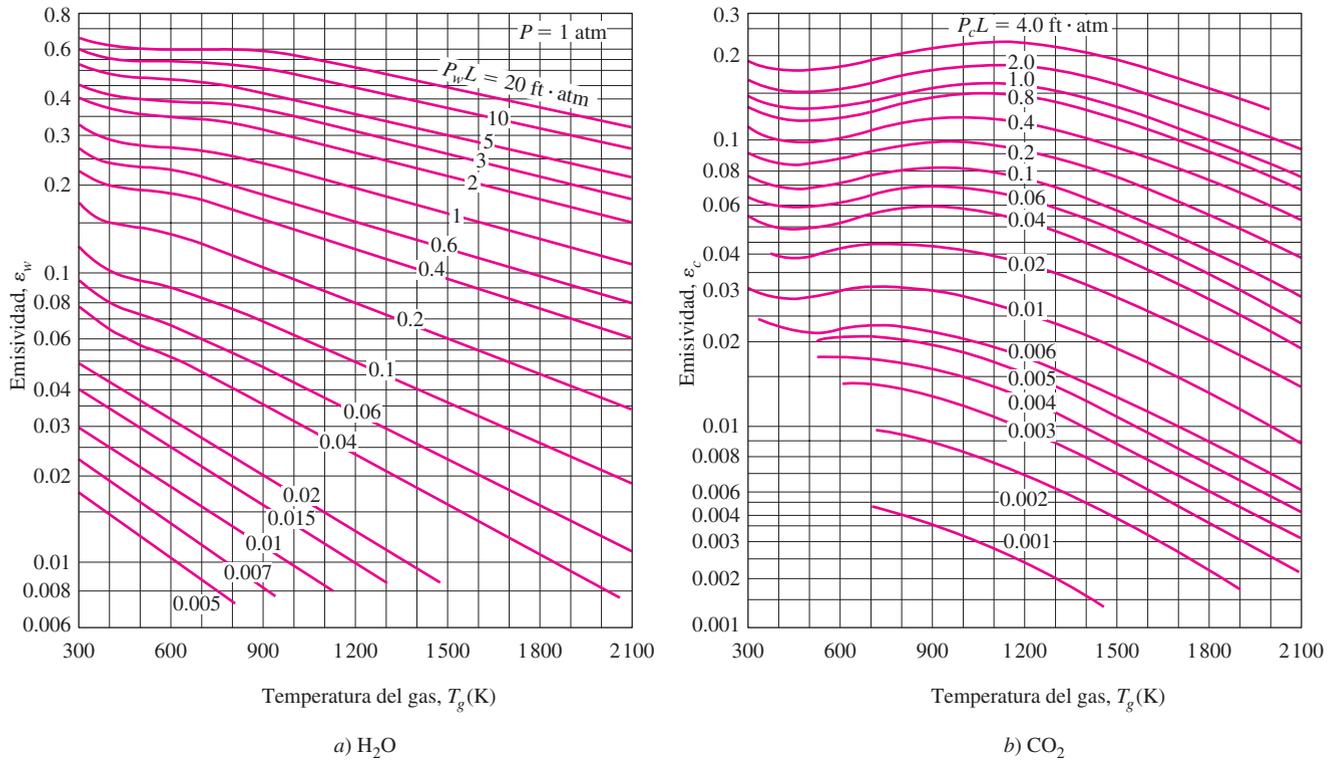


FIGURA 13-36
Emisividades de los gases H₂O y CO₂ en una mezcla de gases no participantes a una presión total de 1 atm, para una longitud media del haz de L ($1 \text{ m} \cdot \text{atm} = 3.28 \text{ ft} \cdot \text{atm}$).
(Tomado de Hottel, 1954.)

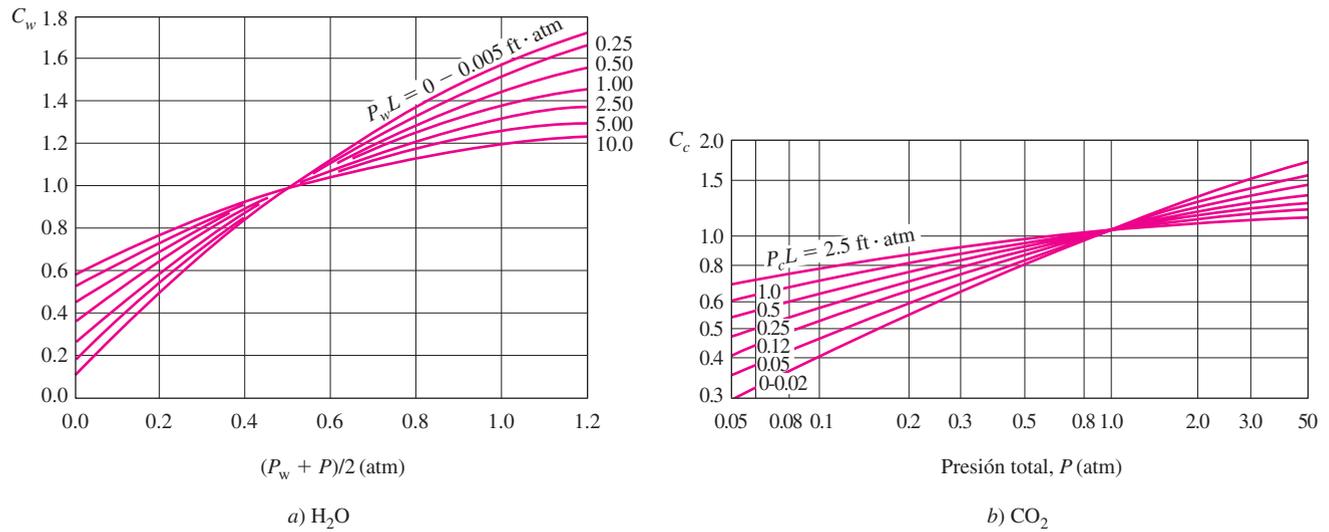


FIGURA 13-37
Factores de corrección para las emisividades de los gases H₂O y CO₂ a presiones diferentes de 1 atm, para usarse en las relaciones $\epsilon_w = C_w \epsilon_{w, 1 \text{ atm}}$ y $\epsilon_c = C_c \epsilon_{c, 1 \text{ atm}}$ ($1 \text{ m} \cdot \text{atm} = 3.28 \text{ ft} \cdot \text{atm}$).
(Tomado de Hottel, 1954.)

1 atm se determina al multiplicar el valor de la emisividad a 1 atm por un **factor de corrección por la presión** C_w obtenido a partir de la figura 13-37a para el vapor de agua; es decir

$$\varepsilon_w = C_w \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} \quad (13-52)$$

Note que $C_w = 1$ para $P = 1$ atm y, por tanto $(P_w + P)/2 \cong 0.5$ (se usa una concentración muy baja de vapor de agua en la preparación del diagrama de emisividad de la figura 13-36a y, por tanto, P_w es muy baja). En las figuras 13-36b y 13-37b, se presentan valores de la emisividad de manera semejante para una mezcla de CO_2 y gases no participantes.

Ahora la pregunta que viene a la mente es qué sucederá si los gases CO_2 y H_2O existen *juntos* en una mezcla con gases no participantes. Se puede determinar la emisividad de cada gas participante, como se explicó con anterioridad, usando su presión parcial, pero no es posible calcular la emisividad efectiva de la mezcla sumando sencillamente las emisividades de cada uno de los gases (aun cuando éste sería el caso si los diferentes gases emitieran a longitudes de onda diferentes). En lugar de ello, se debe determinar a partir de

$$\begin{aligned} \varepsilon_g &= \varepsilon_c + \varepsilon_w - \Delta\varepsilon \\ &= C_c \varepsilon_{c, 1 \text{ atm}} + C_w \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} - \Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (13-53)$$

en donde $\Delta\varepsilon$ es el **factor de corrección de la emisividad**, el cual toma en cuenta el traslape de las bandas de emisión. En la figura 13-38 se tiene la gráfica de $\Delta\varepsilon$ para una mezcla que contiene tanto CO_2 como H_2O gaseosos.

La emisividad de un gas también depende de la *longitud media* que un haz de radiación emitida recorre en el gas antes de alcanzar una superficie límite y, de este modo, de la forma y el tamaño de la masa gaseosa que interviene. Durante sus experimentos en la década de 1930 Hottel y sus colaboradores consideraron la emisión de radiación desde una masa hemisférica de gas hacia un pequeño elemento de superficie ubicado en el centro de la base del hemisferio. Es evidente que resulta conveniente extender los datos de la emisividad de los que se informó hacia masas de gases de otras configuracio-

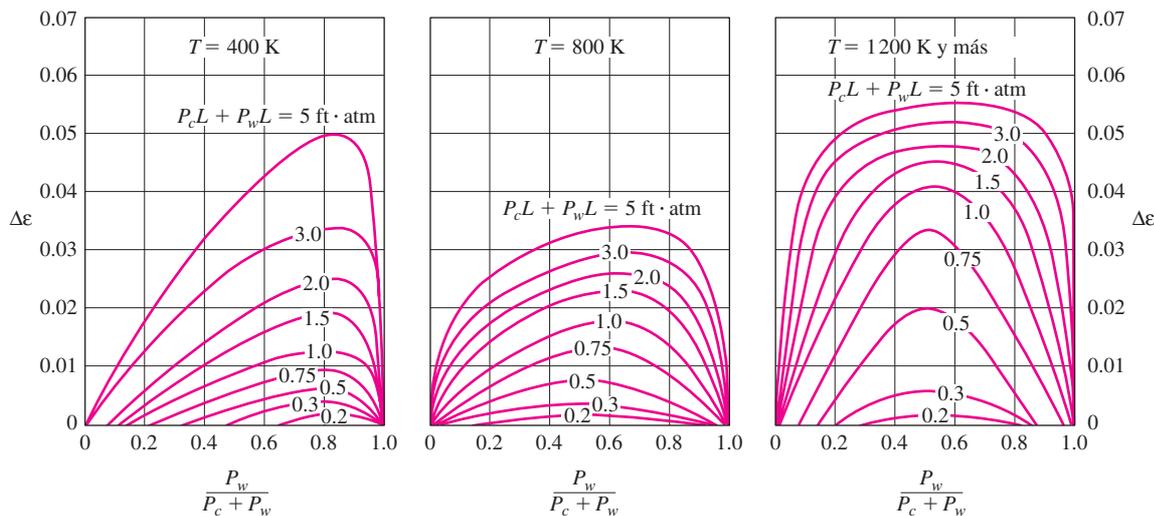


FIGURA 13-38

Corrección $\Delta\varepsilon$ de la emisividad para usarse en $\varepsilon_g = \varepsilon_c + \varepsilon_w - \Delta\varepsilon$ cuando están presentes tanto el CO_2 como el vapor de H_2O en una mezcla de gases ($1 \text{ m} \cdot \text{atm} = 3.28 \text{ ft} \cdot \text{atm}$).

(Tomado de Hottel, 1954.)

nes geométricas y esto se lleva a cabo mediante la introducción del concepto de **longitud media del haz** L , la cual representa al radio de un hemisferio equivalente. En la tabla 13-4 se da una lista de longitudes medias del haz para varias configuraciones geométricas del gas. En la literatura [como Hottel (1954) y Siegel y Howell (1992)], se encuentran listas más extensas. Las emisividades asociadas con estas configuraciones geométricas se pueden determinar mediante las figuras 13-36 a 13-38 utilizando la longitud media apropiada del haz.

Siguiendo un procedimiento recomendado por Hottel, la absorptividad de un gas que contiene los gases CO_2 y H_2O , para la radiación emitida por una fuente a la temperatura T_s , se puede determinar de manera semejante a partir de

$$\alpha_g = \alpha_c + \alpha_w - \Delta\alpha \quad (13-54)$$

en donde $\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$ y se determina con base en la figura 13-38 a la temperatura T_s de la fuente. Las absorptividades del CO_2 y el H_2O se pueden determinar a partir de los diagramas de emisividad (figuras 13-36 y 13-37) como

$$\text{CO}_2: \quad \alpha_c = C_c \times (T_g/T_s)^{0.65} \times \varepsilon_c(T_s, P_c L T_s/T_g) \quad (13-55)$$

y

$$\text{H}_2\text{O}: \quad \alpha_w = C_w \times (T_g/T_s)^{0.45} \times \varepsilon_w(T_s, P_w L T_s/T_g) \quad (13-56)$$

La notación indica que las emisividades deben evaluarse usando T_s en lugar de T_g (en K o en R), $P_c L T_s/T_g$ en lugar de $P_c L$ y $P_w L T_s/T_g$ en lugar de $P_w L$. Note que la absorptividad del gas depende de la temperatura de la fuente T_s así como de la temperatura del gas, T_g . Asimismo, $\alpha = \varepsilon$ cuando $T_s = T_g$, como era de esperarse. Los factores de corrección C_c y C_w se evalúan usando $P_c L$ y $P_w L$, como en los cálculos de la emisividad.

TABLA 13-4

Longitud media del haz L para varias formas del volumen de gas

Configuración geométrica del volumen de gas	L
Hemisferio de radio R irradiando hacia el centro de su base	R
Esfera de diámetro D irradiando hacia su superficie	$0.65D$
Cilindro circular infinito de diámetro D irradiando hacia la superficie curva	$0.95D$
Cilindro circular semiinfinito de diámetro D irradiando hacia su base	$0.65D$
Cilindro circular semiinfinito de diámetro D irradiando hacia el centro de su base	$0.90D$
Cilindro semicircular infinito de radio R irradiando hacia el centro de su base	$1.26R$
Cilindro circular de altura igual al diámetro D irradiando hacia toda la superficie	$0.60D$
Cilindro circular de altura igual al diámetro D irradiando hacia el centro de su base	$0.71D$
Losa infinita de espesor D irradiando hacia cualquiera de los dos planos que la limitan	$1.80D$
Cubo de longitud L por lado irradiando hacia cualquiera de las caras	$0.66L$
Forma arbitraria de volumen V y área superficial A_s irradiando hacia la superficie	$3.6V/A_s$

Cuando se conoce la emisividad total de un gas ϵ_g a la temperatura T_g , se puede expresar el poder de emisión de ese gas (radiación emitida por el gas por unidad de área superficial) como $E_g = \epsilon_g \sigma T_g^4$. Entonces la razón a la que se emite la energía de radiación por un gas hacia una superficie límite de área A queda

$$\dot{Q}_{g,e} = \epsilon_g A_s \sigma T_g^4 \quad (13-57)$$

Si la superficie límite es negra a la temperatura T_s , emitirá radiación hacia el gas a razón de $A_s \sigma T_s^4$ sin que refleje nada y el gas la absorberá a razón de $\alpha_g A_s \sigma T_s^4$, en donde α_g es la absorptividad de ese gas. Entonces la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre el gas y una superficie negra que lo rodea queda:

$$\text{Recinto negro:} \quad \dot{Q}_{\text{neta}} = A_s \sigma (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \quad (13-58)$$

Si la superficie no es negra el análisis se vuelve más complicado debido a la radiación reflejada por ella. Pero para las superficies que son casi negras, con una emisividad $\epsilon_s > 0.7$, Hottel (1954) recomienda esta modificación:

$$\dot{Q}_{\text{neta, gris}} = \frac{\epsilon_s + 1}{2} \dot{Q}_{\text{neta, negra}} = \frac{\epsilon_s + 1}{2} A_s \sigma (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \quad (13-59)$$

Las emisividades de las superficies de las paredes de los hornos y de las cámaras de combustión típicamente son mayores a 0.7 y, por consiguiente, la relación que se acaba de dar resulta muy conveniente para los cálculos preliminares de la transferencia de calor por radiación.

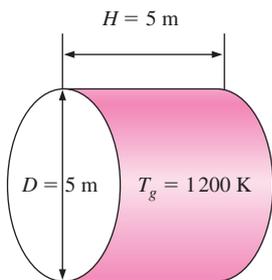


FIGURA 13-39

Esquema para el ejemplo 13-13.

EJEMPLO 13-13 Emisividad efectiva de los gases de combustión

Un horno cilíndrico cuya altura y diámetro son de 5 m contiene gases de combustión a 1200 K a una presión total de 2 atm. Mediante análisis volumétrico se determina que la composición de los gases de combustión es 80% de N_2 , 8% de H_2O , 7% de O_2 y 5% de CO_2 . Determine la emisividad efectiva de los gases de combustión (figura 13-39).

SOLUCIÓN Se dan la temperatura, presión y composición de una mezcla de gases. Debe determinarse la emisividad de la mezcla.

Suposiciones 1 Todos los gases de la mezcla son ideales. 2 La emisividad que se determine es un promedio de la radiación emitida hacia todas las superficies del recinto cilíndrico.

Análisis El análisis volumétrico de una mezcla de gases permite determinar las fracciones molares y_i de los componentes, las cuales son equivalentes a las fracciones de presión para una mezcla de gases ideales. Por lo tanto, las presiones parciales del CO_2 y el H_2O son

$$P_c = y_{CO_2} P = 0.05(2 \text{ atm}) = 0.10 \text{ atm}$$

$$P_w = y_{H_2O} P = 0.08(2 \text{ atm}) = 0.16 \text{ atm}$$

La longitud media del haz para un cilindro de diámetro y altura iguales, para la radiación emitida hacia todas las superficies, es, según la tabla 13-4,

$$L = 0.60D = 0.60(5 \text{ m}) = 3 \text{ m}$$

Entonces,

$$P_c L = (0.10 \text{ atm})(3 \text{ m}) = 0.30 \text{ m} \cdot \text{atm} = 0.98 \text{ ft} \cdot \text{atm}$$

$$P_w L = (0.16 \text{ atm})(3 \text{ m}) = 0.48 \text{ m} \cdot \text{atm} = 1.57 \text{ ft} \cdot \text{atm}$$

Las emisividades de CO_2 y H_2O correspondientes a estos valores, a la temperatura de los gases de $T_g = 1200 \text{ K}$ y a 1 atm son, tomándolos de la figura 13-36,

$$\varepsilon_{c, 1 \text{ atm}} = 0.16 \quad \text{y} \quad \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} = 0.23$$

Estos son los valores base de las emisividades a 1 atm y es necesario corregirlos para la presión total de 2 atm. Dado que $(P_w + P)/2 = (0.16 + 2)/2 = 1.08 \text{ atm}$, los factores de corrección son, tomándolos de la figura 13-37,

$$C_c = 1.1 \quad \text{y} \quad C_w = 1.4$$

Tanto el CO_2 como el H_2O están presentes en la misma mezcla y es necesario corregir por el traslape de las bandas de emisión. El factor de corrección de la emisividad a $T = T_g = 1200 \text{ K}$ es, de acuerdo con la figura 13-38,

$$\left. \begin{aligned} P_c L + P_w L &= 0.98 + 1.57 = 2.55 \\ \frac{P_w}{P_w + P_c} &= \frac{0.16}{0.16 + 0.10} = 0.615 \end{aligned} \right\} \Delta\varepsilon = 0.048$$

Entonces la emisividad efectiva de los gases de combustión queda

$$\varepsilon_g = C_c \varepsilon_{c, 1 \text{ atm}} + C_w \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} - \Delta\varepsilon = 1.1 \times 0.16 + 1.4 \times 0.23 - 0.048 = \mathbf{0.45}$$

Discusión La anterior es la emisividad promedio para la radiación emitida hacia todas las superficies del recinto cilíndrico. Para la radiación emitida hacia el centro de la base la longitud media del haz es $0.71D$, en lugar de $0.60D$, y el valor de la emisividad sería diferente.

EJEMPLO 13-14 Transferencia de calor por radiación en un horno cilíndrico

Vuelva a considerar el horno cilíndrico discutido en el ejemplo 13-13. Para una temperatura de las paredes de 600 K determine la absorptividad de los gases de combustión y la razón de la transferencia de calor por radiación de estos gases hacia las paredes del horno (figura 13-40).

SOLUCIÓN Se dan las temperaturas de las superficies de las paredes y de los gases de combustión para un horno cilíndrico. Deben determinarse la absorptividad de la mezcla de gases y la razón de la transferencia de calor por radiación de estos gases hacia las paredes del horno.

Suposiciones **1** Todos los gases de la mezcla son ideales. **2** Todas las superficies interiores de las paredes del horno son negras. **3** La dispersión por el hollín y otras partículas es despreciable.

Análisis En el ejemplo anterior se determinó que la emisividad promedio de los gases de combustión a la temperatura $T_g = 1200 \text{ K}$ es $\varepsilon_g = 0.45$. Para una

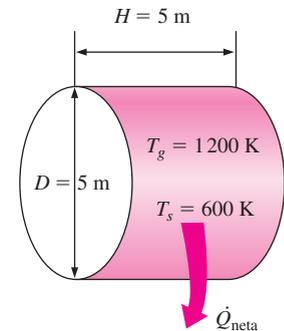


FIGURA 13-40

Esquema para el ejemplo 13-14.

temperatura de la fuente de $T_s = 600$ K, una vez más se determina la absorptividad del gas mediante los diagramas de emisividad, como

$$P_c L \frac{T_s}{T_g} = (0.10 \text{ atm})(3 \text{ m}) \frac{600 \text{ K}}{1200 \text{ K}} = 0.15 \text{ m} \cdot \text{atm} = 0.49 \text{ ft} \cdot \text{atm}$$

$$P_w L \frac{T_s}{T_g} = (0.16 \text{ atm})(3 \text{ m}) \frac{600 \text{ K}}{1200 \text{ K}} = 0.24 \text{ m} \cdot \text{atm} = 0.79 \text{ ft} \cdot \text{atm}$$

Con base en la figura 13-36 las emisividades del CO_2 y el H_2O correspondientes a estos valores, a una temperatura de $T_s = 600$ K y 1 atm, son

$$\varepsilon_{c, 1 \text{ atm}} = 0.11 \quad \text{y} \quad \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} = 0.25$$

En el ejemplo anterior se determinó que los factores de corrección son $C_c = 1.1$ y $C_w = 1.4$ y no cambian con la temperatura de las superficies. Entonces las absorptividades del CO_2 y el H_2O quedan

$$\alpha_c = C_c \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{0.65} \varepsilon_{c, 1 \text{ atm}} = (1.1) \left(\frac{1200 \text{ K}}{600 \text{ K}} \right)^{0.65} (0.11) = 0.19$$

$$\alpha_w = C_w \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{0.45} \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} = (1.4) \left(\frac{1200 \text{ K}}{600 \text{ K}} \right)^{0.45} (0.25) = 0.48$$

Asimismo, $\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$, pero el factor de corrección de la emisividad debe evaluarse basándose en la figura 13-38 a $T = T_s = 600$ K, en lugar de $T_g = 1200$ K. En la figura no se tiene diagrama para 600 K, pero se pueden leer valores de $\Delta\varepsilon$ a 400 K y 800 K, y se toma su promedio. A $P_w/(P_w + P_c) = 0.615$ y $P_c L + P_w L = 2.55$ se lee $\Delta\varepsilon = 0.027$. Entonces la absorptividad de los gases de combustión queda

$$\alpha_g = \alpha_c + \alpha_w - \Delta\alpha = 0.19 + 0.48 - 0.027 = \mathbf{0.64}$$

El área superficial de la superficie cilíndrica es

$$A_s = \pi DH + 2 \frac{\pi D^2}{4} = \pi(5 \text{ m})(5 \text{ m}) + 2 \frac{\pi(5 \text{ m})^2}{4} = 118 \text{ m}^2$$

Entonces la razón neta de la transferencia de calor por radiación de los gases de combustión hacia las paredes del horno queda

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{neto}} &= A_s \sigma (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \\ &= (118 \text{ m}^2)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[0.45(1200 \text{ K})^4 - 0.64(600 \text{ K})^4] \\ &= \mathbf{5.69 \times 10^4 \text{ W}} \end{aligned}$$

Discusión La razón de la transferencia de calor que acaba de determinarse es para el caso de que las superficies de las paredes sean negras. Si las superficies no fueran negras pero su emisividad ε_s fuera mayor que 0.7, se puede determinar la razón de la transferencia de calor multiplicando la rapidez ya determinada por $(\varepsilon_s + 1)/2$.

TEMA DE INTERÉS ESPECIAL*

Transferencia de calor desde el cuerpo humano

El calor metabólico generado en el cuerpo se disipa hacia el medio a través de la piel y los pulmones, por convección y radiación, como *calor sensible* y por evaporación como *calor latente* (figura 13-41). El calor latente representa el calor de vaporización del agua a medida que se evapora en los pulmones y sobre la piel, absorbiendo calor del cuerpo, y se libera también calor latente cuando la humedad se condensa sobre las superficies frías. El calentamiento del aire inhalado representa transferencia de calor sensible en los pulmones y es proporcional al aumento de su temperatura. La razón total de la pérdida de calor del cuerpo se puede expresar como

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{cuerpo, total}} &= \dot{Q}_{\text{piel}} + \dot{Q}_{\text{pulmones}} \\ &= (\dot{Q}_{\text{sensible}} + \dot{Q}_{\text{latente}})_{\text{piel}} + (\dot{Q}_{\text{sensible}} + \dot{Q}_{\text{latente}})_{\text{pulmones}} \\ &= (\dot{Q}_{\text{convección}} + \dot{Q}_{\text{radiación}} + \dot{Q}_{\text{latente}})_{\text{piel}} + (\dot{Q}_{\text{convección}} + \dot{Q}_{\text{latente}})_{\text{pulmones}}\end{aligned}\quad (13-60)$$

Por lo tanto, la determinación de la transferencia de calor desde el cuerpo sólo por análisis es difícil. La ropa complica todavía más la transferencia de calor desde el cuerpo y por tanto debemos apoyarnos en datos experimentales. En condiciones estacionarias la velocidad total de la transferencia de calor desde el cuerpo es igual a la razón de la generación de calor metabólico en el propio cuerpo, la cual varía desde cerca de 100 W, para el trabajo ligero de oficina, hasta muy aproximadamente 1 000 W durante el trabajo físico pesado.

La *pérdida de calor sensible* desde la piel depende de las temperaturas de esta última, del medio y de las superficies circundantes, así como del movimiento del aire. Por otra parte, la *pérdida de calor latente* depende de cuán húmeda esté la piel y también de la humedad relativa del medio. La *ropa* sirve como aislamiento y reduce la pérdida de calor tanto de la forma sensible como latente. Es obvio que la transferencia de calor desde los pulmones a través de la respiración depende de la frecuencia con la que se respira y del volumen pulmonar, así como de los factores del medio que afectan la transferencia de calor desde la piel.

El calor sensible desde la piel cubierta de ropa se transfiere primero hacia esta última y de la ropa hacia el medio. Las pérdidas de calor por convección y radiación desde la superficie exterior de un cuerpo con ropa se puede expresar como

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A_{\text{ropa}} (T_{\text{ropa}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (\text{W}) \quad (13-61)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} A_{\text{ropa}} (T_{\text{ropa}} - T_{\text{alred}}) \quad (13-62)$$

en donde

h_{conv} = coeficiente de transferencia de calor por convección, según se da en la tabla 13-5

h_{rad} = coeficiente de transferencia de calor por radiación, $4.7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para condiciones típicas en el interior; se supone que la emisividad es 0.95, lo cual es típico

A_{ropa} = área de la superficie exterior de una persona vestida

T_{ropa} = temperatura promedio de piel expuesta y de la ropa

T_{ambiente} = temperatura del aire ambiente

T_{alred} = temperatura promedio de las superficies circundantes

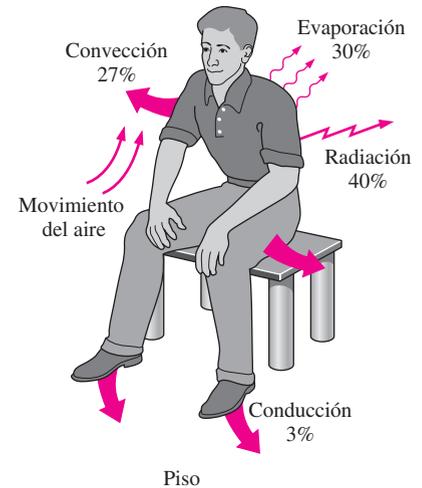


FIGURA 13-41

Mecanismos de pérdida de calor desde el cuerpo humano y magnitudes relativas para una persona en reposo.

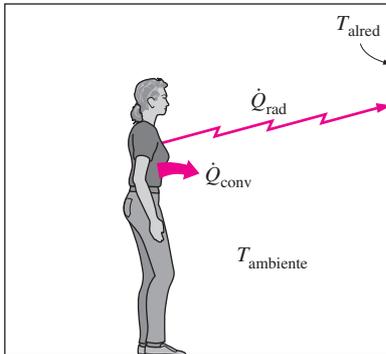
* Esta sección se puede pasar por alto sin pérdida de continuidad.

TABLA 13-5

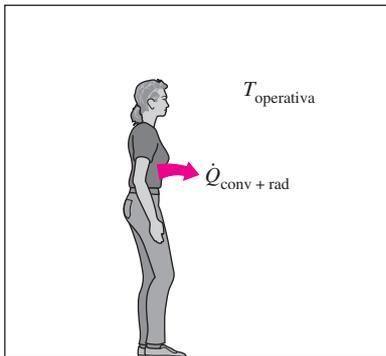
Coeficientes de transferencia de calor por convección para un cuerpo con ropa, a 1 atm (V en m/s) (compilado de varias fuentes)

Actividad	h_{conv}^* W/m ² · °C
Sentado en aire en movimiento a	
$0 < V < 0.2$ m/s	3.1
$0.2 < V < 4$ m/s	$8.3V^{0.6}$
Caminando en aire tranquilo a	
$0.5 < V < 2$ m/s	$8.6V^{0.53}$
Caminando sobre una caminadora en aire tranquilo a	
$0.5 < V < 2$ m/s	$6.5V^{0.39}$
De pie en aire en movimiento a	
$0 < V < 0.15$ m/s	4.0
$0.15 < V < 1.5$ m/s	$14.8V^{0.69}$

*A presiones diferentes de 1 atm, multiplíquese por $P^{0.55}$, en donde P se da en atm.



a) Convección y radiación separadas



b) Convección y radiación combinadas

FIGURA 13-42

Las pérdidas de calor por convección y por radiación del cuerpo se pueden combinar en un solo término, definiendo una temperatura operativa equivalente.

En la tabla 13-5 se dan los coeficientes de transferencia de calor por convección a la presión de 1 atm. Los coeficientes de convección a presiones P diferentes de 1 atm se obtienen al multiplicar los valores a la presión atmosférica por $P^{0.55}$, en donde P se da en atmósferas. Asimismo, se reconoce que las temperaturas de las diferentes superficies que rodean a una persona es probable que sean diferentes, y T_{alred} representa la **temperatura media para la radiación**, la cual es la temperatura de un recinto isotérmico imaginario en el cual el intercambio de calor por radiación con el cuerpo humano es igual al intercambio de calor por radiación con el recinto real. Dado que la mayor parte de la ropa y de los materiales de construcción son en esencia negros, se puede determinar la *temperatura media para la radiación* de un recinto que consta de N superficies a temperaturas diferentes a partir de

$$T_{\text{alred}} \cong F_{\text{persona-1}} T_1 + F_{\text{persona-2}} T_2 + \cdots + F_{\text{persona-N}} T_N \quad (13-63)$$

en donde T_i es la *temperatura de la superficie i* y $F_{\text{persona-}i}$ es el *factor de visión* entre la persona y la superficie i .

La *pérdida total de calor sensible* también se puede expresar de manera conveniente combinando las pérdidas de calor por convección y por radiación, como

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{conv+rad}} &= h_{\text{combinado}} A_{\text{ropa}} (T_{\text{ropa}} - T_{\text{operativa}}) & (W) & \quad (13-64) \\ &= (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}) A_{\text{ropa}} (T_{\text{ropa}} - T_{\text{operativa}}) & & \quad (13-65) \end{aligned}$$

en donde la **temperatura operativa** $T_{\text{operativa}}$ es el promedio de las temperaturas medias para la radiación y ambiente ponderadas por sus respectivos coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación, y se expresa como (figura 13-42)

$$T_{\text{operativa}} = \frac{h_{\text{conv}} T_{\text{ambiente}} + h_{\text{rad}} T_{\text{alred}}}{h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}} \cong \frac{T_{\text{ambiente}} + T_{\text{alred}}}{2} \quad (13-66)$$

Note que la temperatura operativa será el promedio aritmético de las temperaturas ambiente y de las superficies circundantes cuando los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación sean iguales entre sí. Otro índice ambiental usado en el análisis de la comodidad térmica es la **temperatura efectiva**, en la cual se combinan los efectos de la temperatura y de la humedad. Dos medios ambientes con la misma temperatura efectiva producen la misma respuesta térmica en las personas, aun cuando se encuentren a temperaturas y humedades diferentes.

La transferencia de calor a través de la *ropa* se puede expresar como

$$\dot{Q}_{\text{conv+rad}} = \frac{A_{\text{ropa}} (T_{\text{piel}} - T_{\text{ropa}})}{R_{\text{ropa}}} \quad (13-67)$$

en donde R_{ropa} es la **resistencia térmica unitaria de la ropa** en m² · °C/W, la cual comprende los efectos combinados de la conducción, la convección y la radiación entre la piel y la superficie exterior de la ropa. La resistencia térmica de la ropa suele expresarse en la unidad **clo**, en donde 1 clo = 0.155 m² · °C/W = 0.880 ft² · °F · h/Btu. La resistencia térmica de los pantalones, las camisas de manga larga, los suéteres de manga larga y las camisetitas de manga corta es de 1.0 clo, o sea 0.155 m² · °C/W. La ropa de verano, como los pantalones ligeros y las camisas de manga corta, tiene un valor de aislamiento de 0.5 clo, en tanto que la de invierno, como los pantalones gruesos, las camisas de manga larga y un suéter o chaqueta, tiene un valor de aislamiento de 0.9 clo.

Entonces la pérdida total de calor sensible se puede expresar en términos de la temperatura de la piel, en lugar de la inconveniente temperatura de la ropa, como (figura 13-43)

$$\dot{Q}_{\text{conv} + \text{rad}} = \frac{A_{\text{ropa}} (T_{\text{piel}} - T_{\text{operativa}})}{R_{\text{ropa}} + \frac{1}{h_{\text{combinada}}}} \quad (13-68)$$

En un estado de comodidad térmica se observa que la temperatura promedio de la piel del cuerpo es de 33°C (91.5°F). No se experimenta incomodidad cuando la temperatura de la piel fluctúa ±1.5°C (2.5°F). Éste es el caso ya sea que el cuerpo esté con ropa o desnudo.

La **pérdida de calor latente** o **evaporativo** desde la piel es proporcional a la diferencia entre la presión del vapor de agua en la piel y la del aire ambiente, así como de la humectación de la piel, lo cual es una medida de la cantidad de humedad sobre ésta. Se debe a los efectos combinados de la *evaporación del sudor* y de la *difusión* del agua a través de la piel, y se puede expresar como

$$\dot{Q}_{\text{latente}} = \dot{m}_{\text{vapor}} h_{fg} \quad (13-69)$$

en donde

\dot{m}_{vapor} = razón de la evaporación desde el cuerpo, kg/s

h_{fg} = entalpía de vaporización del agua = 2430 kJ/kg a 30°C

La pérdida de calor por evaporación es máxima cuando la piel está completamente mojada. Asimismo, la ropa ofrece resistencia a la evaporación y la velocidad de la evaporación en los cuerpos con ropa depende de la permeabilidad de esta última. La razón máxima de la evaporación en un hombre promedio es de alrededor de 1 L/h (0.3 g/s), lo cual representa un límite superior de 730 W para la razón del enfriamiento evaporativo. Una persona puede perder tanto como 2 kg de agua por hora durante una sesión de ejercicios en un día caluroso, pero cualquier exceso de sudor resbala por la superficie de la piel sin evaporarse (figura 13-44).

Durante la *respiración* el aire inhalado entra en las condiciones ambiente y el aire exhalado sale casi saturado a una temperatura cercana a la de las profundidades del cuerpo (figura 13-45). Por lo tanto, el cuerpo pierde calor sensible por convección y latente por evaporación desde los pulmones, esto se puede expresar como

$$\dot{Q}_{\text{conv, pulmones}} = \dot{m}_{\text{aire, pulmones}} C_{p, \text{aire}} (T_{\text{exhalado}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (13-70)$$

$$\dot{Q}_{\text{latente, pulmones}} = \dot{m}_{\text{vapor, pulmones}} h_{fg} = \dot{m}_{\text{aire, pulmones}} (w_{\text{exhalado}} - w_{\text{ambiente}}) h_{fg} \quad (13-71)$$

en donde

$\dot{m}_{\text{aire, pulmones}}$ = razón de la admisión de aire hacia los pulmones, kg/s

$C_{p, \text{aire}}$ = calor específico del aire, 1.0 kJ/kg · °C

T_{exhalado} = temperatura del aire exhalado

w = relación de humedad (masa de humedad por unidad de masa de aire seco)

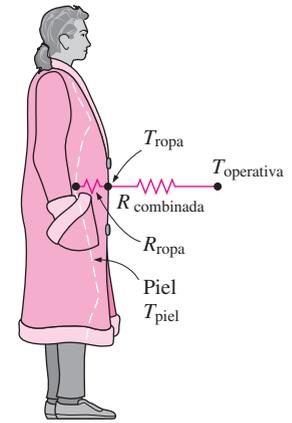
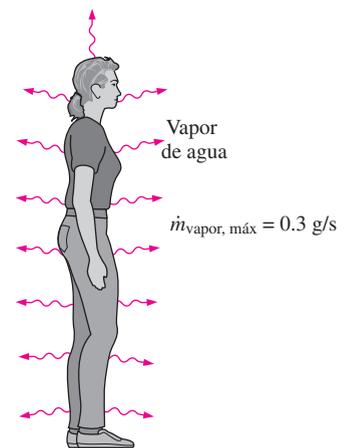


FIGURA 13-43

Red simplificada de resistencias térmicas para la transferencia de calor desde una persona vestida.



$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{latente, máx}} &= \dot{m}_{\text{latente, máx}} h_{fg} \text{ a } 30^\circ\text{C} \\ &= (0.3 \text{ g/s})(2430 \text{ kJ/kg}) \\ &= 730 \text{ W} \end{aligned}$$

FIGURA 13-44

Una persona promedio puede perder calor por evaporación a razón de hasta 730 W.

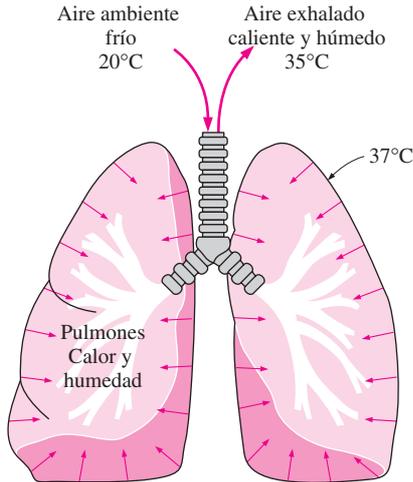


FIGURA 13-45

Parte del calor metabólico generado en el cuerpo se rechaza hacia el aire desde los pulmones, durante la respiración.

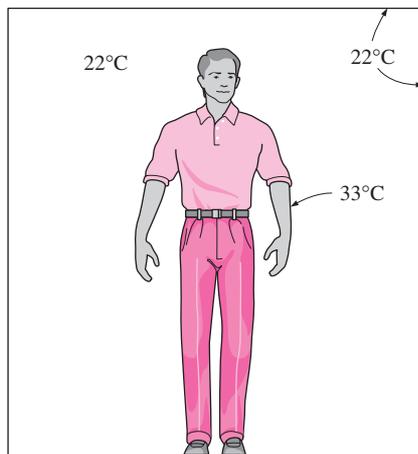


FIGURA 13-46

Esquema para el ejemplo 13-15.

La razón de la admisión de aire a los pulmones es directamente proporcional al índice metabólico \dot{Q}_{met} . La razón de la pérdida total de calor desde los pulmones a través de la respiración se puede expresar de manera aproximada como

$$\dot{Q}_{\text{conv} + \text{latente, pulmones}} = 0.0014\dot{Q}_{\text{met}}(34 - T_{\text{ambiente}}) + 0.0173\dot{Q}_{\text{met}}(5.87 - P_{v, \text{ambiente}}) \quad (13-72)$$

en donde $P_{v, \text{ambiente}}$ es la presión de vapor del aire ambiente en kPa.

La fracción de calor sensible varía desde cerca de 40%, en el caso de trabajo pesado, hasta alrededor de 70%, durante el trabajo ligero. El resto de la energía se rechaza del cuerpo por transpiración en la forma de calor latente.

EJEMPLO 13-15 Efecto de la ropa sobre la comodidad térmica

Está bien establecido que una persona con ropa o desnuda se siente cómoda cuando la temperatura de la piel es de alrededor de 33°C. Considere un hombre promedio que está usando ropa de verano cuya resistencia térmica es de 0.6 clo. El hombre se siente muy cómodo mientras se encuentra de pie en un cuarto mantenido a 22°C donde el movimiento del aire es despreciable y la temperatura de la superficie interior es más o menos la misma que la del aire. Si este hombre estuviera de pie desnudo en dicho cuarto, determine la temperatura a la cual debe mantenerse la habitación para que el hombre se sienta térmicamente cómodo.

SOLUCIÓN Un hombre que está usando ropa de verano se siente cómodo en un cuarto a 22°C. Debe determinarse la temperatura a la que este hombre se sentirá térmicamente cómodo cuando esté desnudo.

Suposiciones 1 Existen condiciones estacionarias. 2 La pérdida de calor latente desde la persona sigue siendo la misma. 3 Los coeficientes de transferencia de calor siguen siendo los mismos.

Análisis El cuerpo pierde calor en las formas sensible y latente, y la primera consta de transferencia de calor por convección y radiación. A velocidades bajas del aire, de acuerdo con la tabla 13-5, el coeficiente de transferencia de calor por convección para un hombre de pie es de 4.0 W/m² · °C. El coeficiente de transferencia de calor por radiación en las condiciones típicas en interiores es de 4.7 W/m² · °C. Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor en la superficie para una persona de pie, para la convección y radiación combinadas, es

$$h_{\text{combinado}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}} = 4.0 + 4.7 = 8.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Se dice que la resistencia térmica de la ropa es

$$R_{\text{ropa}} = 0.6 \text{ clo} = 0.6 \times 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} = 0.093 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

Dado que el área superficial de un hombre promedio es de 1.8 m², se determina que la pérdida de calor sensible desde esta persona cuando está con ropa es (figura 13-46)

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{sensible, con ropa}} &= \frac{A_s(T_{\text{piel}} - T_{\text{ambiente}})}{R_{\text{ropa}} + \frac{1}{h_{\text{combinado}}}} = \frac{(1.8 \text{ m}^2)(33 - 22)\text{°C}}{0.093 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} + \frac{1}{8.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}} \\ &= 95.2 \text{ W} \end{aligned}$$

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, quitarse la ropa equivale a eliminar el aislamiento de ésta o hacer $R_{\text{ropa}} = 0$. En este caso la transferencia de calor se puede expresar como

$$\dot{Q}_{\text{sensible, desnudo}} = \frac{A_s(T_{\text{piel}} - T_{\text{ambiente}})}{h_{\text{combinado}}} = \frac{(1.8 \text{ m}^2)(33 - T_{\text{ambiente}})^{\circ}\text{C}}{8.7 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Para mantener la comodidad térmica después de quitarse la ropa, la temperatura de la piel de la persona y la razón de la transferencia de calor desde ella deben seguir siendo las mismas. Entonces, igualando a 95.2 W la ecuación que acabamos de dar, se obtiene

$$T_{\text{ambiente}} = 26.9^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto, se necesita elevar la temperatura del aire de 22 hasta 26.9°C para garantizar que la persona se sentirá cómoda en el cuarto después de quitarse la ropa (figura 13-47).

Discusión Note que en la solución antes dada se supone que el efecto de la ropa sobre el calor latente es despreciable. También, por sencillez, supusimos que el área superficial de la persona vestida y desnuda era la misma y estos dos efectos deben de contraponerse entre sí.

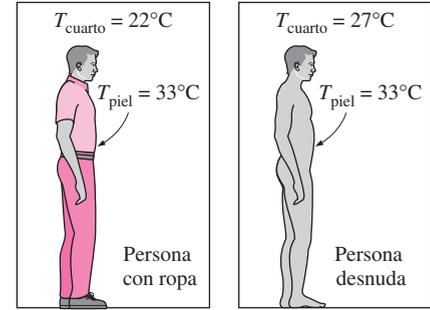


FIGURA 13-47

La ropa sirve como aislamiento y es necesario elevar la temperatura del cuarto cuando una persona está desnuda para mantener el mismo nivel de comodidad.

RESUMEN

La transferencia de calor por radiación entre superficies depende de la orientación de éstas, una con respecto a las otras. En un análisis de la radiación, este efecto se toma en cuenta por medio del parámetro geométrico conocido como *factor de visión*. El *factor de visión* de una superficie i hacia una superficie j es denotado como $F_{i \rightarrow j}$ o como F_{ij} y se define como la fracción de la radiación que saliendo de la superficie i choca contra la superficie j en forma directa. Los factores de visión entre superficies diferenciales y finitas se expresan como

$$dF_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \frac{\dot{Q}_{dA_1 \rightarrow dA_2}}{\dot{Q}_{dA_1}} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$F_{12} = F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{\dot{Q}_{A_1 \rightarrow A_2}}{\dot{Q}_{A_1}} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

en donde r es la distancia entre dA_1 y dA_2 , y θ_1 y θ_2 son los ángulos entre las perpendiculares a las superficies y la recta que une dA_1 con dA_2 .

El factor de visión $F_{i \rightarrow i}$ representa la fracción de la radiación que sale de la superficie i y que choca directamente contra ella misma; $F_{i \rightarrow i} = 0$ para las superficies *planas* o *convexas* y $F_{i \rightarrow i} \neq 0$ para las superficies *cóncavas*. Para los factores de visión, la *regla de reciprocidad* se expresa como

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$$

La suma de los factores de visión de la superficie i de un recinto cerrado hacia todas las superficies de este último, incluyen-

do ella misma, debe ser igual a la unidad. Esto se conoce como la *regla de la suma* para un recinto cerrado. La *regla de superposición* se expresa diciendo que el factor de visión desde una superficie i hacia una superficie j es igual a la suma de los factores de visión de la superficie i hacia las partes de la de j . La regla de simetría se expresa diciendo que si las superficies j y k son simétricas con respecto a la superficie i entonces $F_{i \rightarrow j} = F_{i \rightarrow k}$.

La razón de la transferencia de calor neta por radiación entre dos superficies *negras* se determina a partir de

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W})$$

La transferencia de calor *neto* por radiación desde cualquier superficie i de un recinto cerrado *negro* se determina sumando las transferencias de calor netas por radiación desde esa superficie i hacia cada una de las superficies del recinto:

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \sum_{j=1}^N A_j F_{i \rightarrow j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (\text{W})$$

La energía total de radiación que sale de una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área se llama *radiosidad* y se denota por J . La razón *neto* de la transferencia de calor por radiación desde una superficie i de área superficial A_i se expresa como

$$\dot{Q}_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i}$$

en donde

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}$$

es la *resistencia de la superficie* a la radiación. La razón neta de la transferencia de calor por radiación de la superficie i hacia la j se puede expresar como

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}}$$

en donde

$$R_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i F_{i \rightarrow j}}$$

es la *resistencia del espacio* a la radiación. El *método de redes* se aplica a los problemas relativos a la radiación en recintos cerrados, trazando una resistencia superficial asociada con cada superficie de un recinto y uniéndolas con resistencias del espacio. A continuación el problema se resuelve tratándolo como un problema de resistencias eléctricas, en donde la transferencia de calor por radiación reemplaza a la corriente y la radiosidad al potencial. El *método directo* se basa en las dos ecuaciones siguientes:

Superficies con razón neta específica de transferencia de calor Q_i

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j)$$

Superficies con temperatura T_i específica

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j)$$

El primero y el segundo grupos de ecuaciones dan N ecuaciones algebraicas lineales para la determinación de las N radiosidades desconocidas, para un recinto de N superficies. Una vez que se dispone de las radiosidades J_1, J_2, \dots, J_N , es posible determinar las temperaturas superficiales y las razones de transferencia de calor, a partir de las ecuaciones que se acaban de mostrar.

La razón neta de la transferencia por radiación entre dos superficies grises, difusas y opacas cualesquiera que forman un recinto cerrado se expresa por

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}}$$

La transferencia de calor por radiación entre dos superficies se puede reducir mucho si, entre éstas, se introducen láminas delgadas de alta reflectividad (baja emisividad) de material, llamadas *blindajes contra la radiación*. La transferencia de calor por radiación entre dos placas paralelas grandes separadas por N blindajes contra la radiación es

$$\dot{Q}_{12, N \text{ blindajes}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \dots + \left(\frac{1}{\varepsilon_{N,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{N,2}} - 1\right)}$$

Se puede tomar en cuenta de manera apropiada el efecto de la radiación en las mediciones de temperatura por medio de la relación

$$T_f = T_{\text{term}} + \frac{\varepsilon_{\text{term}} \sigma (T_{\text{term}}^4 - T_w^4)}{h} \quad (\text{K})$$

donde T_f es la temperatura real del fluido, T_{term} es el valor de la temperatura medido por el termómetro y T_w es la temperatura de las paredes circundantes, todas en K.

Los gases con moléculas asimétricas, como el H_2O , CO_2 , CO , SO_2 y los hidrocarburos H_nC_m , participan en el proceso de radiación, por absorción o emisión. La *transmisividad*, la *absortividad* y la *emisividad espectrales* de un medio se expresan como

$$\tau_\lambda = e^{-\kappa_\lambda L}, \quad \alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda = 1 - e^{-\kappa_\lambda L}, \quad \text{y}$$

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - e^{-\kappa_\lambda L}$$

en donde κ_λ es el *coeficiente de absorción espectral* del medio.

En la figura 13-36 se dan las emisividades del H_2O y el CO_2 , para una presión total de $P = 1$ atm. Las emisividades a otras presiones se determinan a partir de

$$\varepsilon_w = C_w \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} \quad \text{y} \quad \varepsilon_c = C_c \varepsilon_{c, 1 \text{ atm}}$$

en donde C_w y C_c son los *factores de corrección de la presión*. Para mezclas de gases que contienen tanto H_2O como CO_2 , la emisividad se determina a partir de

$$\varepsilon_g = \varepsilon_c + \varepsilon_w - \Delta\varepsilon = C_c \varepsilon_{c, 1 \text{ atm}} + C_w \varepsilon_{w, 1 \text{ atm}} - \Delta\varepsilon$$

en donde $\Delta\varepsilon$ es el *factor de corrección de la emisividad*, con el que se toma en cuenta el traslape de las bandas de emisión. De manera semejante, las absortividades de los gases para la radiación emitida por una fuente a la temperatura T_s se determinan a partir de

$$\alpha_g = \alpha_c + \alpha_w - \Delta\alpha$$

en donde $\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$ a la temperatura T_s de la fuente y

$$\text{CO}_2: \quad \alpha_c = C_c \times (T_g/T_s)^{0.65} \times \varepsilon_c(T_s, P_c LT_s/T_g)$$

$$\text{H}_2\text{O}: \quad \alpha_w = C_w \times (T_g/T_s)^{0.45} \times \varepsilon_w(T_s, P_w LT_s/T_g)$$

La razón de la transferencia de calor por radiación entre un gas y una superficie circundante es

$$\text{Recinto negro cerrado:} \quad \dot{Q}_{\text{neta}} = A_s \sigma (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4)$$

$$\text{Recinto gris cerrado, con } \varepsilon_s > 0.7: \quad \dot{Q}_{\text{neta, gris}} = \frac{\varepsilon_s + 1}{2} A_s \sigma (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4)$$