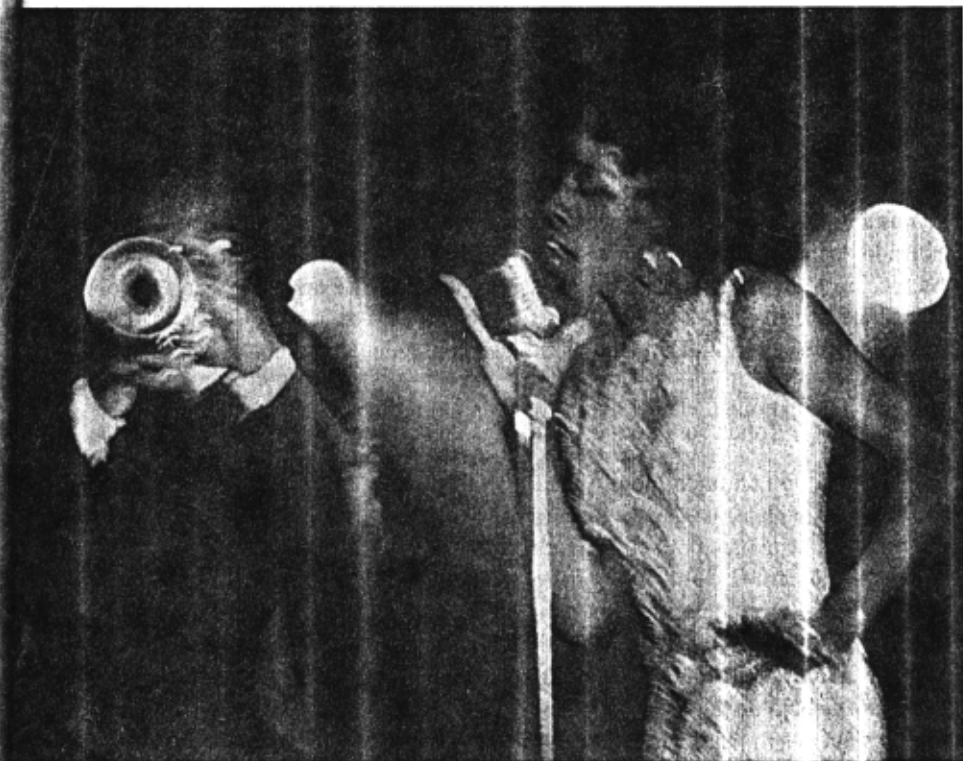


SONIDO Y EL OÍDO

16



La voz humana y la trompeta son dos ejemplos de instrumentos de aliento. En ambos casos, se establece una onda estacionaria en el aire dentro de un tubo largo (el conducto vocal de la cantante o el tubo metálico de la trompeta) como respuesta a una vibración en un extremo (las cuerdas vocales de la cantante o los labios del trompetista). El carácter del sonido queda determinado por las propiedades de la onda estacionaria.

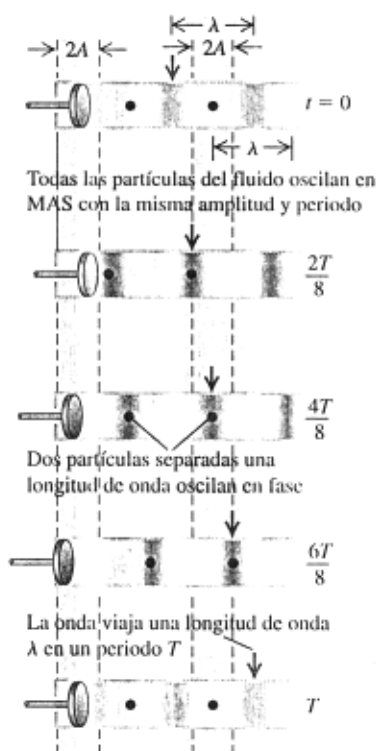


¿Qué diferencia física hay entre sonido musical y ruido?

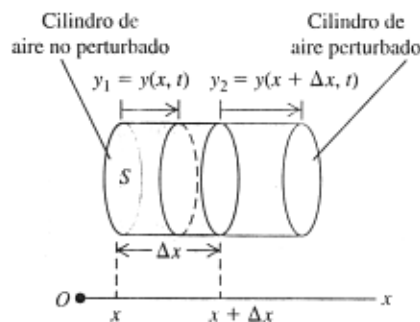
De todas las ondas mecánicas que se dan en la naturaleza, las más importantes en nuestra vida diaria son las ondas longitudinales en un medio, usualmente aire, llamadas ondas *sonoras*. La razón es que el oído humano es muy sensible y puede detectar ondas sonoras de muy baja intensidad. Además de su uso en la comunicación verbal, nuestros oídos nos permiten captar una multitud de indicios acerca de nuestro entorno, desde el grato sonido de la preparación de alimentos hasta el sonido de advertencia de un vehículo que se acerca. La capacidad para escuchar a un depredador nocturno fue fundamental para la supervivencia de nuestros antepasados, así que no es exagerado decir que debemos la existencia a nuestro sentido del oído altamente evolucionado.

Hasta ahora, hemos descrito las ondas mecánicas primordialmente en términos de desplazamiento, pero por lo general es más apropiado describir las ondas sonoras en términos de fluctuaciones de *presión*, sobre todo porque el oído es sensible principalmente a cambios de presión. Examinaremos las relaciones entre desplazamiento, fluctuación de presión e intensidad, y los vínculos entre estas cantidades y la percepción humana del sonido.

Cuando una fuente de sonido o un receptor se mueve en el aire, el receptor podría oír una frecuencia distinta de la emitida por la fuente. Éste es el efecto Doppler, que tiene importantes aplicaciones en medicina y en la tecnología.



16.1 Onda senoidal longitudinal que viaja hacia la derecha en un fluido. Los puntos azul y rojo representan dos partículas del fluido separadas media longitud de onda; la flecha color magenta sigue el movimiento de una compresión de onda. (Compare con la figura 15.5).



16.2 Volumen cilíndrico de gas con área transversal S y longitud no perturbada Δx . Al propagarse una onda sonora a lo largo del eje x , los extremos izquierdo y derecho sufren desplazamientos distintos y_1 y y_2 . El cambio de volumen resultante es $S(y_2 - y_1)$.

16.1 | Ondas sonoras

La definición más general del **sonido** es que es una onda longitudinal en un medio. Lo que más nos interesa en este capítulo son las ondas sonoras en aire, pero el sonido puede viajar por cualquier gas, líquido o sólido. Quizá el lector conozca bastante la propagación del sonido a través de un sólido, si las bocinas del aparato de sonido del vecino están junto a una pared de su casa.

Las ondas sonoras más sencillas son las senoidales, con la frecuencia, la amplitud y la longitud de onda definidas. El oído humano es sensible a las ondas en el intervalo de frecuencias de 20 a 20,000 Hz, llamada **gama audible**, pero también usamos el término *sonido* para ondas similares con frecuencias mayores (**ultrasónicas**) y menores (**infrasónicas**).

Las ondas sonoras suelen dispersarse en todas direcciones a partir de la fuente de sonido, con una amplitud que depende de la dirección y la distancia de la fuente. Volvemos a este punto en la siguiente sección. Por ahora, nos centraremos en el caso idealizado de una onda sonora que se propaga sólo en la dirección $+x$. Como vimos en la sección 15.3, dicha onda se describe con una función de onda $y(x, t)$, que da el desplazamiento instantáneo y de una partícula en el medio en la posición x en el instante t . Si la onda es senoidal, podemos expresarla usando la ecuación (15.7):

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (\text{onda sonora que se propaga en la dirección } +x) \quad (16.1)$$

Recuerde que, en una onda longitudinal, los desplazamientos son *paralelos* a la dirección en que viaja, así que las distancias x y y se miden en la misma dirección, no perpendicularmente como en las ondas transversales. La amplitud A es el máximo desplazamiento de una partícula del medio respecto a su posición de equilibrio (Fig. 16.1). También se le llama **amplitud de desplazamiento**.

Las ondas sonoras también pueden describirse en términos de variaciones de *presión* en diversos puntos. En una onda sonora senoidal en aire, la presión fluctúa por arriba y por debajo de la presión atmosférica (p_a) en forma senoidal con la misma frecuencia que los movimientos de las partículas de aire. El oído humano funciona detectando tales variaciones de presión. Una onda sonora que entra en el canal auditivo ejerce una presión fluctuante sobre un lado del tímpano; el aire del otro lado, comunicado con el exterior por la trompa de Eustaquio, está a presión atmosférica. La diferencia de presión entre ambos lados del tímpano lo mueve. Los micrófonos y dispositivos similares por lo regular también detectan diferencias de presión, no desplazamientos, así que resulta muy útil establecer una relación entre estas dos descripciones.

Sea $p(x, t)$ la fluctuación de presión instantánea en una onda sonora en cualquier punto x en el instante t . Es decir, $p(x, t)$ es la cantidad en que la presión *diffiere* de la presión atmosférica normal p_a . Pensemos en $p(x, t)$ como la *presión manométrica* definida en la sección 14.2; puede ser positiva o negativa. La presión *absoluta* en un punto es entonces $p_a + p(x, t)$.

Para ver el vínculo entre la fluctuación de presión $p(x, t)$ y el desplazamiento $y(x, t)$ en una onda sonora que se propaga en la dirección $+x$, considere un cilindro imaginario de aire con área transversal S y su eje a lo largo de la dirección de propagación (Fig. 16.2). Si no está presente una onda sonora, el cilindro tiene longitud Δx y volumen $V = S \Delta x$, volumen sombreado en la figura 16.2. Si está presente una onda en el instante t , el extremo del cilindro que estaba en x se desplaza en $y_1 = y(x, t)$, y el que estaba en $x + \Delta x$ se desplaza en $y_2 = y(x + \Delta x, t)$; esto se indica con líneas azules. Si $y_2 > y_1$, como en la figura 16.2, el volumen del cilindro aumentó, causan-

do una disminución de la presión. Si $y_2 < y_1$, el volumen disminuyó, y la presión aumentó. Si $y_2 = y_1$, el cilindro simplemente se desplazó a la derecha o a la izquierda; no hay cambio de volumen ni fluctuación de presión. La fluctuación de presión depende de la *diferencia* entre el desplazamiento de puntos vecinos del medio.

Cuantitativamente, el cambio de volumen ΔV del cilindro es

$$\Delta V = S(y_2 - y_1) = S[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]$$

En el límite en que $\Delta x \rightarrow 0$, el cambio fraccionario de volumen $\Delta V/V$ es

$$\frac{dV}{V} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{S[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]}{S\Delta x} = \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \quad (16.2)$$

Este cambio se relaciona con la fluctuación de presión mediante el módulo de volumen B que, por definición [ecuación (11.13)], es $B = -p(x, t) / (dV/V)$ (véase la sección 11.4). Despejando $p(x, t)$, tenemos

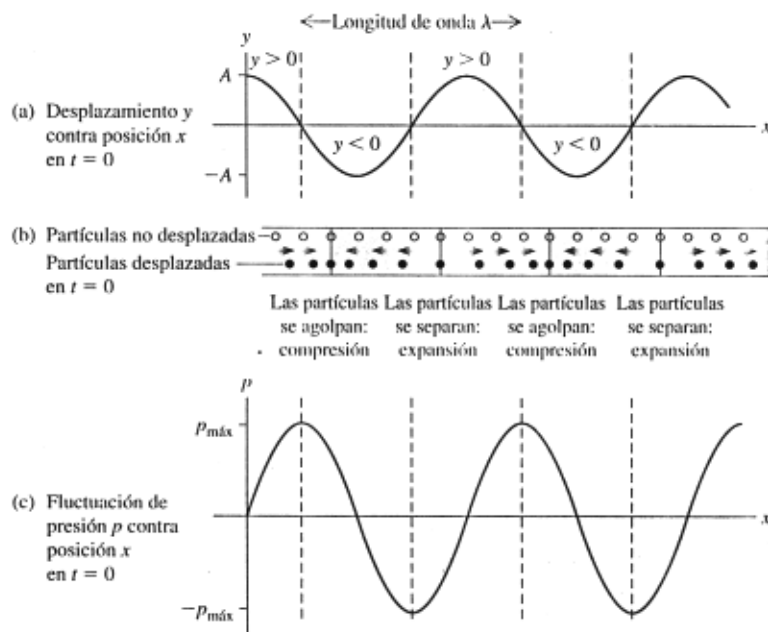
$$p(x, t) = -B \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \quad (16.3)$$

El signo negativo se debe a que, cuando $\partial y(x, t)/\partial x$ es positivo, el desplazamiento es mayor en $x + \Delta x$ que en x , lo que implica un aumento de volumen y una *disminución* de la presión.

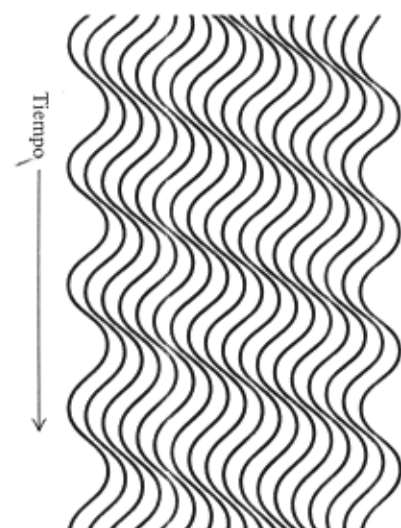
Al evaluar $\partial y(x, t)/\partial x$ para la onda senoidal de la ecuación (16.1), vemos que

$$p(x, t) = BkA \sin(kx - \omega t) \quad (16.4)$$

La figura 16.3 muestra $y(x, t)$ y $p(x, t)$ para una onda senoidal en $t = 0$. También muestra cómo partículas individuales de la onda se desplazan en ese instante. Si bien $y(x, t)$ y $p(x, t)$ describen la misma onda, estas funciones están desfasadas un cuarto de ciclo; en un instante dado, el desplazamiento es máximo donde la fluctuación de presión es cero, y viceversa. En particular, observe que las compresiones (puntos de máxima presión y densidad) y las expansiones o rarefacciones (puntos de mínima presión y densidad) son puntos de *cero* desplazamiento.



16.3 Tres formas de describir una onda sonora. (a) Gráfica de desplazamiento y contra posición x [ecuación (16.1)] en $t = 0$. (b) Representación del desplazamiento de partículas individuales en el gas en $t = 0$. Las partículas se desplazan a la derecha donde $y > 0$ y a la izquierda donde $y < 0$. Los puntos donde las partículas se agolpan son compresiones (sombreado); los puntos donde las partículas se separan son expansiones (zonas claras). (c) Gráfica de fluctuación de presión p contra posición x [ecuación (16.4)] en $t = 0$. Observe que p tiene valor positivo máximo en una compresión y valor negativo máximo en una expansión.



16.4 Diagrama para ilustrar ondas viajeras longitudinales.

¡CUIDADO! Tenga presente que las gráficas de la figura 16.3 muestran la onda en un solo instante. Dado que la onda se está propagando en la dirección $+x$, al paso del tiempo los patrones de onda de las funciones $y(x, t)$ y $p(x, t)$ se desplazan a la derecha con la rapidez de onda $v = \omega/k$. Por tanto, las posiciones de las compresiones y expansiones también se desplazan a la derecha con la misma rapidez. Las partículas, en cambio, simplemente oscilan en movimiento armónico simple como se muestra en la figura 16.1.

Visualizar la relación entre el movimiento de las partículas y el de la onda no es tan fácil en el caso de las ondas longitudinales como en el de las transversales en una cuerda. La figura 16.4 le ayudará a entender estos movimientos. Para usar la figura, pegue dos tarjetas de índice longitudinalmente dejando un espacio de 1 mm entre ellas, para formar una ranura delgada. Coloque las tarjetas en la parte superior de la figura con la ranura horizontal y muévalas hacia abajo con rapidez constante. Las porciones de las curvas senoidales que pueden verse por la ranura corresponden a una fila de partículas de un medio en el que viaja una onda senoidal longitudinal. Cada partícula está en movimiento armónico simple en torno a su posición de equilibrio, con retrasos o cambios de fase que aumentan continuamente a lo largo de la ranura. Las regiones de compresión y expansión máxima se mueven de izquierda a derecha con rapidez constante. Si se mueven las tarjetas hacia arriba, se simulará una onda que viaja de derecha a izquierda.

La ecuación (16.4) muestra que la cantidad BkA representa la máxima fluctuación de presión, que llamamos **amplitud de presión** y denotamos con $p_{\text{máx}}$:

$$p_{\text{máx}} = BkA \quad (\text{onda sonora senoidal}) \quad (16.5)$$

La amplitud de presión es directamente proporcional a la de desplazamiento A , como esperaríamos, y también depende de la longitud de onda. Las ondas con λ más corta (número de onda $k = 2\pi/\lambda$ más grande) tienen mayores variaciones de presión para una amplitud dada porque los máximos y mínimos están más cerca unos de otros. Un medio con un módulo de volumen B grande requiere una amplitud de presión relativamente grande para una amplitud de desplazamiento dada porque un B grande implica un medio menos compresible, es decir, que requiere un mayor cambio de presión para un cambio de volumen dado.

Ejemplo 16.1

Amplitud de una onda sonora en aire

En una onda sonora senoidal de moderada intensidad, las variaciones máximas de presión son del orden de 3.0×10^{-2} Pa por arriba y por debajo de la presión atmosférica p_a (nominalmente 1.013×10^5 Pa al nivel del mar). Calcule el desplazamiento máximo correspondiente si la frecuencia es de 1000 Hz. En aire a presión atmosférica y densidad normales, la rapidez del sonido es de 344 m/s y el módulo de volumen es de 1.42×10^5 Pa.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Nos dan la amplitud de presión $p_{\text{máx}}$, la rapidez de la onda v , la frecuencia f y el módulo de volumen B . La incógnita es el desplazamiento A , que está relacionado con $p_{\text{máx}}$ mediante la ecuación (16.5). También usaremos la relación $\omega = vk$ [ecuación (15.6)] para determinar el número de onda k a partir de v y la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$.

EJECUTAR: Por la ecuación (16.5), el desplazamiento máximo es $A = p_{\text{máx}}/Bk$. Por la ecuación (15.6), el número de onda es

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{(2\pi \text{ rad})(1000 \text{ Hz})}{344 \text{ m/s}} = 18.3 \text{ rad/m}$$

Entonces

$$A = \frac{p_{\text{máx}}}{Bk} = \frac{3.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}}{(1.42 \times 10^5 \text{ Pa})(18.3 \text{ rad/m})} = 1.2 \times 10^{-8} \text{ m}$$

EVALUAR: La amplitud de este desplazamiento es del orden de $\frac{1}{100}$ del tamaño de una célula humana. Recuerde que el oído detecta fluctuaciones de presión; la detección de estos minúsculos desplazamientos es indirecta.

Ejemplo
16.2

Amplitud de una onda sonora en el oído interno

Cuando una onda sonora entra en el oído, pone a oscilar el tímpano, que a su vez hace oscilar a los tres huesecillos del oído medio (Fig. 16.5). Esta oscilación se transmite finalmente al oído interno, que está lleno de fluido. El movimiento del fluido perturba a las células pilosas que transmiten impulsos nerviosos al cerebro para informarle que está presente un sonido. La parte móvil del tímpano tiene un área de unos 43 mm^2 , y el estribo (el huesecillo más pequeño) en su contacto con el oído interno, de unos 3.2 mm^2 . Para el sonido del ejemplo anterior, determine a) la amplitud de presión y b) la amplitud de desplazamiento de la onda en el fluido del oído interno. La rapidez del sonido en este fluido es del orden de 1500 m/s .

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Aunque la onda sonora ahora viaja por un líquido (principalmente agua) y no por un gas, son válidos los mismos principios y relaciones entre las propiedades de la onda.

PLANTEAR: Podemos despreciar la masa de los huesecillos (unos $58 \text{ mg} = 5.8 \times 10^{-5} \text{ kg}$), así que la fuerza ejercida por ellos sobre el fluido del oído interno es la misma que la ejercida sobre el tímpano y los huesecillos por la onda sonora en aire. (Usamos esta misma idea en los capítulos 4 y 5 cuando dijimos que la tensión es la misma en los dos extremos de una cuerda sin masa.) Así, la amplitud de presión $p_{\text{máx}}$ es mayor en el oído interno que en el aire exterior porque se ejerce la misma fuerza sobre un área menor (el área del estribo en vez del área del tímpano).

Teniendo la amplitud de presión en el oído interno, obtendremos la amplitud empleando la ecuación (16.5). Los valores de B y k son diferentes que en aire. Para determinar k , tomamos nota de que la onda en el oído interno tiene la misma frecuencia angular ω que en el aire porque éste, el tímpano, los huesecillos y el fluido oscilan juntos. Empero, como la rapidez de la onda v es mayor en el oído

interno que en el aire (1500 m/s contra 344 m/s), el número de onda $k = \omega/v$ también es mayor.

EJECUTAR: a) Utilizando el área del tímpano y la amplitud de presión obtenida en el ejemplo 16.1, vemos que la fuerza máxima ejercida por la onda sonora en aire sobre el tímpano es $F_{\text{máx}} = p_{\text{máx}} S_{\text{tímpano}}$. Por tanto, la amplitud de presión en el fluido del oído interno es

$$p_{\text{máx}} (\text{oído interno}) = \frac{F_{\text{máx}}}{S_{\text{estribo}}} = \frac{p_{\text{máx}} (\text{aire}) S_{\text{tímpano}}}{S_{\text{estribo}}} \\ = \frac{(3.0 \times 10^{-2} \text{ Pa})(43 \text{ mm}^2)}{3.2 \text{ mm}^2} = 0.40 \text{ Pa}$$

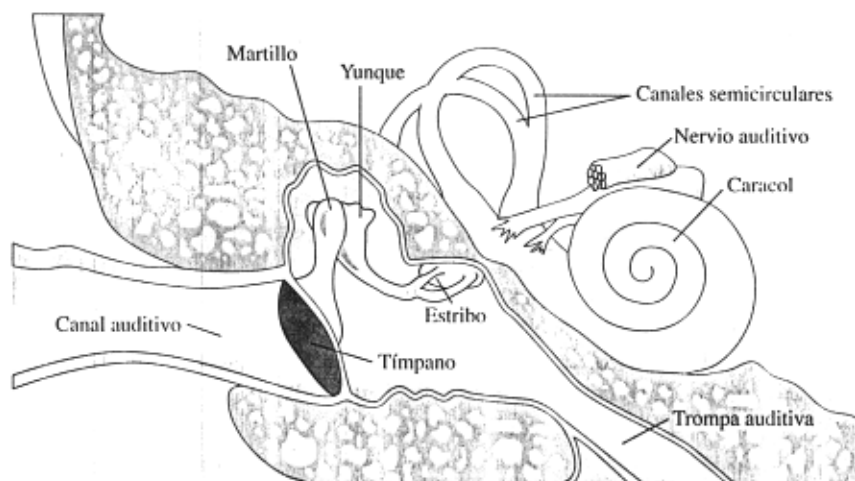
b) Para calcular el desplazamiento máximo, usamos otra vez la relación $A = p_{\text{máx}}/Bk$ como hicimos en el ejemplo 16.1. El fluido del oído interno es principalmente agua, que tiene un módulo de volumen mucho mayor que el aire porque es mucho más difícil de comprimir. Por la tabla 11.2, la compresibilidad del agua (desafortunadamente también llamada k) es de $45.8 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, así que $B_{\text{fluido}} = 1/(45.8 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}) = 2.18 \times 10^9 \text{ Pa}$.

Determinamos el valor del número de onda k utilizando el valor de ω del ejemplo 16.1 y $v = 1500 \text{ m/s}$ para el fluido del oído interno. Entonces,

$$k_{\text{oído interno}} = \frac{\omega}{v_{\text{oído interno}}} = \frac{6283 \text{ rad/s}}{1500 \text{ m/s}} = 4.2 \text{ rad/m}$$

Juntando todo, el desplazamiento máximo del fluido en el oído interno es

$$A_{\text{oído interno}} = \frac{p_{\text{máx}} (\text{oído interno})}{B_{\text{fluido}} k_{\text{oído interno}}} = \frac{0.40 \text{ Pa}}{(2.18 \times 10^9 \text{ Pa})(4.2 \text{ rad/m})} \\ = 4.4 \times 10^{-11} \text{ m}$$



16.5 Anatomía del oído humano. El oído medio tiene el tamaño de una canica pequeña; los huesecillos (martillo, yunque y estribo) son los huesos más pequeños del cuerpo humano.

EVALUAR: El resultado de la parte (a) demuestra que el efecto de los huesecillos es aumentar la amplitud de presión en el oído interno por un factor de $(43 \text{ mm}^2)/(3.2 \text{ mm}^2) = 13$. Este factor de amplificación contribuye a la gran sensibilidad del oído humano.

La amplitud de desplazamiento en el oído interno es aún menor que en el aire, pero lo que realmente importa ahí es la amplitud de presión, ya que las variaciones de presión en el fluido son lo que mueve las células pilosas.

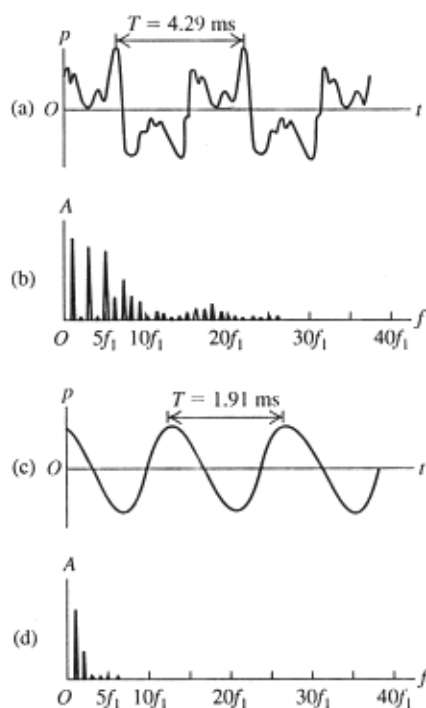
Percepción de ondas sonoras

Las características físicas de una onda sonora tienen una relación directa con la percepción de ese sonido por un receptor. A una frecuencia dada, cuanto mayor sea la amplitud de presión de una onda sonora senoidal, mayor será el **volumen** percibido. La relación entre amplitud de presión y volumen no es sencilla, y varía de una persona a otra. Un factor importante es que el oído no es igualmente sensible a todas las frecuencias de la gama audible. Un sonido de cierta frecuencia puede parecer más fuerte que otro con igual amplitud de presión pero distinta frecuencia. A 1000 Hz, la amplitud de presión mínima perceptible con oído normal es de aproximadamente $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$; para producir el mismo volumen a 200 Hz o 15,000 Hz, se requiere cerca de $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$. El volumen percibido también depende de la salud del oído. Es natural que con la edad se pierda la sensibilidad a altas frecuencias, y esto puede agravarse por niveles de sonido excesivos. Algunos estudios han demostrado que muchos músicos de rock jóvenes han sufrido daños permanentes y tienen un oído típico de personas de 65 años de edad. Los audífonos en estéreo portátiles empleados con un alto volumen representan una amenaza similar para el oído. ¡Tenga cuidado!

La frecuencia de una onda sonora es el factor primordial que determina el **tono** de un sonido, la calidad que nos permite clasificarlo como “agudo” o “grave”. Cuanto más alta sea la frecuencia de un sonido (dentro de la gama audible), más agudo será el tono percibido. La amplitud de presión también ayuda a determinar el tono. Cuando un receptor compara dos ondas sonoras senoidales con la misma frecuencia pero diferente amplitud de presión, aquella con mayor amplitud suele percibirse como más fuerte pero también un poco más grave.

Los sonidos musicales tienen funciones de onda más complicadas que una simple función seno. En la figura 16.6a se muestra la fluctuación de presión en la onda sonora producida por un clarinete. El patrón es tan complejo porque la columna de aire de un instrumento de aliento como el clarinete vibra con la frecuencia fundamental y muchos armónicos al mismo tiempo. (En la sección 15.8, describimos este mismo comportamiento para una cuerda punteada, frotada o golpeada. Examinaremos la física de los instrumentos de aliento en la sección 16.5.) La onda sonora producida en el aire circundante tiene la misma cantidad de cada armónico, es decir, un **contenido armónico** similar. La figura 16.6b muestra el contenido armónico del sonido de un clarinete. El proceso matemático de traducir una gráfica de presión-tiempo como la figura 16.6a en una gráfica de contenido armónico como la figura 16.6b se denomina **análisis de Fourier**.

Dos tonos producidos por diferentes instrumentos podrían tener la misma frecuencia fundamental (y por tanto el mismo tono) pero sonar distinto por la presencia de diferentes cantidades de los diversos armónicos. La diferencia se llama **color de tono**, **calidad** o **timbre** y a menudo se describe con términos subjetivos como delgado, dorado, redondo, suave y débil. Un tono rico en armónicos, como el del clarinete (Figs. 16.6 a y b), suele sonar “delgado”, mientras que uno que contiene principalmente una fundamental, como el tono de una flauta dulce (Figs. 16.6 c y d) es más suave y “aflautado”. El mismo principio puede aplicarse a la voz humana, que es otro ejemplo de instrumento de aliento; las vocales “a” y “e” suenan diferentes por diferencias en su contenido armónico.



16.6 (a) Gráfica de fluctuación de presión contra tiempo de un clarinete con frecuencia fundamental $f_1 = 233 \text{ Hz}$. (b) Contenido armónico del sonido del clarinete. (c) Gráfica de fluctuación de presión contra tiempo de una flauta dulce alto con frecuencia fundamental $f_1 = 523 \text{ Hz}$. (d) Contenido armónico del sonido de una flauta dulce alto.



10.10 Ondas complejas: análisis de Fourier

Otro factor que determina la calidad de un tono es el comportamiento al principio (*ataque*) y al final (*decaimiento*) del tono. Un tono de piano comienza con un golpe y se desvanece gradualmente. Un tono de clavicordio, además de tener diferente contenido armónico, comienza más rápidamente con un chasquido, y los armónicos más altos comienzan antes que los más bajos. Al soltarse la tecla, el sonido se desvanece con mucha mayor rapidez que en un piano. Se presentan efectos similares en otros instrumentos musicales. En los instrumentos de aliento y cuerda, el ejecutante tiene un control considerable sobre el ataque y decaimiento del tono, y estas características ayudan a definir las cualidades únicas de cada instrumento.

A diferencia de los tonos creados por instrumentos musicales o las vocales del habla humana, el **ruido** es una combinación de *todas* las frecuencias, no sólo las que son múltiplos enteros de una fundamental. (Un caso extremo es el “ruido blanco”, que contiene cantidades iguales de todas las frecuencias de la gama audible.) Como ejemplos están el sonido del viento y el siseo que hacemos al pronunciar la consonante “s”.

Evalúe su comprensión

Se produce una onda sonora senoidal en aire con un generador de señales electrónicas. Luego, se aumenta la frecuencia de la onda pero manteniendo constante la amplitud de presión. ¿Qué efecto tiene esto sobre la amplitud de desplazamiento de la onda sonora?

16.2 | Rapidez de las ondas sonoras

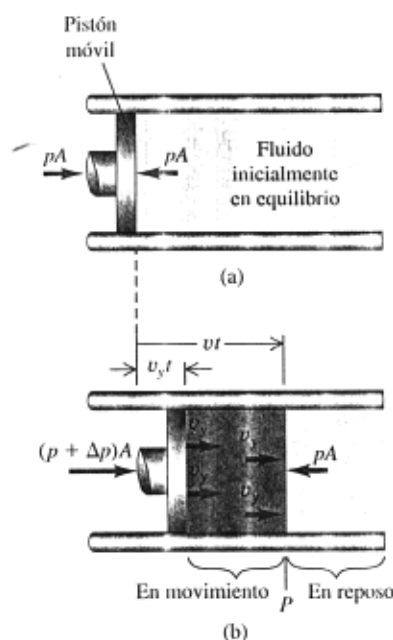
En la sección 15.4, vimos que la rapidez v de una onda transversal en una cuerda depende de la tensión F en la cuerda y la densidad lineal de masa μ : $v = \sqrt{F/\mu}$. ¿Existe una expresión correspondiente para la rapidez de las ondas sonoras en un gas o líquido? ¿De qué propiedades del medio depende la rapidez?

Podemos hacer una conjetura acertada recordando algo que dijimos en la sección 15.4: para las ondas mecánicas en general, la expresión de la rapidez de la onda tiene la forma

$$v = \sqrt{\frac{\text{(fuerza de restitución que vuelve el sistema al equilibrio)}}{\text{(inercia que se opone al retorno al equilibrio)}}}$$

Una onda sonora en un volumen de fluido causa compresiones y expansiones del fluido, de modo que el término de fuerza de restitución de la expresión anterior debe tener que ver con lo fácil o difícil que es comprimir el fluido. Esto es precisamente lo que nos dice el módulo de volumen B del medio. Según la segunda ley de Newton, la inercia está relacionada con la masa. Lo “masivo” de un fluido se describe con su densidad ρ , que es masa por unidad de volumen. (La cantidad correspondiente para una cuerda es la masa por unidad de longitud, μ .) Por tanto, cabe esperar que la rapidez de las ondas sonoras tenga la forma $v = \sqrt{B/\rho}$.

Para verificar nuestra conjetura, deduciremos la rapidez de las ondas sonoras (longitudinales) en un fluido en un tubo. Este tema es importante, ya que todos los instrumentos musicales de aliento son básicamente tubos en los que una onda longitudinal (sonido) se propaga en un fluido (aire). La voz funciona con el mismo principio; ondas sonoras se propagan en el conducto vocal, que es básicamente un tubo lleno de aire conectado a los pulmones en un extremo (la laringe) y al aire exterior en el otro (la boca). Los pasos de nuestra deducción son paralelos a los que usamos en la sección 15.4 para obtener la rapidez de ondas transversales, así que podría ser útil repasar esa sección.



16.7 Propagación de una onda sonora en un fluido confinado en un tubo. (a) Fluido en equilibrio. (b) Un tiempo t después de que el pistón comienza a moverse a la derecha con rapidez v_y , el fluido entre el pistón y el punto P está en movimiento. La rapidez de las ondas sonoras es v .

La figura 16.7 muestra un fluido (líquido o gas) con densidad ρ en un tubo con área transversal A . En el estado de equilibrio, el fluido está sometido a una presión uniforme p . En la figura 16.7a el fluido está en reposo. Tomamos el eje x a lo largo del tubo. Ésta es también la dirección en que hacemos que se propague una onda longitudinal, así que el desplazamiento y también se mide a lo largo del tubo, igual que en la sección 16.1 (véase la Fig. 16.2).

En el instante $t = 0$, el pistón del extremo izquierdo comienza a moverse hacia la derecha con rapidez constante v_y . Esto inicia un movimiento ondulatorio que viaja a la derecha a lo largo del tubo, donde secciones sucesivas de fluido comienzan a moverse y a comprimirse en instantes sucesivamente posteriores.

La figura 16.7b muestra el fluido en el instante t . Todas las porciones del fluido a la izquierda de P se mueven a la derecha con rapidez v_y , y todas las porciones a la derecha están aún en reposo. La frontera entre las porciones en movimiento y estacionaria viaja a la derecha con una rapidez igual a la rapidez de propagación o rapidez de onda v . En t , el pistón se ha movido una distancia $v_y t$ y la frontera ha avanzado una distancia vt . Al igual que con las perturbaciones transversales en una cuerda, podemos calcular la rapidez de propagación a partir del teorema del impulso y la cantidad de movimiento.

La cantidad de fluido puesta en movimiento en el tiempo t es la cantidad que originalmente ocupaba una sección del cilindro con longitud vt , área transversal A y volumen vAt . La masa de este fluido es ρvAt , y su cantidad de movimiento longitudinal (a lo largo del tubo) es

$$\text{Cantidad de movimiento longitudinal} = (\rho vAt)v_y$$

Ahora calculamos el aumento de presión, Δp , en el fluido en movimiento. El volumen original de ese fluido, vAt , disminuyó en una cantidad $\Delta v_y t$. Por la definición del módulo de volumen B , ecuación (11.13) de la sección 11.5,

$$B = \frac{-\text{Cambio de presión}}{\text{Cambio fraccionario de volumen}} = \frac{-\Delta p}{-\Delta v_y t / vAt}$$

$$\Delta p = B \frac{v_y}{v}$$

La presión en el fluido en movimiento es $p + \Delta p$, y la fuerza ejercida sobre él por el pistón es $(p + \Delta p)A$. La fuerza neta sobre el fluido en movimiento (véase la Fig. 16.7b) es ΔpA , y el impulso longitudinal es

$$\text{Impulso longitudinal} = \Delta pAt = B \frac{v_y}{v} At$$

Dado que el fluido estaba en reposo en $t = 0$, el cambio de cantidad de movimiento hasta el instante t es igual a la cantidad de movimiento en t . Aplicando el teorema de impulso y la cantidad de movimiento, vemos que

$$B \frac{v_y}{v} At = \rho vAt v_y \quad (16.6)$$

Si despejamos v , obtenemos

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{rapidez de una onda longitudinal en un fluido}) \quad (16.7)$$

lo que concuerda con nuestra conjetura. Así, la rapidez de propagación de un pulso longitudinal en un fluido únicamente depende del módulo de volumen B y de la densidad ρ del medio.

Aunque dedujimos la ecuación (16.7) para ondas en un tubo, también es válida para ondas longitudinales en un gran volumen de fluido. Así, la rapidez de las ondas de sonido que viajan en aire o agua se obtiene con esta ecuación.

Si una onda longitudinal se propaga en una varilla o barra *sólida*, la situación es un tanto diferente. La varilla se expande un poco a los lados cuando se comprime longitudinalmente, mientras que un fluido en un tubo con sección transversal constante no puede hacerlo. Usando el mismo razonamiento que nos llevó a la ecuación (16.7), podemos demostrar que la rapidez de un pulso longitudinal en la varilla está dada por

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (\text{rapidez de una onda longitudinal en una varilla sólida}) \quad (16.8)$$

donde Y es el módulo de Young, definido en la sección 11.4.

¡CUIDADO! La ecuación (16.8) es válida sólo para una varilla o barra cuyos lados pueden abombarse y encogerse libremente un poco al viajar la onda; no es válida para ondas longitudinales en un *gran volumen* de sólido, ya que aquí el movimiento lateral de cualquier elemento es impedido por el material circundante. La rapidez de las ondas longitudinales en un material sólido en volumen depende de la densidad, el módulo de volumen y el módulo de corte. Una explicación cabal rebasa el alcance de este libro.

Al igual que en la deducción para una onda transversal en una cuerda, las ecuaciones (16.7) y (16.8) son válidas para cualquier onda periódica, no sólo para el caso especial que vimos aquí.

La tabla 16.1 presenta la rapidez del sonido en varios medios materiales. Las ondas sonoras viajan más lentamente en plomo que en aluminio o acero porque el plomo tiene módulos de volumen y de corte menores, y mayor densidad.

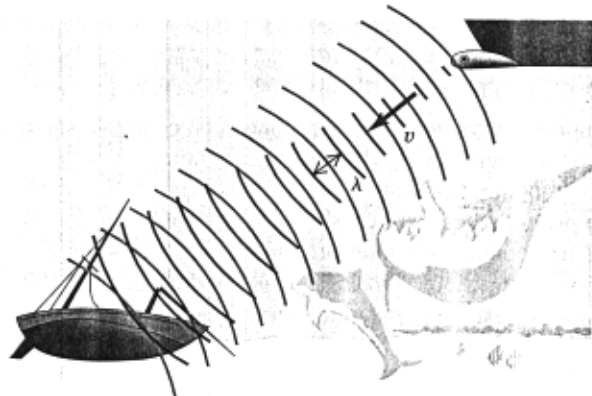
Tabla 16.1 Rapidez del sonido en varios medios materiales

Material	Rapidez del sonido (m/s)
<i>Gases</i>	
Aire (20°C)	344
Helio (20°C)	999
Hidrógeno (20°C)	1330
<i>Líquidos</i>	
Helio líquido (4 K)	211
Mercurio (20°C)	1451
Agua (0°C)	1402
Agua (20°C)	1482
Agua (20°C)	1543
<i>Sólidos</i>	
Aluminio	6420
Plomo	1960
Acero	5941

Ejemplo 16.3

Longitud de onda del sonar

Un barco usa un sistema de sonar para detectar objetos submarinos (Fig. 16.8). El sistema emite ondas sonoras submarinas y mide el tiempo que tarda la onda reflejada (eco) en volver al detector. De-



16.8 Un sistema de sonar usa ondas sonoras submarinas para detectar y encontrar objetos bajo el agua.

termine la rapidez del sonido en el agua con la ecuación (16.7) y calcule la longitud de onda de una onda de 262 Hz.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Para usar la ecuación (16.7), obtendremos el módulo de volumen del agua a partir de la compresibilidad (tabla 11.2) y la densidad ($\rho = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Dada la rapidez y la frecuencia $f = 262 \text{ Hz}$, calcularemos la longitud de onda a partir de la relación $v = f\lambda$.

EJECUTAR: Por la tabla 11.2, la compresibilidad del agua (el recíproco del módulo de volumen) es $k = 45.8 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, así que $B = (1/45.8) \times 10^{11} \text{ Pa}$. Obtenemos

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1/45.8) \times 10^{11} \text{ Pa}}{1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}} = 1480 \text{ m/s}$$

La longitud de onda es

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1480 \text{ m/s}}{262 \text{ s}^{-1}} = 5.65 \text{ m}$$

EVALUAR: El valor calculado de v concuerda con el valor experimental de la tabla 16.1. Aunque el agua es mucho más densa que el aire (ρ es mayor), también es mucho más incompresible (B es mayor); la rapidez $v = \sqrt{B/\rho}$ resulta ser más de cuatro veces la rapidez del sonido en aire a temperaturas ordinarias.

En el ejemplo 15.1 (sección 15.2) calculamos que una onda con esta frecuencia en aire tiene longitud de onda de 1.31 m. La rapidez del sonido en agua es mayor que en el aire, así que la longitud de onda $\lambda = v/f$ también debe ser mayor; nuestro cálculo coincide.

Los delfines emiten ondas sonoras de alta frecuencia (del orden de 100,000 Hz) y usan los ecos para guiarse y cazar. La longitud de onda correspondiente en agua es de 1.48 cm. Con este sistema de “sonar” de alta frecuencia, pueden detectar objetos del tamaño de la longitud de onda (pero no mucho menores). La *visualización ultrasónica* es una técnica médica que usa el mismo principio físico: ondas sonoras de muy alta frecuencia y longitud de onda muy corta, llamadas *ultrasonido*, barren el cuerpo humano, y se usan los “ecos” de los órganos internos para crear una imagen. Con ultrasonido de $f = 5 \text{ MHz} = 5 \times 10^6 \text{ Hz}$, la longitud de onda en agua (principal constituyente del cuerpo) es de 0.3 mm, así que pueden distinguirse rasgos de este tamaño en la imagen. El ultrasonido se usa para estudiar la operación de las válvulas cardíacas y detectar tumores, y en exámenes prenatales (Fig. 16.9); es más sensible que los rayos X para distinguir los diversos tipos de tejidos y no ofrece el peligro de radiación de esos rayos.

Ejemplo 16.4

Rapidez de una onda longitudinal

Calcule la rapidez de ondas longitudinales en una varilla de plomo.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Las ondas de este tipo se producen sujetando la varilla con una abrazadera y golpeando la cara de un extremo con un martillo. La amplitud de las ondas resultantes es tan pequeña que es prácticamente invisible a simple vista. Sin embargo, la pregunta se refiere a la *rapidez* de las ondas, que no depende de la amplitud. No podemos usar simplemente el valor para el plomo de la tabla 16.1, pues ese valor se refiere a la rapidez del sonido en un *gran volumen* de material, no en una varilla.

PLANTEAR: Esta es la situación en la que se aplica la ecuación (16.8). Obtenemos los valores del módulo de Young Y y la densidad ρ de las tablas 11.1 y 14.1, respectivamente.

EJECUTAR: Consultamos $Y = 1.6 \times 10^{10} \text{ Pa}$ y $\rho = 11.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (es decir, 11.4 veces la densidad del agua), y

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.6 \times 10^{10} \text{ Pa}}{11.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}} = 1.2 \times 10^3 \text{ m/s}$$

EVALUAR: Esto es más del triple de la rapidez del sonido en aire, pero menor que la rapidez del sonido en un *gran volumen* de plomo (véase la tabla 16.1); ello se debe a que, en el caso del plomo, el módulo de volumen es mayor que el módulo de Young.

Rapidez del sonido en gases

Casi todas las ondas sonoras que escuchamos se propagan en el aire. Si queremos usar la ecuación (16.7) para obtener la rapidez de ondas sonoras en el aire, debemos tener presente que el módulo de volumen de un gas depende de la presión del gas: cuanto mayor es la presión que se aplica a un gas para comprimirlo, más resistencia opone el gas a una compresión ulterior, y mayor es su módulo de volumen. (Es por ello que no se dan valores específicos del módulo de volumen para gases en la tabla 11.1.) La expresión para el módulo de volumen de un gas que se usaría en la ecuación (16.7) es

$$B = \gamma p_0 \quad (16.9)$$

donde p_0 es la presión de equilibrio del gas. La cantidad γ (la letra griega “gamma”) se denomina *la razón de capacidades caloríficas*. Es un número adimensio-

nal que caracteriza las propiedades térmicas del gas. (Aprenderemos más acerca de esta cantidad en el capítulo 19.) Por ejemplo, la razón de capacidades caloríficas del aire es $\gamma = 1.40$. A la presión atmosférica normal $p_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $B = (1.40)(1.013 \times 10^5 \text{ Pa}) = 1.42 \times 10^5 \text{ Pa}$. Este valor es minúsculo en comparación con el módulo de volumen de un sólido representativo (tabla 11.1), que es del orden de 10^{10} o 10^{11} Pa . Esto es lógico: simplemente nos dice que el aire es mucho más fácil de comprimir que el acero.

La densidad ρ de un gas también depende de la presión, que a su vez depende de la temperatura. Resulta que el cociente B/ρ para un tipo dado de gas ideal *no* depende de la presión, sólo de la temperatura. Por la ecuación (16.7), esto implica que la rapidez del sonido en un gas es fundamentalmente función de la temperatura T :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (\text{rapidez del sonido en un gas ideal}) \quad (16.10)$$

Esta expresión incorpora varias cantidades que el lector posiblemente reconoce de su estudio de los gases ideales en química y que estudiaremos en los capítulos 17, 18 y 19. La temperatura T es la temperatura *absoluta* en kelvin (K), igual a la temperatura Celsius más 273.15; por tanto, 20.00°C corresponde a $T = 293.15 \text{ K}$. La cantidad M es la *masa molar*, o masa por mol de la sustancia de que se compone el gas. La *constante de los gases* R tiene el mismo valor para todos los gases. El valor numérico aceptado actualmente de R es

$$R = 8.314472(15) \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

aunque en cálculos prácticos usaremos $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$.

Para un gas dado, γ , R y M son constantes, y la rapidez de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. En el capítulo 18 veremos que la ecuación (16.10) es casi idéntica a la expresión para la rapidez media de las moléculas en un gas ideal. Esto demuestra que la rapidez del sonido y las rapidezces moleculares están íntimamente relacionadas; explorar los pormenores de esa relación rebasa el alcance de este libro.



16.9 Esta imagen tridimensional de un feto en la matriz se obtuvo mediante una sucesión de exploraciones con ultrasonido. Cada exploración revela una "tajada" bidimensional del feto; después, se combinaron digitalmente muchas de esas tajadas para producir esta extraordinaria imagen.

Ejemplo 16.5

Rapidez del sonido en aire

Calcule la rapidez de las ondas sonoras en aire a temperatura ambiente ($T = 20^\circ\text{C}$) y determine el rango de longitudes de onda en el aire a la que el oído humano (que puede escuchar frecuencias entre 20 y 20,000 Hz) es sensible. La masa molar media del aire (cuyos componentes principales son nitrógeno y oxígeno) es de $28.8 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ y la razón de capacidades caloríficas es $\gamma = 1.40$.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Usaremos la ecuación (16.10) para obtener la rapidez del sonido, y la relación $v = f\lambda$ para determinar la longitud de onda que corresponde a cada frecuencia.

EJECUTAR: A $T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$ vemos que

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \\ &= \sqrt{\frac{(1.40)(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K})}{28.8 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}} = 344 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Si usamos este valor de v y la expresión $\lambda = v/f$, vemos que, a 20°C , una nota de 20 Hz corresponde a una longitud de onda de 17 m, y una nota de 20,000 Hz corresponde a una longitud de onda de 1.7 cm.

EVALUAR: El valor de v que calculamos coincide con la rapidez medida del sonido a esta temperatura, con un error de menos del 0.3%.

Resulta interesante que los murciélagos pueden escuchar frecuencias mucho mayores. Al igual que los delfines, los murciélagos usan sonido de alta frecuencia para guiarse. Una frecuencia típica es de 100 kHz; la longitud de onda correspondiente en aire a 20°C es de aproximadamente 3.4 mm, suficiente para detectar los insectos voladores que comen.

En este análisis, hemos hecho caso omiso de la naturaleza *molecular* de los gases y los hemos tratado como un medio continuo. En realidad, los gases se componen de moléculas en movimiento aleatorio, separadas por distancias grandes en comparación con su diámetro. Las vibraciones que constituyen una onda en un gas se superponen al movimiento térmico aleatorio. A la presión atmosférica, una molécula recorre una distancia media del orden de 10^{-7} m entre choques, mientras que la amplitud de desplazamiento de un sonido tenue podría ser de sólo 10^{-9} m. Podríamos comparar un gas por el que pasa una onda sonora con un enjambre de abejas; el enjambre en conjunto oscila levemente mientras que insectos individuales se mueven dentro del enjambre, aparentemente al azar.

Evalúe su comprensión

Calcule la rapidez de ondas longitudinales a lo largo de una vía férrea. Explique por qué puede escuchar el sonido de un tren que se aproxima pegando la oreja al riel, antes de poder oírlo en el aire.

16.3 | Intensidad del sonido

Las ondas sonoras viajan, al igual que todas las ondas viajeras, transfieren energía de una región del espacio a otra. En la sección 15.5 vimos que una forma útil de describir la energía transportada por un sonido es con la *intensidad de la onda*, I , igual a la rapidez media con que la onda transporta energía, por unidad de área, a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación. En particular, expresaremos la intensidad de una onda sonora en términos de la amplitud de desplazamiento A o la amplitud de presión $p_{\text{máx}}$.

Por sencillez, consideremos una onda sonora que se propaga en la dirección $+x$, a fin de poder usar las expresiones que dedujimos en la sección 16.1 para el desplazamiento $y(x, t)$ y la fluctuación de la presión $p(x, t)$, ecuaciones (16.1) y (16.4), respectivamente. En la sección 6.4 vimos que la potencia es el producto de la fuerza por la velocidad [vea la ecuación (6.18)]. Por tanto, la potencia por unidad de área en esta onda sonora es igual al producto de $p(x, t)$ (fuerza por unidad de área) por la velocidad de las partículas, $v_y(x, t)$. Esta última es la velocidad en el tiempo t de la porción del medio de la onda que está en la coordenada x . Utilizando las ecuaciones (16.1) y (16.4), tenemos

$$\begin{aligned} v_y(x, t) &= \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \sin(kx - \omega t) \\ p(x, t)v_y(x, t) &= [BkA \sin(kx - \omega t)][\omega A \sin(kx - \omega t)] \\ &= B\omega k A^2 \sin^2(kx - \omega t) \end{aligned}$$

¡CUIDADO! Recuerde que la velocidad de la onda en su totalidad *no* es igual a la velocidad de las partículas. Mientras que la onda se sigue moviendo en la dirección de propagación, las partículas individuales del medio simplemente oscilan hacia adelante y hacia atrás, como se muestra en la figura (16.1). Además, la rapidez máxima de una partícula del medio puede ser muy diferente de la rapidez de la onda.

La intensidad es, por definición, el valor promedio de $p(x, t)v_y(x, t)$. Para cualquier valor de x , el valor medio de la función $\sin^2(kx - \omega t)$ durante un periodo $T = 2\pi/\omega$ es $1/2$, así que

$$I = \frac{1}{2} B\omega k A^2 \quad (16.11)$$

Utilizando las relaciones $\omega = vk$ y $v^2 = B/\rho$, podemos transformar la ecuación (16.11) a la forma

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\rho B} \omega^2 A^2 \quad (\text{intensidad de una onda sonora senoidal}) \quad (16.12)$$

Esta ecuación muestra por qué en un sistema estereofónico, un *woofer* de baja frecuencia debe vibrar con mucha mayor amplitud que un *tweeter* de alta frecuencia para producir la misma intensidad de sonido.

Suele ser más útil expresar I en términos de la amplitud de presión $p_{\text{máx}}$. Usando la ecuación (16.5) y la relación $\omega = vk$, vemos que

$$I = \frac{\omega p_{\text{máx}}^2}{2Bk} = \frac{v p_{\text{máx}}^2}{2B} \quad (16.13)$$

Utilizando la relación de rapidez de onda $v^2 = B/\rho$, también podemos escribir la ecuación (16.13) así:

$$I = \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\rho v} = \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\sqrt{\rho B}} \quad (\text{intensidad de una onda sonora senoidal}) \quad (16.14)$$

Invitamos al lector a verificar estas expresiones (véase el ejercicio 16.16). Al comparar las ecuaciones (16.12) y (16.14), vemos que ondas sonoras senoidales con la misma intensidad pero diferente frecuencia tienen diferente amplitud de desplazamiento A pero la *misma* amplitud de presión $p_{\text{máx}}$. Ésta es otra razón por la que suele ser más útil describir una onda sonora en términos de fluctuaciones de presión, no desplazamiento.

La potencia media *total* transportada a través de una superficie por una onda sonora es igual al producto de la intensidad en la superficie por el área, si la intensidad sobre la superficie es uniforme. La potencia sonora total media emitida por una persona hablando con voz normal es del orden de 10^{-5} W, en tanto que un grito fuerte corresponde a cerca de 3×10^{-2} W. Si todos los residentes de Nueva York hablaran al mismo tiempo, la potencia total del sonido sería de unos 100 W, equivalente al consumo de potencia de una bombilla mediana. Por otro lado, la potencia requerida para llenar un auditorio grande o un estadio con sonido fuerte es considerable (véase el ejemplo 16.9).

Si la fuente de sonido emite ondas en todas direcciones igualmente, la intensidad disminuye al aumentar la distancia r de la fuente, según la ley del inverso del cuadrado: la intensidad es proporcional a $1/r^2$. Ya vimos esta ley y sus consecuencias en la sección 15.5.

La relación del inverso del cuadrado no es válida en interiores porque la energía sonora también puede llegar a un receptor reflejada de las paredes y el techo. Efectivamente, una parte de la labor del arquitecto al diseñar un auditorio es adaptar las reflexiones de modo que la intensidad sea lo más constante posible en todo el auditorio.

Estrategia para resolver problemas

Intensidad del sonido

IDENTIFICAR los conceptos pertinentes: Las relaciones entre intensidad y amplitud de una onda sonora son relativamente sencillas. No obstante, muchas otras cantidades intervienen en

esas relaciones, por lo que es muy importante decidir cuál es la incógnita.

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. Divida las diversas cantidades físicas en categorías. La amplitud se describe con A o $p_{\text{máx}}$, y la frecuencia f puede determinarse a partir de ω , k o λ . Estas cantidades se relacionan a través de la rapidez de la onda v , que a su vez depende de las propiedades del medio: B y ρ en el caso de un líquido; γ , T y M en el caso de un gas.
2. Identifique qué cantidades se dan y cuáles son desconocidas, y busque relaciones que lo lleven a donde desea ir.

EJECUTAR la solución como sigue: Use las ecuaciones que seleccionó para despejar las incógnitas. Asegúrese de que todas las cantidades estén expresadas en las unidades correctas. En particular, si se usa la temperatura para calcular la rapidez del sonido en un gas, asegúrese de que esté expresada en kelvins (temperatura Celsius más 273.15).

EVALUAR la respuesta: Hay varias relaciones entre las cantidades que describen una onda. Pruebe otra para comprobar sus resultados.

Ejemplo 16.6

Intensidad de una onda sonora en aire

Calcule la intensidad de la onda sonora del ejemplo 16.1, con $p_{\text{máx}} = 3.0 \times 10^{-2}$ Pa, si la temperatura es 20°C de modo que la densidad del aire es $\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$ y la rapidez del sonido es $v = 344 \text{ m/s}$.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Nos dan la amplitud de presión, $p_{\text{máx}}$, la densidad ρ y la rapidez de onda v , y nos piden la intensidad I . La forma más fácil de obtenerla es con la ecuación (16.14).

EJECUTAR: Por la ecuación (16.14),

$$I = \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\rho v} = \frac{(3.0 \times 10^{-2} \text{ Pa})^2}{2(1.20 \text{ kg/m}^3)(344 \text{ m/s})} \\ = 1.1 \times 10^{-6} \text{ J/(s} \cdot \text{m}^2) = 1.1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

EVALUAR: Ésta parece una intensidad muy baja, pero en realidad está dentro del intervalo de intensidades de sonido que experimentamos a diario. Una onda sonora muy fuerte en el umbral del dolor tiene una amplitud de presión de cerca de 30 Pa y una intensidad de aproximadamente 1 W/m^2 . La amplitud de presión de la onda sonora más tenue que puede escucharse es del orden de $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, y la intensidad correspondiente es de cerca de 10^{-12} W/m^2 . (Pruebe estos valores de $p_{\text{máx}}$ en la ecuación (16.14) para verificar que las intensidades correspondientes sean las que mencionamos.)

Ejemplo 16.7

Misma intensidad, diferentes frecuencias

Una onda sonora de 20 Hz tiene la misma intensidad que la de 1000 Hz de los ejemplos 16.1 y 16.6. ¿Qué amplitud de desplazamiento y qué amplitud de presión tiene la onda sonora de 20 Hz?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Dada la intensidad, podemos usar la ecuación (16.12) para determinar la amplitud de desplazamiento A . Observe que no nos dan el valor de B . Sin embargo, ρ y B dependen únicamente de las propiedades del medio, no de la amplitud ni la frecuencia, así que sus valores se cancelarán si igualamos las intensidades a 20 Hz y a 1000 Hz. También podemos usar la ecuación (16.14) para obtener la amplitud de presión a 20 Hz.

EJECUTAR: Una inspección de la ecuación (16.12) revela que, si una onda en un medio dado (mismos ρ y B) tiene la misma intensidad I a dos frecuencias distintas, el producto ωA debe tener el

mismo valor con ambas frecuencias. Por el ejemplo 16.1, $A = 1.2 \times 10^{-8} \text{ m}$ a 1000 Hz, así que

$$(20 \text{ Hz})A_{20} = (1000 \text{ Hz})(1.2 \times 10^{-8} \text{ m}) \\ A_{20} = 6.0 \times 10^{-7} \text{ m} = 0.60 \mu\text{m}$$

¿Entiende por qué no tuvimos que convertir las frecuencias en frecuencias angulares?

Puesto que la intensidad es la misma para ambas frecuencias, la ecuación (16.14) indica que la amplitud de presión $p_{\text{máx}}$ también debe ser la misma. Por tanto, $p_{\text{máx}} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ para $f = 20 \text{ Hz}$.

EVALUAR: Nuestro resultado refuerza la idea de que la amplitud de presión ofrece una descripción más conveniente de una onda sonora que la amplitud de desplazamiento. Observe también que, si usamos la ecuación (16.5) y $k = \omega/v$, obtenemos $p_{\text{máx}} = BkA = (B/v)\omega A$; el módulo de volumen B y la rapidez de la onda v sólo dependen del medio, y concluimos otra vez que el producto ωA debe tener el mismo valor para ambas frecuencias.

**Ejemplo
16.8****Onda sonora a gran altitud**

A una altitud de 11,000 m, cercana a la altitud de vuelo de crucero de los *jets* comerciales (Fig. 16.10), la atmósfera es fría y está enrarecida: la temperatura es de -57°C , la presión es de $2.26 \times 10^4 \text{ Pa}$ y la densidad es de 0.364 kg/m^3 . ¿Qué intensidad tendría una onda sonora de 1000 Hz con la misma amplitud de desplazamiento que la onda al nivel del mar de los ejemplos 16.1 y 16.6?



16.10 ¿Cómo difieren las ondas sonoras en la parte alta de la atmósfera?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Podemos usar la ecuación (16.12) para determinar la intensidad a partir de la densidad, el módulo de volumen, la frecuencia y la amplitud. No nos dan el valor de B , pero podemos calcularlo con la ecuación (16.9).

EJECUTAR: Utilizando la ecuación (16.9) y el valor $\gamma = 1.40$ para el aire, obtenemos $B = \gamma p_0 = (1.40)(2.26 \times 10^4 \text{ Pa}) = 3.16 \times 10^4 \text{ Pa}$. Entonces, por la ecuación (16.12),

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \sqrt{(0.364 \text{ kg/m}^3)(2.26 \times 10^4 \text{ Pa})} \\ &\quad \times (2\pi)^2 (1000 \text{ Hz})^2 (1.2 \times 10^{-8} \text{ m})^2 \\ &= 3.1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

EVALUAR: Esta intensidad es sólo el 28% de la de una onda con la misma amplitud al nivel del mar ($3.1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ contra $1.1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$). Por tanto, una bocina que oscila con cierta amplitud produciría un sonido mucho menos intenso a gran altitud. A mayor altitud aún, la atmósfera se desvanece en el vacío casi total del espacio interplanetario, y la densidad y presión (y por tanto el módulo de volumen) disminuyen a cero. La intensidad también disminuye, así que el espacio exterior es casi silencioso.

**Ejemplo
16.9****"¡Que suene!"**

Para un concierto al aire libre, queremos que la intensidad del sonido a 20 m de los altavoces sea de 1 W/m^2 . Suponiendo que las ondas sonoras tienen la misma intensidad en todas direcciones, ¿qué salida de potencia acústica debe tener el grupo de altavoces?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Aquí se usa la definición de intensidad como potencia por unidad de área. La potencia total es la incógnita, y el área en cuestión es un hemisferio centrado en el grupo de altavoces.

PLANTEAR: Suponemos que los altavoces están cerca del suelo y que la potencia acústica se dispersa uniformemente en un hemisfe-

rio de 20 m de radio (esto es, suponemos que no se dirige potencia acústica hacia el suelo). El área superficial de este hemisferio es $(1/2)(4\pi)(20 \text{ m})^2 = 2500 \text{ m}^2$. La potencia acústica requerida es el producto de esta área y la intensidad.

EJECUTAR: La potencia del grupo de altavoces es

$$(1 \text{ W/m}^2)(2500 \text{ m}^2) = 2500 \text{ W} = 2.5 \text{ kW}$$

EVALUAR: La entrada de potencia eléctrica a los altavoces tendría que ser mucho mayor, porque su eficiencia no es muy alta (de menos de 10% para los altavoces ordinarios, y de hasta el 25% para los de tipo de bocina).

La escala de decibeles

Dado que el oído es sensible a una gama amplia de intensidades, suele usarse una escala de intensidad *logarítmica*. El **nivel de intensidad de sonido** β de una onda sonora está definido por la ecuación

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{definición de nivel de intensidad de sonido})(16.15)$$

En esta ecuación, I_0 es una intensidad de referencia que se toma como 10^{-12} W/m^2 , aproximadamente el umbral del oído humano a 1000 Hz. Recuerde que “log” significa logaritmo base 10. Los niveles de intensidad de sonido se expresan en **decibeles**, cuya abreviatura es dB. Un decibel es $\frac{1}{10}$ de un *bel*, unidad llamada así en honor de Alexander Graham Bell (el inventor del teléfono). El bel es demasiado grande para casi todos los fines, así que el decibel es la unidad usual de nivel de intensidad de sonido.

Si la intensidad de una onda sonora es igual a $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, su nivel de intensidad de sonido es de 0 dB. Una intensidad de 1 W/m^2 corresponde a 120 dB. La tabla 16.2 da los niveles de intensidad de sonido en decibeles de varios sonidos comunes. Podemos usar la ecuación (16.15) para verificar el valor del nivel de intensidad de sonido β dado para cada intensidad de la tabla.

Tabla 16.2 Niveles de intensidad de sonido de diversas fuentes (valores representativos).

Fuente o descripción del sonido	Nivel de intensidad del sonido, β (dB)	Intensidad, I (W/m^2)
Avión militar a reacción a 30 m	140	10^2
Umbral del dolor	120	1
Remachador	95	3.2×10^{-3}
Tren elevado	90	10^{-3}
Tráfico urbano intenso	70	10^{-5}
Conversación ordinaria	65	3.2×10^{-6}
Automóvil silencioso	50	10^{-7}
Radio bajo en el hogar	40	10^{-8}
Murmullo normal	20	10^{-10}
Susurro de hojas	10	10^{-11}
Umbral del oído a 1000 Hz	0	10^{-12}

Dado que el oído no es igualmente sensible a todas las frecuencias de la gama audible, algunos medidores de nivel de sonido ponderan de manera desigual las diversas frecuencias. Un esquema de ese tipo da pie a la llamada escala dBA, la cual da menos importancia a las frecuencias bajas y muy altas, donde el oído es menos sensible.

Ejemplo 16.10

Sordera temporal

Una exposición de 10 min a un sonido de 120 dB suele desplazar el umbral del oído a 1000 Hz, de 0 dB a 28 dB, durante un tiempo. Diez años de exposición al sonido de 92 dB causan un desplazamiento permanente a 28 dB. ¿Qué intensidades corresponden a 28 y 92 dB?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Despejaremos la intensidad I (la incógnita) de la ecuación (16.15) para cada valor del nivel de intensidad de sonido β .

EJECUTAR: Reacomodamos la ecuación (16.15) dividiendo ambos miembros entre 10 dB y usando la relación $10^{\log x} = x$:

$$I = I_0 10^{\beta/(10 \text{ dB})}$$

Cuando $\beta = 28 \text{ dB}$,

$$\begin{aligned} I &= (10^{-12} \text{ W/m}^2) 10^{(28 \text{ dB}/10 \text{ dB})} \\ &= (10^{-12} \text{ W/m}^2) 10^{2.8} = 6.3 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

De forma similar, para $\beta = 92 \text{ dB}$,

$$I = (10^{-12} \text{ W/m}^2) 10^{(92 \text{ dB}/10 \text{ dB})} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

EVALUAR: Si sus respuestas son demasiado grandes por un factor de 10, tal vez haya introducido 10×10^{-12} en su calculadora en lugar de 1×10^{-12} . ¡Tenga cuidado!

Ejemplo
16.11

Un pájaro canta en una pradera

Considere un modelo idealizado en el que un pájaro (considerado como fuente puntual) emite una potencia sonora constante, cuya intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al ave. ¿Cuántos decibeles bajará el nivel de intensidad del sonido si nos alejamos al doble de la distancia del ave?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Dado que la escala de decibeles es logarítmica, la diferencia entre dos niveles de intensidad de sonido (la incógnita) corresponde a la razón de las intensidades correspondientes. La razón de las intensidades se toma de la ley del inverso del cuadrado.

PLANTEAR: Rotularemos los dos puntos 1 y 2 (Fig. 16.11) y usaremos dos veces (una en cada punto) la ecuación (16.15), que es la definición de nivel de intensidad de sonido. Usaremos la ecuación (15.26), que plantea la ley del inverso del cuadrado, para relacionar las intensidades en los dos puntos.

EJECUTAR: La diferencia en el nivel de intensidad del sonido, $\beta_2 - \beta_1$, está dada por

$$\begin{aligned}\beta_2 - \beta_1 &= (10 \text{ dB}) \left(\log \frac{I_2}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0} \right) \\ &= (10 \text{ dB}) [(\log I_2 - \log I_0) - (\log I_1 - \log I_0)] \\ &= (10 \text{ dB}) \log \frac{I_2}{I_1}\end{aligned}$$

Ahora usamos el recíproco de la ecuación (15.26); $I_2/I_1 = r_1^2/r_2^2$, y

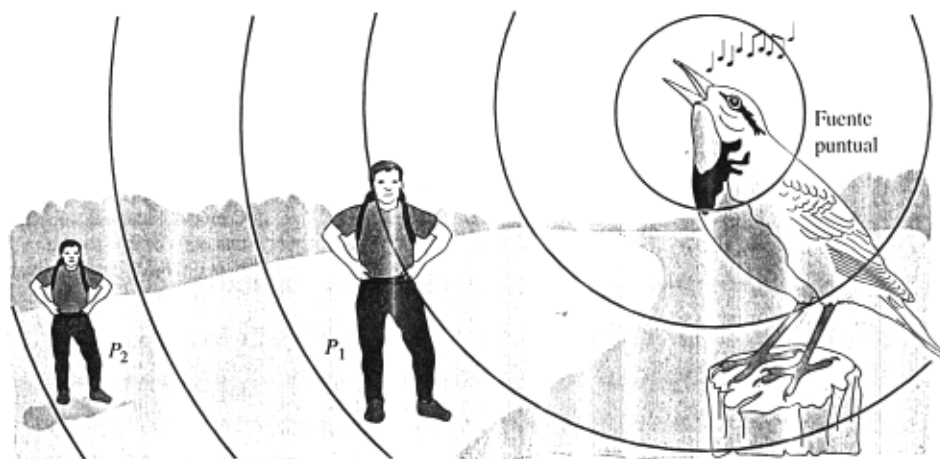
$$\begin{aligned}\beta_2 - \beta_1 &= (10 \text{ dB}) \log \frac{r_1^2}{r_2^2} = (10 \text{ dB}) \log \frac{r_1^2}{(2r_1)^2} \\ &= (10 \text{ dB}) \log \frac{1}{4} = -6.0 \text{ dB}\end{aligned}$$

Una reducción de intensidad en un factor de 4 corresponde a una disminución de 6 dB en el nivel de intensidad de sonido.

EVALUAR: Nuestro resultado es negativo, lo que nos dice (correctamente) que el nivel de intensidad del sonido es menor en el punto 2 que en el punto 1. La diferencia de 6 dB no depende del valor del nivel de intensidad del sonido en el punto 1. Si el punto 1 está relativamente cerca del ave, de modo que $\beta_1 = 56 \text{ dB}$, entonces, en un punto al doble de la distancia, $\beta_2 = 50 \text{ dB}$; si el punto 1 está más distante del ave, de modo que $\beta_1 = 28 \text{ dB}$, entonces, en un punto al doble de la distancia, $\beta_2 = 22 \text{ dB}$.

Resulta interesante que el volumen percibido de un sonido no es directamente proporcional a su intensidad. Por ejemplo, la mayoría de las personas interpreta un aumento de 8 a 10 dB en el nivel de intensidad del sonido (que corresponde a un aumento de la intensidad por un factor de 6 a 10) como un aumento del volumen al doble.

16.11 Si duplicamos nuestra distancia a una fuente puntual de sonido, ¿en cuánto disminuye el nivel de intensidad de sonido?



Evalúe su comprensión

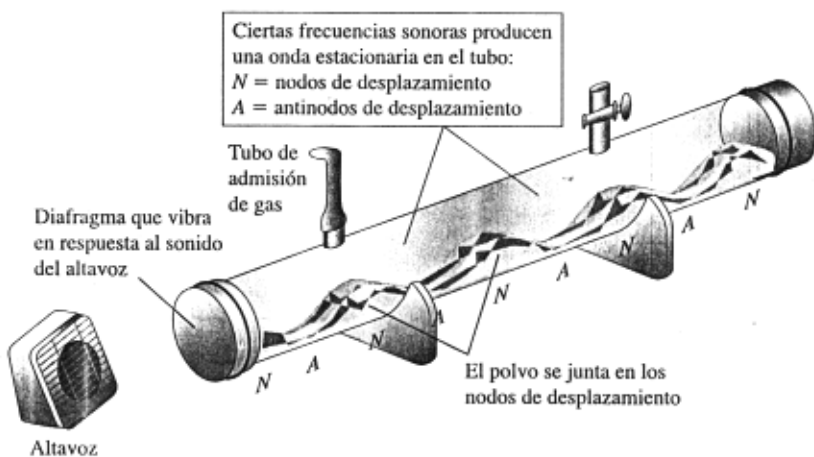
Se aumenta al doble la intensidad de una onda sonora en aire, sin alterar su frecuencia. (Tampoco cambian la presión, densidad y temperatura del aire.) ¿Qué efecto tiene esto sobre la amplitud de desplazamiento, la amplitud de presión, el módulo de volumen, la rapidez del sonido y el nivel de intensidad del sonido?

16.4 | Ondas sonoras estacionarias y modos normales

Cuando ondas longitudinales (de sonido) se propagan en un fluido dentro de un tubo con longitud finita, se reflejan en los extremos igual que las ondas transversales en una cuerda. La superposición de las ondas que viajan en direcciones opuestas forma también una onda estacionaria. Al igual que las ondas estacionarias en una cuerda (sección 15.7), las ondas sonoras estacionarias (modos normales) en un tubo pueden servir para crear ondas de sonido en el aire circundante. Éste es el principio de operación de la voz humana y de muchos instrumentos musicales, incluidos los de aliento de madera y de metal, y los órganos.

Las ondas transversales en una cuerda, incluidas las estacionarias, suelen describirse sólo en términos del desplazamiento de la cuerda. En cambio, ya vimos que las ondas sonoras en un fluido pueden describirse en términos del desplazamiento del fluido o bien en términos de variaciones en la presión del fluido. Para evitar confusiones, usaremos los términos **nodo de desplazamiento** y **antinodo de desplazamiento** para referirnos a puntos en los que las partículas del fluido tienen cero desplazamiento y máximo desplazamiento, respectivamente.

Podemos demostrar las ondas sonoras estacionarias en una columna de gas con un aparato llamado tubo de Kundt (Fig. 16.12). Un tubo horizontal de vidrio de aproximadamente 1 m de longitud se cierra por un extremo, y en el otro se instala un diafragma flexible que puede transmitir vibraciones. Un altavoz cercano se conecta a un oscilador y amplificador de audio, y produce ondas sonoras que obligan al diafragma a vibrar senoidalmente con una frecuencia que podemos variar. Las ondas sonoras dentro del tubo se reflejan en el extremo cerrado. Esparcimos un poco de polvo ligero uniformemente en el interior del tubo. Al variar la frecuencia del sonido, pasamos por frecuencias en las que la amplitud de las ondas estacionarias es lo bastante grande como para que el polvo sea acarreado a lo largo del tubo en los puntos donde el gas se mueve. Por tanto, el polvo se acumula en los nodos de desplazamiento (donde el gas no se mueve). Los nodos adyacentes están separados una distancia igual a $\lambda/2$, la cual podemos medir. Teniendo la longitud de onda, podemos usar este experimento para determinar la rapidez de las



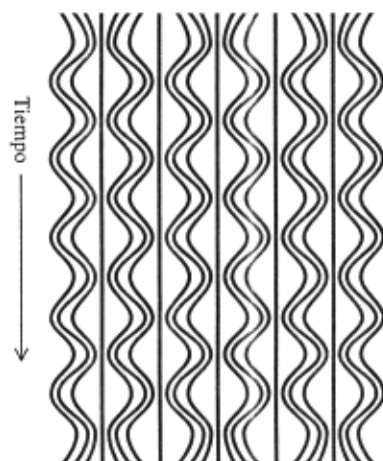
16.12 Demostración de ondas sonoras estacionarias con un tubo de Kundt. El sombreado azul representa la densidad del gas en un instante en que la presión del gas en los nodos de desplazamiento es máxima o mínima.

ondas: leemos la frecuencia f del oscilador y así podemos calcular la rapidez v de las ondas usando la relación $v = \lambda f$.

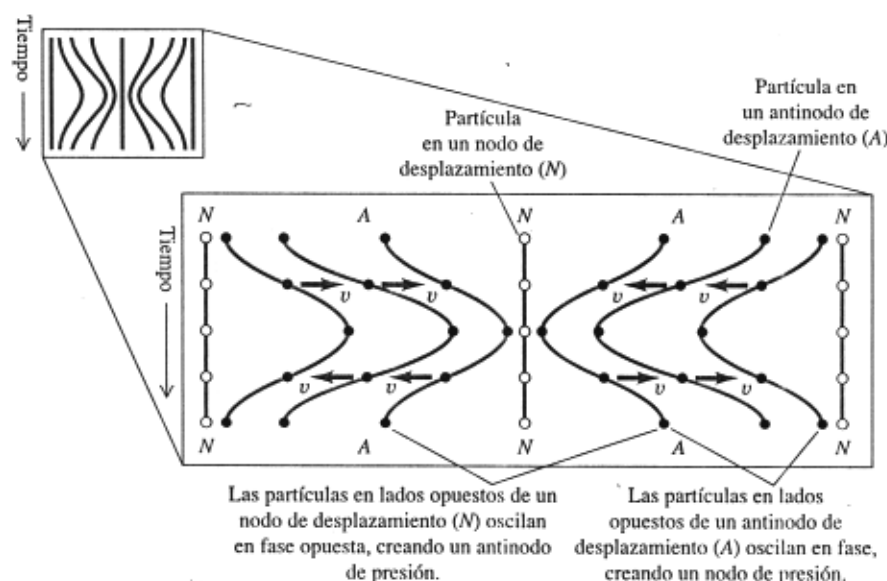
La figura 16.13 nos ayuda a visualizar las ondas sonoras estacionarias; es análoga a la figura 16.4 para las ondas longitudinales viajeras. Pegue otra vez dos tarjetas dejando una ranura de 1 mm entre ellas, colóquelas sobre el diagrama con la ranura horizontal y muévalas verticalmente con velocidad constante. Las porciones de las senoidales que aparecen en la ranura corresponden a las oscilaciones de las partículas en una onda longitudinal estacionaria. Cada partícula se mueve en movimiento armónico simple longitudinal alrededor de su posición de equilibrio.

La figura 16.14 es una versión ampliada de una parte de la figura 16.13 centrada en un nodo de desplazamiento. Observe que las partículas en lados opuestos del nodo vibran en fase opuesta. Cuando estas partículas se acercan una a la otra, el gas entre ellas se comprime y la presión aumenta; cuando se alejan, hay una expansión y la presión baja. Así, en un *nodo* de desplazamiento el gas sufre compresión y expansión máximas, y las variaciones de presión y densidad arriba y abajo de la media tienen su valor máximo. En contraste, las partículas en lados opuestos de un *antinodo* de desplazamiento vibran *en fase*; la distancia entre ellas es casi constante, y la presión y la densidad *no* varían en el antinodo.

Usamos el término **nodo de presión** para describir un punto de una onda sonora estacionaria en el que la presión y la densidad no varían, y el término **antinodo de presión**, para describir un punto en el que las variaciones de presión y densidad son máximas. Con estos términos, podemos resumir nuestras observaciones acerca de las ondas sonoras estacionarias como sigue: **un nodo de presión siempre es un antinodo de desplazamiento, y un antinodo de presión siempre es un nodo de desplazamiento**. La figura 16.12 muestra la onda estacionaria en el instante en que las variaciones de presión son máximas; el sombreado azul indica que la densidad y presión del gas tienen sus máximos y mínimos en los nodos de desplazamiento (rotulados con N).



16.13 Diagrama para ilustrar las ondas longitudinales estacionarias. Las líneas rectas verticales marcan los nodos de desplazamiento y los antinodos de presión.



16.14 En una onda longitudinal estacionaria, un nodo de desplazamiento N es un antinodo de presión (un punto en el que la fluctuación de la presión es máxima) y un antinodo de desplazamiento A es un nodo de presión (un punto en el que la presión no fluctúa).

Cuando hay reflexión en un extremo *cerrado* de un tubo (con una barrera o tapón rígido), el desplazamiento de las partículas en ese extremo siempre debe ser cero, como en el extremo fijo de una cuerda. Así, el extremo cerrado del tubo es un nodo de desplazamiento y un antinodo de presión; las partículas no se mueven, pero las variaciones de presión son máximas. Un extremo *abierto* de un tubo es un nodo de presión porque está abierto a la atmósfera, donde la presión es constante. Por ello, tal extremo siempre es un *antinodo* de desplazamiento, análogo al extremo libre de una cuerda; las partículas oscilan con amplitud máxima, pero la presión no varía. (Estrictamente, el nodo de presión se da un poco más allá del extremo abierto de un tubo pero, si el diámetro del tubo es pequeño en comparación con la longitud de onda, como en casi todos los instrumentos musicales, podemos hacer caso omiso de ese efecto.) Así, las ondas longitudinales en una columna de fluido se reflejan en los extremos cerrados y abiertos de un tubo igual que las ondas transversales en una cuerda se reflejan en los extremos fijo y libre, respectivamente.

Ejemplo conceptual 16.12

El sonido del silencio

Un altavoz direccional dirige una onda sonora de longitud de onda λ a una pared (Fig. 16.15). ¿A qué distancias de la pared podríamos pararnos y no escuchar nada?

SOLUCIÓN

El oído detecta variaciones de *presión* en el aire, las cuales hacen que el tímpano se mueva ligeramente de un lado a otro y genere una

señal eléctrica que se envía al cerebro. (Si alguna vez ha tenido problemas para aliviar la presión en los oídos en un paseo a las montañas o en un vuelo, ya sabe lo sensibles que son a los cambios de presión.) Por tanto, no escucharemos ningún sonido si los oídos están en un nodo de presión, que es un antinodo de desplazamiento. La pared es un nodo de desplazamiento; la distancia de un nodo a un antinodo adyacente es $\lambda/4$, y entre un antinodo y el siguiente, $\lambda/2$ (Fig. 16.15). Por tanto, las distancias d de la pared en las que no se escuchará sonido son

$$d = \lambda/4$$

(primer antinodo de desplazamiento y nodo de presión)

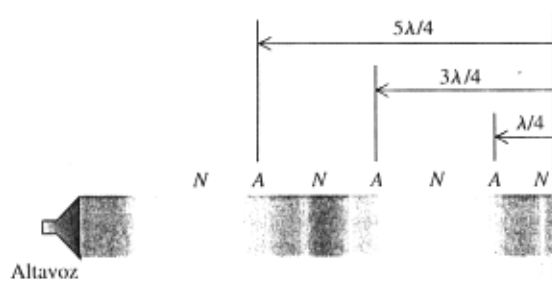
$$d = \lambda/4 + \lambda/2 = 3\lambda/4$$

(segundo antinodo de desplazamiento y nodo de presión)

$$d = 3\lambda/4 + \lambda/2 = 5\lambda/4$$

(tercer antinodo de desplazamiento y nodo de presión)

etcétera. Si el altavoz no es altamente direccional, este efecto será casi imperceptible a causa de las múltiples reflexiones de las ondas sonoras del piso, el techo y otros puntos de las paredes.



16.15 Si dirigimos una onda sonora a una pared, interfiere con la onda reflejada y crea una onda estacionaria. Los *N* y *A* son nodos y antinodos de *desplazamiento*.

Tubos de órgano e instrumentos de aliento

La aplicación más importante de las ondas sonoras estacionarias es la producción de tonos musicales con instrumentos de aliento. Los tubos de órgano son uno de los ejemplos más sencillos (Fig. 16.16). Un fuelle alimenta aire a una presión manométrica del orden de 10^3 Pa (10^{-2} atm) al extremo inferior del tubo (Fig. 16.17). Una corriente de aire sale por la abertura angosta en el borde de la superficie ho-

horizontal y se dirige hacia el borde superior de la abertura, llamada *boca* del tubo. La columna de aire en el tubo comienza a vibrar, y hay una serie de modos normales posibles, igual que en una cuerda estirada. La boca siempre actúa como extremo abierto, así que es un nodo de presión y un antinodo de desplazamiento. El otro extremo del tubo (arriba en la Fig. 16.17) puede estar abierto o cerrado.

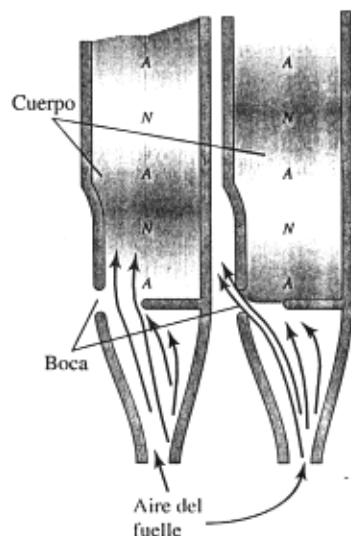
En la figura 16.18, ambos extremos del tubo están abiertos, así que son nodos de presión y antinodos de desplazamiento. Un tubo de órgano abierto en ambos extremos se llama *tubo abierto*. La frecuencia fundamental f_1 corresponde a un patrón de onda estacionaria con un antinodo de desplazamiento en cada extremo y un nodo de desplazamiento en medio (Fig. 16.18a). La distancia entre antinodos adyacentes siempre es media longitud de onda que, en este caso, es igual a la longitud L del tubo; $\lambda/2 = L$. La frecuencia correspondiente, obtenida de la relación $f = v/\lambda$, es

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (\text{tubo abierto}) \quad (16.16)$$

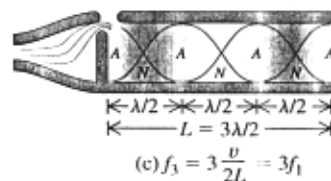
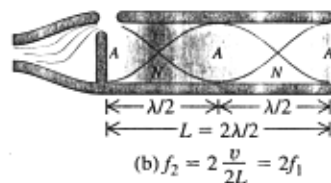
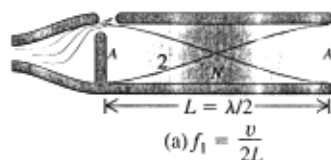
Las figuras 16.18b y 16.18c muestran el segundo y tercer armónicos (primer y segundo sobretonos); sus patrones de vibración tienen dos y tres nodos de desplazamiento, respectivamente. Para éstos, media longitud de onda es igual a $L/2$ y $L/3$, respectivamente, y las frecuencias son dos y tres veces la fundamental, respectivamente. Es decir, $f_2 = 2f_1$ y $f_3 = 3f_1$. Para *todo* modo normal de un tubo



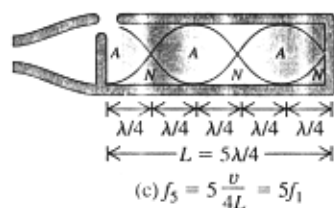
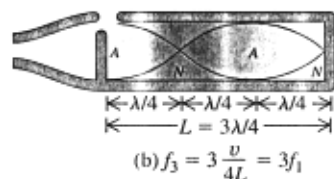
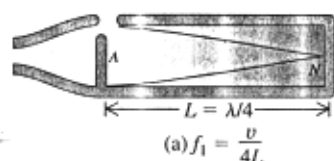
16.16 Tubos de órgano de distinto tamaño producen tonos de distinta frecuencia.



16.17 Cortes transversales de un tubo de órgano en dos instantes separados medio periodo. Las vibraciones del flujo turbulento de aire crean ondas estacionarias en el tubo. Los N y A son nodos y antinodos de *desplazamiento*; como indica el sombreado azul, éstos son puntos de variación máxima de presión y cero variación de presión, respectivamente.



16.18 Corte transversal de un tubo abierto en el que se muestran los primeros tres modos normales. El sombreado indica las variaciones de presión. Las curvas rojas indican el desplazamiento a lo largo del eje del tubo en dos instantes separados por medio periodo. Los N y A son los nodos y antinodos de *desplazamiento*; intercámbielos para ver los nodos y antinodos de *presión*.



16.19 Corte transversal de un tubo cerrado que muestra los primeros tres modos normales así como los nodos y antinodos de desplazamiento. Sólo son posibles armónicos impares.

abierto, la longitud L debe ser un número entero de medias longitudes de onda, y las longitudes de onda posibles λ_n están dadas por

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{o} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{tubo abierto}) \quad (16.17)$$

Las frecuencias correspondientes f_n están dadas por $f_n = v/\lambda_n$, así que todas las frecuencias de modo normal para un tubo abierto por ambos extremos están dadas por

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{tubo abierto}) \quad (16.18)$$

El valor $n = 1$ corresponde a la frecuencia fundamental, $n = 2$ al segundo armónico (primer sobretono), etc. O bien, podemos decir

$$f_n = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{tubo abierto}) \quad (16.19)$$

con f_1 dada por la ecuación (16.16).

La figura 16.19 muestra un tubo abierto en el extremo izquierdo pero cerrado en el derecho; se llama *tubo cerrado*. El extremo izquierdo (abierto) es un antinodo de desplazamiento (nodo de presión), pero el derecho (cerrado) es un nodo de desplazamiento (antinodo de presión). La distancia entre un nodo y el antinodo adyacente siempre es $\lambda/4$. La figura 16.19a muestra el modo de más baja frecuencia; la longitud L del tubo es un cuarto de longitud de onda ($L = \lambda/4$). La frecuencia fundamental es $f_1 = v/\lambda_1$, o sea

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (\text{tubo cerrado}) \quad (16.20)$$

Ésta es la mitad de la frecuencia fundamental de un tubo *abierto* de la misma longitud. En el lenguaje musical, el *tono* de un tubo cerrado es una octava más bajo (un factor de 2 en la frecuencia) que el de un tubo abierto de la misma longitud. La figura 16.19b muestra el siguiente modo, para el cual la longitud del tubo es *tres cuartas partes* de una longitud de onda, correspondiente a una frecuencia de $3f_1$. Para la figura 16.19c, $L = 5\lambda/4$ y la frecuencia es $5f_1$. Las posibles longitudes de onda están dadas por

$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad \text{o} \quad \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo cerrado}) \quad (16.21)$$

Las frecuencias de modo normal están dadas por $f_n = v/\lambda_n$, o sea

$$f_n = \frac{nv}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo cerrado}) \quad (16.22)$$

o bien

$$f_n = nf_1 \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{tubo cerrado}) \quad (16.23)$$

donde f_1 está dada por la ecuación (16.20). Vemos que faltan el segundo, cuarto y todos los demás armónicos *pares*. En un tubo cerrado por un extremo, la frecuencia fundamental es $f_1 = v/4L$, y sólo son posibles los armónicos impares de la serie ($3f_1, 5f_1, \dots$).

Una última posibilidad es un tubo cerrado por *ambos* extremos, con nodos de desplazamiento y antinodos de presión en esos extremos. Esto no sería muy útil como instrumento musical porque las vibraciones no podrían salir del tubo.

**Ejemplo
16.13****Historia de dos tubos**

En un día en que la rapidez del sonido es de 345 m/s, la frecuencia fundamental de un tubo de órgano cerrado es 220 Hz. a) ¿Qué longitud tiene el tubo? b) El segundo *sobretono* de este tubo tiene la misma longitud de onda que el tercer *armónico* de un tubo abierto. ¿Qué longitud tiene el tubo abierto?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Puesto que se trata de un tubo cerrado (abierto en un extremo y cerrado en el otro), las frecuencias de modo normal están dadas por la ecuación (16.22). Usaremos esa ecuación para determinar la longitud L a partir de la frecuencia en la parte (a). En la parte (b), deberemos efectuar una comparación con un tubo abierto, cuyas frecuencias están dadas por la ecuación (16.18).

EJECUTAR: a) Para un tubo cerrado, $f_1 = v/4L$, así que la longitud del tubo cerrado es

$$L_{\text{cerrado}} = \frac{v}{4f_1} = \frac{345 \text{ m/s}}{4(220 \text{ s}^{-1})} = 0.392 \text{ m}$$

b) La frecuencia del primer sobretono de un tubo cerrado es $f_3 = 3f_1$, y la del segundo, $f_5 = 5f_1$:

$$f_5 = 5f_1 = 5(220 \text{ Hz}) = 1100 \text{ Hz}$$

Si las longitudes de onda son iguales, las frecuencias son iguales y la frecuencia del tercer armónico del tubo abierto también es 1100 Hz. Este armónico está en $3f_1 = 3(v/2L)$. Si esto es igual a 1100 Hz, entonces

$$1100 \text{ Hz} = 3 \left(\frac{345 \text{ m/s}}{2L_{\text{abierto}}} \right) \quad \text{y} \quad L_{\text{abierto}} = 0.470 \text{ m}$$

EVALUAR: El tubo cerrado tiene una longitud de 0.392 m y una frecuencia fundamental de 220 Hz; el abierto es más largo, de 0.470 m, pero tiene una frecuencia fundamental más alta de $(1100 \text{ Hz})/3 = 367 \text{ Hz}$. Si esto parece una contradicción, compare otra vez las figuras 16.18a y 16.19a.

En un tubo de órgano en uso real, siempre están presentes simultáneamente varios modos; el movimiento del aire es una superposición de estos modos. Esta situación es análoga a una cuerda golpeada o punteada, como en la figura 15.25. Al igual que en una cuerda vibrante, una onda estacionaria compleja en el tubo produce una onda sonora viajera en el aire circundante con un contenido armónico similar al de la onda estacionaria. Un tubo muy angosto produce una onda sonora rica en armónicos superiores, que oímos como un tono delgado “tipo cuerda”; un tubo más grueso produce principalmente el modo fundamental, que suena más suave, “más como flauta”. El contenido armónico también depende de la forma de la boca del tubo.

Hemos hablado de tubos de órgano, pero este análisis también es válido para otros instrumentos de aliento. La flauta y la flauta dulce son directamente análogas. La diferencia más importante es que esos instrumentos tienen agujeros a lo largo del tubo. Al taparse y destaparse esos agujeros con los dedos, se modifica la longitud efectiva L de la columna de aire y por tanto el tono. Un tubo de órgano, en cambio, sólo puede tocar una nota. Las flautas se comportan como tubos *abiertos*, mientras que el clarinete actúa como tubo *tapado* (cerrado en el extremo de la lengüeta, abierto en el pabellón).

Las ecuaciones (16.18) y 16.22) ponen de manifiesto que las frecuencias de cualquier instrumento de aliento son proporcionales a la rapidez del sonido v en la columna de aire dentro del instrumento. Como indica la ecuación (16.10), v depende de la temperatura; aumenta al aumentar la temperatura. Por tanto, el tono de los instrumentos de aliento aumenta con la temperatura. Un órgano que tiene algunos tubos a una temperatura y otros a una temperatura distinta sonará desafinado.

Evalúe su comprensión

Si se conecta una manguera a un extremo de un tubo metálico y se introduce por ella aire comprimido, el tubo producirá un tono musical. Si se inyecta en el tubo helio comprimido a la misma presión y temperatura, el tubo producirá un tono más alto. ¿Por qué?

16.8 | El efecto Doppler

Quizá el lector habrá notado que, cuando un coche se acerca tocando el claxon, el tono parece bajar al pasar el coche. Este fenómeno, descrito por primera vez por el científico austriaco del siglo XIX Christian Doppler, se llama **efecto Doppler**. Cuando una fuente de sonido y un receptor están en movimiento relativo, la frecuencia del sonido oído por el receptor no es el mismo que la frecuencia fuente. Se presenta un efecto similar con las ondas de luz y radio; volveremos a esto más adelante.

A fin de analizar el efecto Doppler para el sonido, deduciremos una relación entre el cambio de frecuencia y las velocidades de la fuente y el receptor relativas al medio (usualmente aire) por el que las ondas sonoras se propagan. Por sencillez, sólo consideraremos el caso especial en que las velocidades de la fuente y el receptor están a lo largo de la línea que los une. Sean v_F y v_R las componentes de velocidad en esta línea de la fuente y el receptor, respectivamente, relativas al medio. Escogemos como dirección positiva la que va del receptor R a la fuente F. La rapidez del sonido relativa al medio, v , siempre se considera positiva.

Receptor en movimiento

Imaginemos primero un receptor R que se mueve con velocidad v_R hacia una fuente estacionaria F (Fig. 16.27). La fuente emite una onda sonora con frecuencia f_F y longitud de onda $\lambda = v/f_F$. La figura muestra varias crestas de onda, separadas por distancias iguales λ . Las crestas que se acercan al receptor en movimiento tienen una rapidez de propagación *relativa al receptor* de $(v + v_R)$, así que la frecuencia f_R con que llegan a la posición del receptor (o sea, la frecuencia que el receptor oye) es

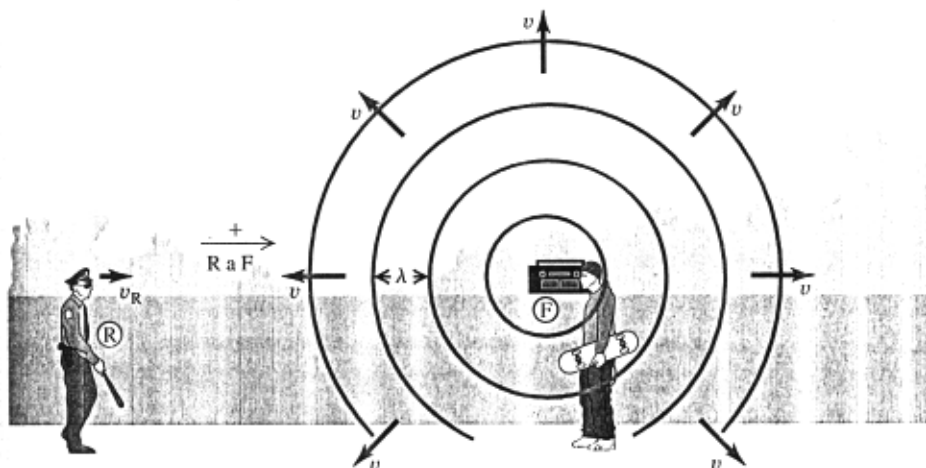
$$f_R = \frac{v + v_R}{\lambda} = \frac{v + v_R}{v/f_F} \quad (16.25)$$

o bien

$$f_R = \left(\frac{v + v_R}{v} \right) f_F = \left(1 + \frac{v_R}{v} \right) f_F \quad (16.26)$$

(receptor móvil, fuente estacionaria)

Así, un receptor que se mueve hacia una fuente ($v_R > 0$), como en la figura 16.27, oye una frecuencia más alta (tono más agudo) que un receptor estacionario. Un receptor que se aleja de la fuente ($v_R < 0$) oye una frecuencia más baja (tono más grave).



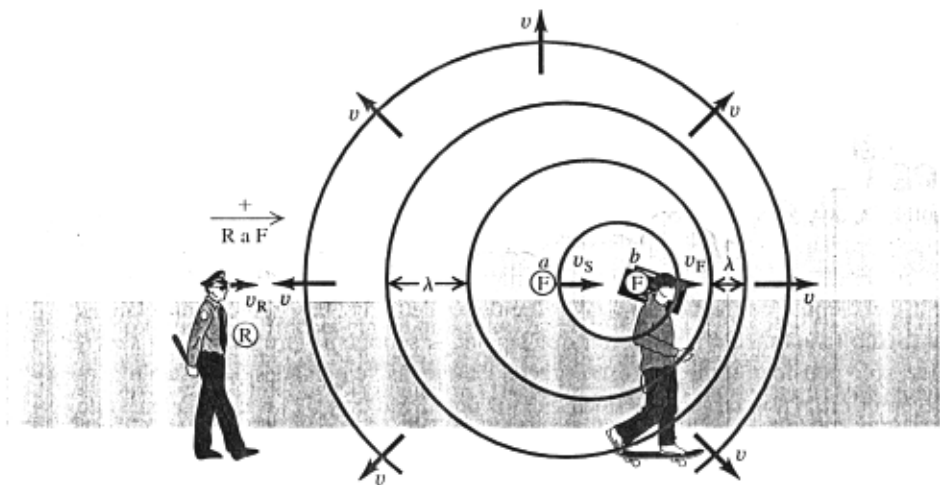
16.27 Un receptor que se mueve hacia una fuente estacionaria oye una frecuencia más alta que la frecuencia fuente porque la rapidez relativa del receptor y la onda es mayor que la rapidez de la onda v .

Activ
ONLINE
Physics

10.8 Efecto Doppler: introducción conceptual

10.9 Efecto Doppler: problemas

16.28 Las crestas de ondas emitidas por una fuente móvil se juntan al frente de la fuente (a la derecha en este caso) y se separan detrás (a la izquierda aquí).



Fuente en movimiento y receptor en movimiento

Suponga ahora que la fuente también se mueve, con velocidad v_F (Fig. 16.28). La rapidez de la onda relativa al medio (aire) sigue siendo v ; está determinada por las propiedades del medio y no cambia por el movimiento de la fuente. Empero, la longitud de onda ya no es igual a v/f_F ; veamos por qué. El tiempo que tarda en emitirse un ciclo de la onda es el periodo $T = 1/f_F$. Durante este tiempo, la onda viaja una distancia $vT = v/f_F$ y la fuente se mueve una distancia $v_F T = v_F/f_F$. La longitud de onda es la distancia entre crestas sucesivas, y depende del desplazamiento relativo de la fuente y la onda. Como muestra la figura 16.28, éste es diferente adelante y atrás de la fuente. En la región a la derecha de la fuente en la figura 16.28 (es decir, adelante de la fuente), la longitud de onda es

$$\lambda = \frac{v}{f_F} - \frac{v_F}{f_F} = \frac{v - v_F}{f_F} \quad (16.27)$$

(longitud de onda adelante de una fuente móvil)

En la región a la izquierda de la fuente (o sea, atrás de ella), es

$$\lambda = \frac{v + v_F}{f_F} \quad (\text{longitud de onda atrás de una fuente móvil}) \quad (16.28)$$

Las ondas adelante y atrás de la fuente se comprimen y estiran, respectivamente, por el movimiento de la fuente (Fig. 16.29).

Para obtener la frecuencia que el receptor detrás de la fuente oye, sustituimos la ecuación (16.28) en la primera forma de la ecuación (16.25):

$$f_R = \frac{v + v_R}{\lambda} = \frac{v + v_R}{(v + v_F)/f_F} \quad (16.29)$$

(efecto Doppler, fuente móvil y receptor móvil)



16.29 El efecto Doppler explica por qué la sirena de un carro de bomberos o de una ambulancia tiene un tono alto ($f_R > f_F$) cuando se acerca ($v_F < 0$) y un tono bajo ($f_R < f_F$) cuando se aleja ($v_F > 0$).

Esto expresa la frecuencia f_R oída por el receptor en términos de la frecuencia f_F de la fuente.

La ecuación (16.29) incluye todas las posibilidades de movimiento de la fuente y el receptor (relativas al medio) a lo largo de la línea que los une. Si el receptor está en reposo en el medio, $v_R = 0$. Si tanto la fuente como el receptor están en reposo o tienen la misma velocidad relativa al medio, entonces $v_R = v_F$ y $f_R = f_F$. Siempre que la dirección de la velocidad de la fuente o del receptor es opuesta a la dirección del receptor a la fuente (que definimos como positiva), la velocidad correspondiente que debemos usar en la ecuación (16.29) es negativa.

Estrategia para resolver problemas

Efecto Doppler

IDENTIFICAR los conceptos pertinentes: El efecto Doppler se presenta siempre que una fuente de ondas, el detector de las ondas (receptor) o ambos están en movimiento.

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. Establezca un sistema de coordenadas. Defina la dirección positiva como la que va del receptor a la fuente, y asegúrese de conocer los signos de todas las velocidades pertinentes. Una velocidad en la dirección del receptor a la fuente es positiva; una en la dirección opuesta es negativa. Todas las velocidades deben medirse relativas al aire en el que viaja el sonido.
2. Use una notación consistente para identificar las cantidades: subíndice F para la fuente, R para el receptor.
3. Determine cuáles son las incógnitas.

EJECUTAR la solución:

1. Use la ecuación (16.29) para relacionar las frecuencias en la fuente y en el receptor, la rapidez del sonido y las velocidades de la fuente y el receptor. Si la fuente está en movimiento, se puede obtener la longitud de onda medida por el escucha empleando la ecuación (16.27) o la (16.28).
2. Si una onda se refleja de una superficie, sea estacionaria o móvil, el análisis puede efectuarse en dos pasos. En el primero, la superficie hace las veces de receptor; la frecuencia con que las crestas de onda llegan a la superficie es f_R . Luego considere a la superficie como nueva fuente, que emite ondas con esta misma frecuencia f_R . Por último, determine qué frecuencia oye un receptor que detecta esta nueva onda.

EVALUAR la respuesta: Vea si su resultado final tiene sentido. Si la fuente y el receptor se están acercando, $f_R > f_F$; si se están alejando, $f_R < f_F$. Si la fuente y el receptor no tienen movimiento relativo, $f_R = f_F$.

Ejemplo 16.16

Efecto Doppler I: Longitudes de onda

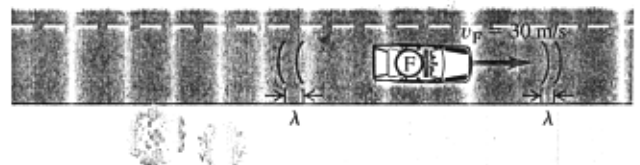
Una sirena policiaca emite una onda senoidal con frecuencia $f_F = 300$ Hz. La rapidez del sonido es de 340 m/s. a) Calcule la longitud de onda del sonido si la sirena está en reposo en el aire. b) Si la sirena se mueve a 30 m/s (108 km/h), calcule λ para las ondas adelante y atrás de la fuente.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El efecto Doppler no interviene en la parte (a), ya que ni la fuente ni el receptor están en movimiento. En la parte (b), la fuente está en movimiento, así que deberemos considerar el efecto Doppler.

PLANTEAR: Usamos la relación $v = \lambda f$ para determinar la longitud de onda cuando la sirena está en reposo. Cuando está en movimien-

to, obtenemos la longitud de onda a cada lado de la sirena usando las ecuaciones (16.27) y (16.28).



16.30 Longitudes de onda delante y detrás de la sirena cuando ésta se mueve por el aire a 30 m/s.

EJECUTAR: a) Cuando la fuente está en reposo,

$$\lambda = \frac{v}{f_F} = \frac{340 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1.13 \text{ m}$$

b) La situación se muestra en la figura 16.30. Por la ecuación (16.27), delante de la sirena,

$$\lambda = \frac{v - v_F}{f_F} = \frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1.03 \text{ m}$$

Por la ecuación (16.28), detrás de la sirena,

$$\lambda = \frac{v + v_F}{f_F} = \frac{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1.23 \text{ m}$$

EVALUAR: La longitud de onda es menor delante de la sirena y mayor detrás de ella, como debe ser.

Ejemplo 16.17

Efecto Doppler II: Frecuencias

Si un receptor R está en reposo y la sirena del ejemplo 16.16 se aleja de R a 30 m/s (Fig. 16.31), ¿qué frecuencia oye el receptor?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: La incógnita es la frecuencia del receptor f_R . Conocemos $f_F = 300 \text{ Hz}$ por el ejemplo 16.16, y tenemos $v_R = 0$ y $v_F = 30 \text{ m/s}$. (La velocidad de la fuente v_F es positiva porque la sirena se mueve en la dirección que va del receptor a la fuente.)

EJECUTAR: Por la ecuación (16.29),

$$f_R = \frac{v}{v + v_F} f_F = \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 276 \text{ Hz}$$

EVALUAR: La fuente y el receptor se están separando, así que la frecuencia f_R oída por el receptor es menor que la emitida por la fuente (f_F).

He aquí otro enfoque que nos puede servir para comprobar nuestro resultado. Por el ejemplo 16.16, la longitud de onda detrás de la fuente (que es donde está parado el receptor de la Fig. 16.31) es 1.23 m, así que

$$f_R = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{1.23 \text{ m}} = 276 \text{ Hz}$$

Aunque la fuente se está moviendo, la velocidad de la onda v relativa al receptor estacionario no cambia.



16.31 El receptor está en reposo, y la sirena se aleja de él a 30 m/s.

Ejemplo 16.18

Efecto Doppler III: Un receptor móvil

Si la sirena está en reposo y el receptor se mueve hacia la izquierda a 30 m/s (Fig. 16.32), ¿qué frecuencia oye?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: La diferencia clave entre este ejemplo y el 16.17 es que la fuente está en reposo (así que $v_F = 0$) y el receptor está en movimiento. La dirección positiva (del receptor a la fuente) sigue siendo de izquierda a derecha, así que $v_R = -30 \text{ m/s}$.

EJECUTAR: Por la ecuación (16.27),

$$f_R = \frac{v + v_R}{v} f_F = \frac{340 \text{ m/s} + (-30 \text{ m/s})}{340 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 274 \text{ Hz}$$

EVALUAR: Otra vez, la frecuencia que el receptor oye es menor que la de la fuente. La *velocidad relativa* de la fuente y el receptor es la misma que en el ejemplo anterior, pero el desplazamiento Doppler es distinto porque las velocidades relativas al *aire* son distintas.



16.32 La sirena está en reposo, y el receptor se aleja de ella a 30 m/s.

**Ejemplo
16.19****Efecto Doppler IV: Fuente en movimiento, receptor en movimiento**

Si la sirena se está alejando del receptor con una rapidez de 45 m/s relativa al aire, y el receptor se mueve hacia la sirena con una rapidez de 15 m/s relativa al aire (Fig. 16.33), ¿qué frecuencia oye el escucha?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Ahora *tanto* el receptor *como* la fuente están en movimiento, con $v_R = 15$ m/s y $v_F = 45$ m/s (ambas positivas porque los vectores apuntan en la dirección del receptor a la fuente).

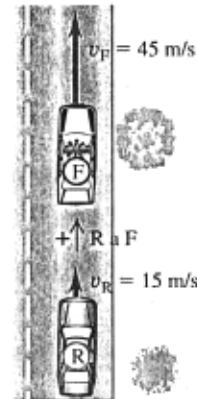
EJECUTAR: Usamos otra vez la ecuación (16.27) para obtener

$$f_R = \frac{v + v_R}{v + v_F} f_F = \frac{340 \text{ m/s} + 15 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 45 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz})$$

$$= 277 \text{ Hz}$$

EVALUAR: La frecuencia que el receptor oye es otra vez menor que la de la fuente, pero el valor es distinto del de los dos ejemplos anteriores, aunque la fuente y el receptor se están alejando mutuamente a 30 m/s en los tres casos. El *signo* del cambio de frecuencia Doppler (es decir, si f_R es menor o mayor que f_F) depende del movi-

miento relativo de la fuente y el receptor; para determinar el *valor* del cambio de frecuencia Doppler, hay que conocer las velocidades de la fuente y el receptor relativas al aire.



16.33 Las velocidades relativas al aire cuando la sirena se aleja del receptor con velocidad relativa de 30 m/s.

**Ejemplo
16.20****Efecto Doppler V: Un efecto Doppler doble**

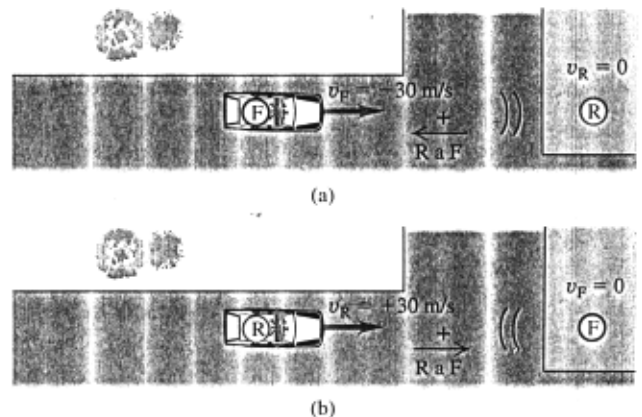
La patrulla con su sirena de 300 Hz se mueve hacia una bodega a 30 m/s, intentando atravesar su puerta. ¿Qué frecuencia escucha el conductor reflejada de la bodega?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En esta situación, hay *dos* cambios Doppler, como se muestra en la figura 16.34. En el primero, la bodega es el "receptor" estacionario. La frecuencia del sonido que llega a la bodega, que llamamos f_B , es mayor que 300 Hz porque la fuente se aproxima. En el segundo, la bodega actúa como fuente de un sonido con frecuencia f_B , y el receptor es el conductor de la patrulla, quien oye una frecuencia mayor que f_B porque se está acercando a la fuente.

PLANTEAR: Para determinar f_B , usamos la ecuación (16.27) cambiando f_R por f_B . En esta parte del problema, $v_R = v_B = 0$ (la bodega está en reposo) y $v_F = -30$ m/s (la sirena se mueve en la dirección negativa de la fuente al receptor).

Para determinar la frecuencia que el conductor oye (la incógnita), usamos otra vez la ecuación (16.27), pero ahora cambiando f_F por f_B . En esta segunda parte del problema, $v_F = 0$ porque la bodega estacionaria es la fuente y la velocidad del receptor (el conductor) es $v_R = +30$ m/s (positiva porque va del receptor a la fuente).



16.34 (a) La patrulla con sirena (fuente) se mueve a 30 m/s hacia la bodega estacionaria (receptor). (b) La onda sonora se refleja de la bodega estacionaria (fuente) hacia la patrulla (receptor).

be aumentarse la amplitud de presión de una onda sonora para aumentar la intensidad en un factor de 16? Explique.

P16.11 Defienda esta afirmación: "Sumar cierto número de decibels al nivel de intensidad del sonido corresponde a *multiplicar* la intensidad por cierto factor".

P16.12 Una pequeña fracción de la energía de una onda sonora es absorbida por el aire por el que pasa. ¿Cómo modifica esto la relación del inverso cuadrado entre intensidad y distancia de la fuente? Explique.

P16.13 Un organista de una catedral toca un acorde fuerte y luego suelta las teclas. El sonido persiste unos segundos y luego se desvanece. ¿Por qué persiste? ¿Qué pasa con la energía del sonido cuando éste se desvanece?

P16.14 Dos diapasones tienen frecuencias idénticas, pero uno está estacionario y el otro está montado en el borde de una plataforma giratoria. ¿Qué oye un escucha? Explique.

P16.15 Una iglesia grande tiene parte del órgano al frente y parte al fondo. Una persona que camina rápidamente por el pasillo mientras ambos segmentos están tocando dice que los segmentos suenan desafinados. ¿Por qué?

P16.16 Una fuente de sonido y un receptor están en reposo en tierra, pero un viento fuerte sopla de la fuente al receptor. ¿Hay un efecto Doppler? ¿Por qué sí o por qué no?

P16.17 ¿Puede imaginar circunstancias en las que se observaría un efecto Doppler en ondas superficiales en agua? ¿Y en ondas elásticas que se propagan en un cuerpo de agua a gran profundidad? Si así es, describa las circunstancias y explique su razonamiento. Si no, explique por qué no.

***P16.18** ¿Un avión sólo produce un trueno sónico en el instante en que su rapidez excede de Mach 1? Explique su razonamiento.

***P16.19** Si va en un avión supersónico, ¿qué oye? En particular, ¿escucha un trueno sónico continuo? ¿Por qué sí o por qué no?

***P16.20** La rapidez del sonido no es la misma a diferentes altitudes; disminuye al aumentar la altitud.

¿Cómo afecta esto el cálculo del ejemplo 16.21 (sección 16.9)?

¿Sigue siendo un cono la forma de la onda de choque? Explique su razonamiento.

***P16.21** Un jet vuela a una altitud constante con rapidez constante v_p mayor que la del sonido. Describa qué oyen los receptores en los puntos A, B y C en el instante que muestra la figura 16.39, cuando la onda de choque recién llegó a B. Explique su razonamiento.

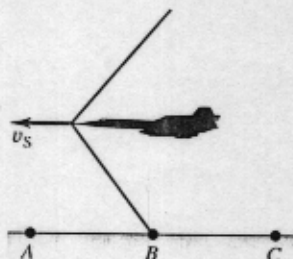


Figura 16.39 Pregunta P16.21.

Ejercicios

A menos que se indique otra cosa, suponga que la rapidez del sonido en el aire es $v = 344$ m/s.

Sección 16.1 Ondas sonoras

16.1 El ejemplo 16.1 (sección 16.1) mostró que, para ondas sonoras en aire con $f = 1000$ Hz, una amplitud de desplazamiento de 1.2

$\times 10^{-8}$ m produce una amplitud de presión de 3.0×10^{-2} Pa. a) ¿Qué longitud de onda tienen esas ondas? b) Para ondas de 1000 Hz en aire, ¿qué amplitud de desplazamiento se requeriría para que la amplitud de presión esté en el umbral del dolor (30 Pa)? c) ¿Qué longitud de onda y frecuencia deben tener ondas con amplitud de desplazamiento de 1.2×10^{-8} m para producir una amplitud de presión de 1.5×10^{-3} Pa?

16.2 El ejemplo 16.1 (sección 16.1) mostró que, para ondas sonoras en aire con frecuencia de 1000 Hz, una amplitud de desplazamiento de 1.2×10^{-8} m produce una amplitud de presión de 3.0×10^{-2} Pa. Agua a 20°C tiene un módulo de volumen de 2.2×10^9 Pa, y la rapidez del sonido en ella es de 1480 m/s. Para ondas sonoras de 1000 Hz en agua a 20°C , ¿qué amplitud de desplazamiento se produce si la amplitud de presión es de 3.0×10^{-2} Pa? Explique por qué su respuesta es mucho menor que 1.2×10^{-8} Pa.

16.3 Considere una onda sonora en aire con amplitud de desplazamiento de 0.0200 mm. Calcule la amplitud de presión para frecuencias de a) 150 Hz; b) 1500 Hz; c) 15,000 Hz. En cada caso, compare el resultado con el umbral del dolor, que es de 30 Pa.

16.4 Calcule la amplitud de presión de la onda que viaja por el aire a una altura de 11,000 m, descrita en el ejemplo 16.8 (sección 16.3). Compare su respuesta con la amplitud de presión en el nivel del mar de la onda si tiene la misma amplitud de desplazamiento (ejemplo 16.1 en la sección 16.2). ¿Qué le dice esto acerca de la variación de la amplitud de presión con la altura si la frecuencia y la amplitud de desplazamiento de la onda están fijas?

Sección 16.2 Rapidez de las ondas sonoras

16.5 a) En un líquido con densidad de 1300 kg/m³, se determina que ondas longitudinales con frecuencia de 400 Hz tienen una longitud de onda de 8.00 m. Calcule el módulo de volumen del líquido. b) Una barra metálica de 1.50 m de longitud tiene una densidad de 6400 kg/m³. Las ondas sonoras longitudinales tardan 3.90×10^{-4} s en llegar de un extremo a otro. Calcule el módulo de Young del metal.

16.6 Un fuerte terremoto cuyo epicentro está en Loma Prieta, California, cerca de San Francisco, se produjo el 17 de octubre de 1989 a las 5:04 p.m. hora local (en UTC, tiempo universal coordinado, 0 h 4 m 15 s el 18 de octubre de 1989). Las ondas sísmicas primarias (ondas P) son ondas longitudinales que viajan por la corteza terrestre. Estas ondas se detectaron en Caracas, Venezuela, a las 0 h 13 m 54 s UTC; en Kevo, Finlandia, a las 0 h 15 m 35 s UTC; y en Viena, Austria, a las 0 h 17 m 02 s UTC. Las distancias que las ondas P viajaron desde Loma Prieta fueron de 6280 km a Caracas, 8690 km a Kevo y 9650 km a Viena. a) Use los tiempos de llegada para calcular la rapidez media de las ondas P que viajaron a estas tres ciudades. ¿Cómo explica las diferencias entre estos valores? b) La densidad media de la corteza terrestre es de cerca de 3.3 g/cm³. Use este valor para calcular el módulo de volumen de la corteza a lo largo del camino seguido por las ondas P a cada una de las tres ciudades. Compare sus respuestas con los módulos de volumen de la tabla 11.1.

16.7 Un buzo bajo la superficie de un lago escucha el sonido de la sirena de un bote en la superficie directamente arriba de él, al mismo tiempo que un amigo parado en tierra firme a 22.0 m del bote (Fig. 16.40). La sirena está 1.20 m sobre la superficie del agua. ¿A qué distancia de la sirena (la marcada con "?" en la figura 16.40)

está el buzo? Tanto el aire como el agua están a 20°C .

16.8 A 27.0°C , ¿qué rapidez tienen las ondas longitudinales en a) hidrógeno (masa molar 2.02 g/mol)? b) helio (masa molar 4.00 g/mol)? c) argón (masa molar 39.9 g/mol)? Tome los valores de γ de la tabla 19.1. d) Compare sus respuestas para las partes (a), (b) y (c) con la rapidez en aire a la misma temperatura.

16.9 Un jet comercial viaja a gran altitud con una rapidez de 850 km/h , igual a 0.85 veces la rapidez del sonido a esa altura (o sea, a "Mach 0.85 "). a) ¿Qué temperatura tiene el aire a esa altitud? b) Con estos datos, ¿puede determinar la presión del aire a esa altitud? Explique.

16.10 Se determinó que la rapidez del sonido en aire a 20°C era de 344 m/s . ¿Cuánto cambia la rapidez cuando la temperatura del aire cambia 1.0°C ?

16.11 Se golpea un extremo de una varilla de latón de 80.0 m . Una persona en el otro extremo escucha dos sonidos causados por dos ondas longitudinales, una que viaja por la varilla y otra que viaja por el aire. Calcule el intervalo de tiempo entre los sonidos. La rapidez del sonido en el aire es de 344 m/s ; la información pertinente para el latón se halla en la tabla 11.1 y en la tabla 14.1.

16.12 ¿Qué diferencia hay entre la rapidez de ondas longitudinales en aire a 27.0°C y a -13.0°C ?

16.13 ¿Qué esfuerzo (F/A) debe haber en un alambre estirado de un material cuyo módulo de Young es Y , para que la rapidez de ondas longitudinales sea igual a 30 veces la rapidez de ondas transversales?

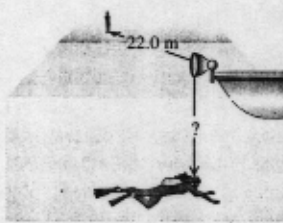


Figura 16.40 Ejercicio 16.7

Sección 16.3 Intensidad de sonido

16.14 Una onda longitudinal con frecuencia de 220 Hz viaja por una varilla de cobre de 8.00 mm de radio. La potencia media de la onda es de $6.50\text{ }\mu\text{W}$. (Obtenga de las tablas 11.11 y 14.11 los datos necesarios del cobre.) a) Calcule la longitud de la onda. b) Calcule la amplitud A de la onda. c) Determine la velocidad longitudinal máxima de una partícula en la varilla.

16.15 Ondas longitudinales en diferentes fluidos. a) Una onda longitudinal que se propaga en un tubo lleno de agua tiene intensidad de $3.00 \times 10^{-6}\text{ W/m}^2$ y frecuencia de 3400 Hz . Calcule la amplitud A y la longitud de onda λ para esa onda. La densidad del agua es de 1000 kg/m^3 y su módulo de volumen es de $2.18 \times 10^9\text{ Pa}$. b) Si el tubo está lleno con aire a una presión de $1.00 \times 10^5\text{ Pa}$, con densidad de 1.20 kg/m^3 , ¿qué amplitud A y longitud de onda λ tendrá una onda longitudinal con la misma intensidad y frecuencia que en la parte (a)? c) En qué fluido es mayor la amplitud, ¿en agua o en aire? Calcule la razón entre ambas amplitudes. ¿Por qué no es 1 dicha razón?

16.16 Deduzca la ecuación (16.14) de las ecuaciones que la preceden.

16.17 Una onda sonora en aire a 20°C tiene frecuencia de 150 Hz y amplitud de desplazamiento de $5.00 \times 10^{-3}\text{ mm}$. Para esta onda, calcule a) la amplitud de presión (en Pa); b) la intensidad (en W/m^2); c) el nivel de intensidad del sonido (en dB).

16.18 a) Determine el nivel de intensidad de sonido en un coche cuando la intensidad del sonido es de $0.500\text{ }\mu\text{W/m}^2$. b) Calcule el nivel de intensidad de sonido en el aire cerca de un martillo neumá-

tico cuando la amplitud de presión del sonido es de 0.150 Pa y la temperatura es de 20.0°C .

16.19 El sonido más tenue que una persona con oído normal puede detectar a una frecuencia de 400 Hz tiene una amplitud de presión aproximada de $6.0 \times 10^{-5}\text{ Pa}$. Calcule la intensidad correspondiente y el nivel de intensidad del sonido a 20°C .

16.20 La intensidad debida a varias fuentes de sonido independientes es la suma de las intensidades individuales. a) Cuando cuatro cuatrillizos lloran simultáneamente, ¿cuántos decibeles es mayor el nivel de intensidad de sonido que cuando llora uno solo? b) Para aumentar el nivel de intensidad de sonido otra vez en el mismo número de decibeles que en (a), ¿cuántos bebés llorones más se necesitan?

16.21 La boca de un bebé está a 30 cm de la oreja del padre y a 1.50 m de la de la madre. ¿Qué diferencia hay entre los niveles de intensidad de sonido que escuchan ambos?

16.22 En octubre de 1991, el ayuntamiento de Sacramento adoptó una ley que reduce el nivel permitido de intensidad sonora de los odiados recogedores de hojas, de 95 dB a 70 dB a partir de mayo de 1992. Con la nueva ley, ¿qué relación hay entre la nueva intensidad permitida y la intensidad que se permitía antes?

16.23 a) ¿En qué factor debe aumentarse la intensidad del sonido para aumentar 13.0 dB el nivel de intensidad del sonido? b) Explique por qué no necesita conocer la intensidad original del sonido.

Sección 16.4 Ondas sonoras estacionarias y modos normales

16.24 La frecuencia fundamental de un tubo abierto es de 594 Hz . ¿Cuál es la frecuencia fundamental si se tapa un extremo del tubo?

16.25 Se producen ondas sonoras estacionarias en un tubo de 1.20 m de longitud. Para la fundamental y los dos primeros sobretonos, ¿en qué puntos del tubo (midiendo desde el extremo izquierdo) están los nodos de desplazamiento y los nodos de presión si a) el tubo está abierto por ambos extremos; b) el tubo está cerrado en el extremo izquierdo y abierto en el derecho.

16.26 Calcule la frecuencia fundamental y la de los tres primeros sobretonos de un tubo de 45.0 cm de longitud a) si está abierto en ambos extremos; b) si está cerrado en un extremo. Use $v = 344\text{ m/s}$. c) Determine el número del armónico más alto que podrá oír una persona con oído normal (que puede oír frecuencias de 20 a $20,000\text{ Hz}$) para cada uno de los casos anteriores.

16.27 El tracto vocal humano es un tubo que se extiende unos 17 cm de los labios a los pliegues vocales (también llamados "cuerdas vocales") cerca de la mitad de la garganta. Los pliegues se comportan como la lengüeta de un clarinete, y el tracto vocal, como tubo cerrado. Estime las primeras tres frecuencias de onda estacionaria del tracto vocal. Use $v = 344\text{ m/s}$. (Las respuestas sólo son una estimación, ya que las posiciones de los labios y la lengua afectan el movimiento del aire dentro del tracto.)

16.28 Cierta tubo produce una frecuencia fundamental de 262 Hz en aire. a) Si el tubo se llena con helio a la misma temperatura, ¿qué frecuencia fundamental producirá? (La masa molar del aire es de 28.8 g/mol , y la del helio, de 4.00 g/mol .) b) ¿Su respuesta a la parte (a) depende de si el tubo está abierto o cerrado? ¿Por qué sí o por qué no?

Sección 16.5 Resonancia

16.29 Usted sopla al ras de la boca de un tubo de ensayo vacío y produce la onda estacionaria fundamental de la columna de aire de su interior. La rapidez del sonido en aire es de 344 m/s y el tubo ac-

túa como tubo cerrado. a) Si la longitud de la columna de aire es de 14.0 cm, ¿qué frecuencia tiene esta onda estacionaria? b) Determine la frecuencia de la onda estacionaria fundamental en la columna de aire si el tubo de ensayo se llena hasta la mitad con agua.

16.30 La nota Re (588 Hz) de una trompeta hace que una cuerda de guitarra vibre en su segundo sobretono con amplitud grande. La porción vibrante de la cuerda mide 63.5 cm. Determine la rapidez de ondas transversales en la cuerda.

Sección 16.6 Interferencia de ondas

16.31 Dos altavoces, *A* y *B* (Fig. 16.41), son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales en fase. *B* está 2.00 m a la derecha de *A*. Considere el punto *Q* a lo largo de la extensión de la línea que une a los altavoces, 1.00 m a la derecha de *B*. Ambos altavoces emiten ondas sonoras que viajan directamente del altavoz a *Q*. a) Determine la frecuencia más baja con la que habrá interferencia constructiva en el punto *Q*. b) Determine la frecuencia más baja con la que habrá interferencia destructiva en el punto *Q*.

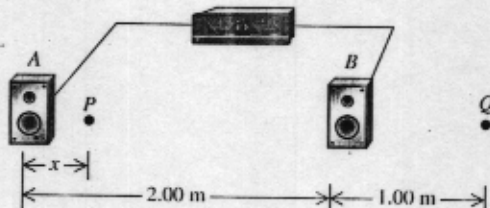


Figura 16.41 Ejercicios 16.31 y 16.32.

16.32 Dos altavoces, *A* y *B* (Fig. 16.41), son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales en fase. *B* está 2.00 m a la derecha de *A*. La frecuencia de las ondas sonoras producidas por los altavoces es de 206 Hz. Considere el punto *P* entre los altavoces a lo largo de la línea que los une, a una distancia *x* a la derecha de *A*. Ambos altavoces emiten ondas sonoras que viajan directamente del altavoz a *P*. a) ¿Con qué valores de *x* habrá interferencia destructiva en *P*? b) ¿Y constructiva? c) Los efectos de interferencia como los de las partes (a) y (b) casi nunca son un factor al escuchar los equipos estéreo caseros. ¿Por qué no?

16.33 Dos altavoces, *A* y *B*, son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales en fase. *B* está 12.0 m a la derecha de *A*. La frecuencia de las ondas emitidas por los altavoces es de 688 Hz. Imagine que está parado entre los altavoces, sobre la línea que los une, y está en un punto de interferencia constructiva. ¿Qué distancia deberá moverse hacia el altavoz *B* para estar en un punto de interferencia destructiva?

16.34 Dos altavoces, *A* y *B*, son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales en fase. La frecuencia de las ondas emitidas por los altavoces es de 172 Hz. Imagine que está a 8.00 m de *A*. ¿Cuánto es lo más cerca que puede estar de *B* y estar en un punto de interferencia destructiva?

16.35 Dos altavoces, *A* y *B*, son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales en fase. La frecuencia de las ondas emitidas por los altavoces es de 860 Hz. El punto *P* está a 12.0 m de *A* y a 13.4 m de *B*. ¿La interferencia en *P* es constructiva o destructiva? Justifique su respuesta.

Sección 16.7 Pulsaciones

16.36 Dos cuerdas de violín idénticas, estiradas con la misma tensión, tienen una frecuencia fundamental de 440.0 Hz. Una de las cuerdas se afina ajustando la tensión. Una vez hecho esto, se escuchan 1.5 pulsaciones por segundo cuando ambas cuerdas se puncan simultáneamente. a) ¿Qué frecuencias fundamentales podría tener la cuerda que se afinó? b) ¿Qué cambio fraccional sufrió la tensión de esa cuerda si i) se aumentó; ii) se redujo?

16.37 Dos ondas sonoras senoidales de 108 Hz y 112 Hz llegan a su oído simultáneamente. Cada onda tiene amplitud de 1.5×10^{-8} m al llegar a su oído. a) Describa con detalle lo que oye. b) ¿Qué amplitud máxima total tiene la onda sonora total? ¿Y mínima?

Sección 16.8 El efecto Doppler

16.38 En el planeta Arrakis, un ornitode macho vuela hacia su compañera a 25.0 m/s mientras canta a una frecuencia de 1200 Hz. La hembra estacionaria oye un tono de 1240 Hz. Calcule la rapidez del sonido en la atmósfera de Arrakis.

16.39 En el ejemplo 16.20 (sección 16.8), suponga que la patrulla se aleja de la bodega a 20 m/s. ¿Qué frecuencia escucha el conductor reflejada de la bodega?

16.40 Dos silbatos de tren, *A* y *B*, tienen una frecuencia de 392 Hz. *A* está estacionario y *B* se mueve a la derecha (alejándose de *A*) a 35.0 m/s. Un receptor está entre los dos trenes y se mueve a la derecha a 15.0 m/s (Fig. 16.42). No sopla el viento. Según el receptor, a) ¿qué frecuencia tiene *A*? b) ¿Y *B*? c) ¿Qué frecuencia de pulsación detecta el receptor?

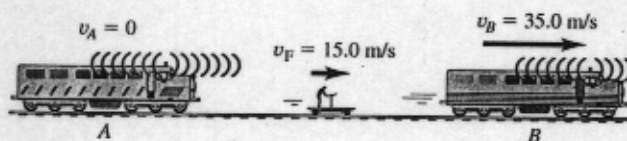


Figura 16.42 Ejercicio 16.40.

16.41 Un tren viaja a 25.0 m/s en aire tranquilo. La frecuencia de la nota emitida por el silbato de la locomotora es de 400 Hz. Calcule la longitud de las ondas sonoras a) frente a la locomotora; b) detrás de la locomotora. Calcule la frecuencia del sonido que oye un receptor estacionario; c) frente a la locomotora; d) detrás de la locomotora.

16.42 Al nadar, un pato patalea una vez cada 1.6 s., produciendo ondas superficiales con ese periodo. El pato avanza con rapidez constante en un estanque en el que la rapidez de las ondas superficiales es de 0.32 m/s, y las crestas de las olas adelante del pato están espaciadas 0.12 m. a) Calcule la rapidez del pato. b) ¿Qué tan separadas están las crestas detrás del pato?

16.43 Fuente móvil y receptor móvil. a) Una fuente sonora que produce ondas de 1.00 kHz se mueve hacia un receptor estacionario a la mitad de la rapidez del sonido. ¿Qué frecuencia oír el receptor? b) Suponga ahora que la fuente está estacionaria y el receptor se mueve hacia ella a la mitad de la rapidez del sonido. ¿Qué frecuencia oye el receptor? Compare su respuesta con la de la parte (a) y explique la diferencia con base en principios de la física.

16.44 Una alarma de auto está emitiendo ondas sonoras con frecuencia de 520 Hz. Usted está en una motocicleta, alejándose del auto. ¿Con qué rapidez se está moviendo si detecta una frecuencia de 490 Hz?

16.45 Un tren viaja a 30.0 m/s en aire tranquilo. La frecuencia de la nota emitida por su silbato es de 262 Hz. ¿Qué frecuencia oye un pasajero de un tren que se mueve en dirección opuesta a 18.0 m/s y a) se acerca al primer tren? b) ¿Se aleja de él?

*Sección 16.9 Ondas de choque

***16.46** Un jet pasa volando a Mach 1.70 y altitud constante de 950 m. a) ¿Qué ángulo α tiene el cono de la onda de choque? b) ¿Cuánto tiempo después de pasar el avión directamente arriba oímos el trueno sónico? Desprecie la variación de la rapidez del sonido con la altitud.

Problemas

16.47 a) Defienda esta afirmación: "En una onda sonora senoidal, la variación de presión dada por la ecuación (16.4) es máxima donde el desplazamiento dado por la ecuación (16.1) es cero". b) Para una onda sonora senoidal dada por la ecuación (16.1) con amplitud $A = 10.0 \mu\text{m}$ y longitud de onda $\lambda = 0.250 \text{ m}$, grafique el desplazamiento y y la fluctuación de presión p en función de x en el instante $t = 0$. Muestre al menos dos longitudes de onda en sus gráficas. c) El desplazamiento y en una onda sonora no senoidal se muestra en

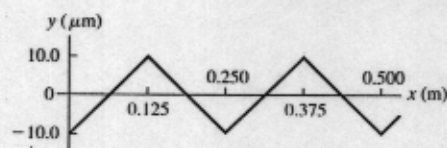


Figura 16.43 Problema 16.47.

la figura 16.43 como una función de x para $t = 0$. Dibuje una gráfica que muestre la fluctuación de presión p en esta onda como función de x en $t = 0$. Esta onda sonora tiene la misma amplitud de $10.0 \mu\text{m}$ que la de la parte (b). ¿Tiene la misma amplitud de presión? ¿Por qué sí o por qué no? d) ¿Se cumple necesariamente la afirmación de la parte (a) si la onda no es senoidal? Explique su razonamiento.

16.48 Muchos aeropuertos tienen reglamentos que limitan la intensidad máxima de sonido que puede producir un avión al despegar. En un aeropuerto de California, el nivel máximo permisible es de 98.5 dB medido por un micrófono al final de la pista de 1740 m de longitud. Cierta avión produce un nivel de intensidad de sonido de 100.0 dB en tierra cuando vuela a una altitud de 100 m. Al despegar, este avión rueda 1200 m sobre la pista antes de elevarse con un ángulo de 15° . ¿Este avión viola el reglamento? Desprecie los efectos debidos a la reflexión de las ondas sonoras en el suelo.

16.49 El sonido de una trompeta radia uniformemente en todas direcciones en aire a 20°C . A una distancia de 5.00 m de la trompeta, el nivel de intensidad de sonido es de 52.0 dB. La frecuencia es de 587 Hz. a) Determine la amplitud de presión a esta distancia. b) Calcule la amplitud de desplazamiento. c) ¿A qué distancia es el nivel de intensidad del sonido 30.0 dB?

16.50 Una onda sonora que entra por una ventana con área A tiene un nivel de intensidad del sonido de β . a) ¿Cuánta potencia acústica entra por la ventana? b) Calcule el valor de la potencia acústica en el caso de una ventana de 1.20 m^2 y un sonido de 55.0 dB.

16.51 Una persona toca una flauta pequeña de 10.75 cm de longitud, abierta en un extremo y cerrada en el otro, cerca de una cuerda tensa que tiene una frecuencia fundamental de 600.0 Hz. Tomando como rapidez del sonido 344.0 m/s, ¿con cuáles armónicos de la flauta resonará la cuerda? En cada caso, ¿cuál armónico de la cuerda está en resonancia?

16.52 Un nuevo instrumento musical. Imagine que diseñó un nuevo instrumento musical de construcción muy sencilla. Su diseño consiste en un tubo metálico de longitud L y diámetro $L/10$. Ha estirado una cuerda con masa por unidad de longitud μ a lo ancho del extremo abierto del tubo. El otro extremo está cerrado. Para producir el efecto musical que le interesa, quiere que la frecuencia de la onda estacionaria de tercer armónico en la cuerda sea igual a la frecuencia fundamental para ondas sonoras en la columna de aire dentro del tubo. La rapidez de las ondas sonoras en esa columna es v_s . a) ¿Qué tensión debe haber en la cuerda para producir el efecto deseado? b) ¿Qué sucede con el sonido producido por el instrumento si la tensión se aumenta al doble del valor calculado en la parte (a)? c) Para la tensión calculada en (a), ¿qué otros armónicos de la cuerda, si acaso, están en resonancia con ondas estacionarias en la columna de aire?

16.53 Un tubo de órgano tiene dos armónicos sucesivos con frecuencias de 1372 y 1764 Hz. a) ¿El tubo está abierto o cerrado? Explique. b) ¿De qué armónicos se trata? c) ¿Qué longitud tiene el tubo?

16.54 Ondas longitudinales estacionarias en un sólido. Es posible producir ondas longitudinales estacionarias en una varilla sólida sosteniéndola en algún punto entre los dedos de una mano y acariciándola con la otra mano. La varilla oscilará con antinodos en ambos extremos. a) ¿Por qué los extremos son antinodos y no nodos? b) Se puede obtener la frecuencia fundamental acariciando la varilla mientras se sostiene por el centro. Explique por qué éste es el único lugar en el que puede sostenerse la varilla para obtener la fundamental. c) Calcule la frecuencia fundamental de una varilla de acero de 1.50 m de longitud (véase la tabla 16.1). d) ¿Cuál es la siguiente frecuencia de onda estacionaria que puede tener esta varilla? ¿Dónde deberá sostenerse la varilla para excitar una onda estacionaria de esta frecuencia?

16.55 a) Determine las primeras tres frecuencias de modo normal para un tubo de longitud L cerrado en ambos extremos. Explique su razonamiento. b) Use los resultados de la parte (a) para estimar las frecuencias de modo normal de un cubículo para ducha. Explique la relación entre estas frecuencias y la observación de que al cantar en la ducha sonamos mejor, sobre todo si cantamos con ciertas frecuencias.

16.56 Un tipo de acero tiene densidad de $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y resistencia a la ruptura de $7.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. Se fabricará una cuerda cilíndrica para guitarra con 4.00 g de este acero. a) Calcule la longitud y el radio de la cuerda más larga y delgada que pueda someterse a una tensión de 900 N sin romperse. b) ¿Qué frecuencia fundamental máxima podría tener esta cuerda?

16.57 Un tubo largo contiene aire a una presión de 1.00 atm y temperatura de 77.0°C . El tubo está abierto en un extremo y cerrado en el otro por un pistón móvil. Un diapason cerca del extremo abierto está vibrando con una frecuencia de 500 Hz. Se produce resonancia cuando el pistón está a distancias de 18.0, 55.5 y 93.0 cm del extremo abierto. a) Con estos datos, determine la rapidez del sonido en aire a 77.0°C . b) Con el resultado de la parte (a), calcule el valor de

γ c) Estos datos muestran que hay un antinodo de desplazamiento un poco afuera del extremo abierto del tubo. ¿Qué tan afuera está?

16.58 El canal auditivo del oído humano (Fig. 16.5) se extiende unos 2.5 cm del oído exterior al tímpano. a) Explique por qué el oído

16.64 Un murciélago vuela hacia una pared, emitiendo un sonido constante cuya frecuencia es de 2.00 kHz. El murciélago escucha su propio sonido más el sonido reflejado por la pared. ¿Con qué rapidez deberá volar para escuchar una frecuencia de pulsación de 10.0 Hz?

✓ Doppler

γ c) Estos datos muestran que hay un antinodo de desplazamiento un poco afuera del extremo abierto del tubo. ¿Qué tan afuera está?

16.58 El canal auditivo del oído humano (Fig. 16.5) se extiende unos 2.5 cm del oído exterior al tímpano. a) Explique por qué el oído humano es especialmente sensible a sonidos con frecuencias cercanas a 3500 Hz. $v = 344 \text{ m/s}$. b) ¿Esperaría que el oído fuera especialmente sensible a frecuencias cercanas a 7000 Hz? ¿A 10,500 Hz? ¿Por qué sí o por qué no?

16.59 Un alambre de platino (densidad 21.4 g/cm^3) tiene $225 \mu\text{m}$ de diámetro y 0.450 m de longitud. Un extremo está sujeto al techo y el otro está atado a una masa de 420 g de modo que el alambre cuelga verticalmente en tensión. Si un diapason que vibra con cierta frecuencia exacta se acerca al alambre, éste también comienza a vibrar. a) ¿Qué frecuencias del diapason harán que esto suceda? Puede suponerse que el extremo inferior del alambre (atado a la masa) está prácticamente estacionario y que la tensión en el alambre es constante en toda su longitud. b) Justifique los supuestos hechos en la parte (a).

16.60 La frecuencia de la nota F_4 es de 349 Hz . a) Si un tubo de órgano está abierto en un extremo y cerrado en el otro, ¿qué longitud deberá tener para que su modo fundamental produzca esta nota a 20.0°C ? b) ¿Con qué temperatura del aire será la frecuencia de 370 Hz , correspondiente a un aumento de tono de F_4 a F_4 sostenido? (Desprecie el cambio de longitud del tubo debido al cambio de temperatura.)

16.61 Una onda estacionaria con frecuencia de 1100 Hz en una columna de metano (CH_4) a 20.0°C produce nodos separados por 0.200 m . ¿Qué valor tiene γ para el metano? (La masa molar del metano es de 16.0 gmol .)

16.62 Dos altavoces idénticos están situados en los puntos A y B , separados 2.00 m . Los altavoces son alimentados por el mismo amplificador y producen ondas sonoras con una frecuencia de 784 Hz . La rapidez del sonido en aire es de 344 m/s . Un micrófono pequeño se aleja del punto B sobre una línea perpendicular a la línea que une a A y B (línea BC en la Fig. 16.44). a) ¿A qué distancias de B habrá interferencia destructiva? b) ¿Y constructiva? c) Si la frecuencia es lo bastante baja, no habrá posiciones sobre la línea BC en las que haya interferencia destructiva. ¿Qué tan baja deberá ser la frecuencia para que esto suceda?

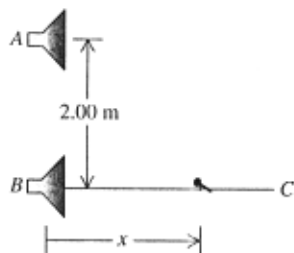


Figura 16.44 Problema 16.62.

16.63 Un hombre se casa con una gran soprano wagneriana pero después descubre, para su desgracia, que no tolera la ópera wagneriana. El desdichado marido decide que, para salvar sus tímpanos, deberá hacer que su cantarina esposa calle para siempre. Su plan consiste en atarla al frente de su automóvil y lanzarlo a gran velocidad contra un muro de tabiques. Sin embargo, la soprano no es nada tonta, y además estudió física cuando estaba en el conservatorio. Ella se da cuenta de que el muro tiene una frecuencia resonante de 600 Hz , lo que implica que, si una onda sonora continua de esa frecuencia incide en el muro, éste se derrumbará, y ella podrá seguir dedicándose al canto. El auto se dirige hacia el muro con rapidez de 30 m/s . a) ¿A qué frecuencia deberá cantar la soprano para que la pared se derrumbe? b) ¿Qué frecuencia oírán la soprano reflejada de la pared justo antes de que se desmorone?

16.64 Un murciélago vuela hacia una pared, emitiendo un sonido constante cuya frecuencia es de 2.00 kHz . El murciélago escucha su propio sonido más el sonido reflejado por la pared. ¿Con qué rapidez deberá volar para escuchar una frecuencia de pulsación de 10.0 Hz ?

16.65 Una esfera pequeña de radio R se pone a pulsar de modo que su radio varía en movimiento armónico simple entre un mínimo de $R - \Delta R$ y un máximo de $R + \Delta R$ con una frecuencia f . Esto produce ondas sonoras en el aire circundante, cuya densidad es ρ y cuyo módulo de volumen es B . a) Calcule la intensidad de las ondas sonoras en la superficie de la esfera. (La amplitud de oscilación de la esfera es la misma que tiene el aire en su superficie.) b) Calcule la potencia acústica total radiada por la esfera. c) A una distancia $d \gg R$ del centro de la esfera, calcule la amplitud, la amplitud de presión y la intensidad de la onda sonora.

16.66 Una onda sonora de 2.00 MHz viaja por el abdomen de una mujer embarazada y es reflejada por la pared cardíaca del feto, que se mueve hacia el receptor de sonido al latir el corazón. El sonido reflejado se mezcla con el transmitido, detectándose 85 pulsaciones por segundo. La rapidez del sonido en el tejido corporal es de 1500 m/s . Calcule la rapidez de la pared cardíaca fetal en el instante en que se hace la medición.

16.67 La fuente de sonido del sistema de sonar de un barco opera a una frecuencia de 22.0 kHz . La rapidez del sonido en agua (que suponemos está a una temperatura uniforme de 20°C) es de 1482 m/s . a) Calcule la longitud de las ondas emitidas por la fuente. b) Calcule la diferencia en frecuencia entre las ondas radiadas directamente y las reflejadas de una ballena que viaja directamente hacia el barco a 4.95 m/s . El barco está en reposo en el agua.

16.68 Una sirena policiaca con frecuencia f_{sirena} está sujeta a una plataforma vibrante. La plataforma y la sirena oscilan verticalmente en movimiento armónico simple con amplitud A_p y frecuencia f_p . a) Calcule las frecuencias máximas y mínimas del sonido que escucharía en una posición directamente arriba de la sirena. b) ¿En qué punto del movimiento de la plataforma se escucha la máxima frecuencia? ¿Y la mínima? Explique.

16.69 Los murciélagos de herradura (género *Rhinolophus*) emiten sonidos por las fosas nasales y luego escuchan la frecuencia del sonido reflejado de su presa para determinar la rapidez de ésta. (La "herradura" que da al animal su nombre es una depresión alrededor de las fosas nasales que actúa como espejo enfocador y permite al animal emitir sonido en un haz angosto, como una linterna.) Un *Rhinolophus* que vuela con una rapidez $v_{\text{murciélago}}$ emite sonidos de frecuencia $f_{\text{murciélago}}$; la frecuencia que oye reflejada de un insecto que vuela hacia él tiene un valor más alto f_{refl} . a) Demuestre que la rapidez del insecto es

$$v_{\text{insecto}} = v \left[\frac{f_{\text{refl}}(v - v_{\text{murciélago}}) - f_{\text{murciélago}}(v + v_{\text{murciélago}})}{f_{\text{refl}}(v - v_{\text{murciélago}}) + f_{\text{murciélago}}(v + v_{\text{murciélago}})} \right]$$

donde v es la rapidez del sonido. b) Si $f_{\text{murciélago}} = 80.7 \text{ kHz}$, $f_{\text{refl}} = 83.5 \text{ kHz}$ y $v_{\text{murciélago}} = 3.9 \text{ m/s}$, calcule la rapidez del insecto.

16.70 Una onda sonora con frecuencia f_0 y longitud de onda λ_0 viaja horizontalmente hacia la derecha y se refleja de una superficie vertical plana, grande y rígida, perpendicular a la dirección de propagación de la onda y que se mueve hacia la izquierda con rapidez v_1 . a) ¿Cuántas crestas de onda positivas chocan con la superficie en un intervalo de tiempo t ? b) Al final de este intervalo, ¿a qué distancia a la izquierda de la superficie está la onda que se reflejó al prin-

Doppler