



**YOUNG • FREEDMAN**

**SEARS • ZEMANSKY**

# FÍSICA UNIVERSITARIA

**VOLUMEN 1**

**DECIMOSEGUNDA EDICIÓN**

---

## FACTORES DE CONVERSIÓN DE UNIDADES

### Longitud

1 m = 100 cm = 1000 mm =  $10^6 \mu\text{m}$  =  $10^9 \text{ nm}$   
1 km = 1000 m = 0.6214 mi  
1 m = 3.281 ft = 39.37 in  
1 cm = 0.3937 in  
1 in. = 2.540 cm  
1 ft = 30.48 cm  
1 yd = 91.44 cm  
1 mi = 5280 ft = 1.609 km  
1 Å =  $10^{-10} \text{ m}$  =  $10^{-8} \text{ cm}$  =  $10^{-1} \text{ nm}$   
1 milla náutica = 6080 ft  
1 año luz =  $9.461 \times 10^{15} \text{ m}$

### Área

1 cm<sup>2</sup> = 0.155 in<sup>2</sup>  
1 m<sup>2</sup> =  $10^4 \text{ cm}^2$  = 10.76 ft<sup>2</sup>  
1 in<sup>2</sup> = 6.452 cm<sup>2</sup>  
1 ft = 144 in<sup>2</sup> = 0.0929 m<sup>2</sup>

### Volumen

1 litro = 1000 cm<sup>3</sup> =  $10^{-3} \text{ m}^3$  = 0.03531 ft<sup>3</sup> = 61.02 in<sup>3</sup>  
1 ft<sup>3</sup> = 0.02832 m<sup>3</sup> = 28.32 litros = 7.477 galones  
1 galón = 3.788 litros

### Tiempo

1 min = 60 s  
1 h = 3600 s  
1 d = 86,400 s  
1 año = 365.24 d =  $3.156 \times 10^7 \text{ s}$

### Ángulo

1 rad =  $57.30^\circ$  =  $180^\circ/\pi$   
1° = 0.01745 rad =  $\pi/180$  rad  
1 revolución =  $360^\circ$  =  $2\pi$  rad  
1 rev/min (rpm) = 0.1047 rad/s

### Rapidez

1 m/s = 3.281 ft/s  
1 ft/s = 0.3048 m/s  
1 mi/min = 60 mi/h = 88 ft/s  
1 km/h = 0.2778 m/s = 0.6214 mi/h  
1 mi/h = 1.466 ft/s = 0.4470 m/s = 1.609 km/h  
1 furlong/14 días =  $1.662 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

### Aceleración

1 m/s<sup>2</sup> = 100 cm/s<sup>2</sup> = 3.281 ft/s<sup>2</sup>  
1 cm/s<sup>2</sup> = 0.01 m/s<sup>2</sup> = 0.03281 ft/s<sup>2</sup>  
1 ft/s<sup>2</sup> = 0.3048 m/s<sup>2</sup> = 30.48 cm/s<sup>2</sup>  
1 mi/h · s = 1.467 ft/s<sup>2</sup>

### Masa

1 kg =  $10^3 \text{ g}$  = 0.0685 slug  
1 g =  $6.85 \times 10^{-5} \text{ slug}$   
1 slug = 14.59 kg  
1 u =  $1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
1 kg tiene un peso de 2.205 lb cuando  $g = 9.80 \text{ m/s}^2$

### Fuerza

1 N =  $10^5 \text{ dinas}$  = 0.2248 lb  
1 lb = 4.448 N =  $4.448 \times 10^5 \text{ dinas}$

### Presión

1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup> =  $1.450 \times 10^{-4} \text{ lb/in}^2$  = 0.209 lb/ft<sup>2</sup>  
1 bar =  $10^5 \text{ Pa}$   
1 lb/in<sup>2</sup> = 6895 Pa  
1 lb/ft<sup>2</sup> = 47.88 Pa  
1 atm =  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  = 1.013 bar  
=  $14.7 \text{ lb/in}^2$  = 2117 lb/ft<sup>2</sup>  
1 mm Hg = 1 torr = 133.3 Pa

### Energía

1 J =  $10^7 \text{ ergs}$  = 0.239 cal  
1 cal = 4.186 J (con base en caloría de 15°)  
1 ft · lb = 1.356 J  
1 Btu = 1055 J = 252 cal = 778 ft · lb  
1 eV =  $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$   
1 kWh =  $3.600 \times 10^6 \text{ J}$

### Equivalencia masa-energía

1 kg ↔  $8.988 \times 10^{16} \text{ J}$   
1 u ↔ 931.5 MeV  
1 eV ↔  $1.074 \times 10^{-9} \text{ u}$

### Potencia

1 W = 1 J/s  
1 hp = 746 W = 550 ft · lb/s  
1 Btu/h = 0.293 W

## CONSTANTES NUMÉRICAS

### Constantes físicas fundamentales\*

Nombre	Símbolo	Valor
Rapidez de la luz	$c$	$2.99792458 \times 10^8$ m/s
Magnitud de carga del electrón	$e$	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ C
Constante gravitacional	$G$	$6.6742(10) \times 10^{-11}$ N · m <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup>
Constante de Planck	$h$	$6.6260693(11) \times 10^{-34}$ J · s
Constante de Boltzmann	$k$	$1.3806505(24) \times 10^{-23}$ J/K
Número de Avogadro	$N_A$	$6.0221415(10) \times 10^{23}$ moléculas/mol
Constante de los gases	$R$	8.314472(15) J/mol · K
Masa del electrón	$m_e$	$9.1093826(16) \times 10^{-31}$ kg
Masa del protón	$m_p$	$1.67262171(29) \times 10^{-27}$ kg
Masa del neutrón	$m_n$	$1.67492728(29) \times 10^{-27}$ kg
Permeabilidad del espacio libre	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A · m
Permitividad del espacio libre	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	$8.854187817 \dots \times 10^{-12}$ C <sup>2</sup> /N · m <sup>2</sup>
	$1/4\pi\epsilon_0$	$8.987551787 \dots \times 10^9$ N · m <sup>2</sup> /C <sup>2</sup>

### Otras constante útiles

Equivalente mecánico del calor		4.186 J/cal (15° caloría )
Presión atmosférica estándar	1 atm	$1.01325 \times 10^5$ Pa
Cero absoluto	0 K	-273.15 °C
Electrón volt	1 eV	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ J
Unidad de masa atómica	1 u	$1.66053886(28) \times 10^{-27}$ kg
Energía del electrón en reposo	$m_e c^2$	0.510998918(44) MeV
Volumen del gas ideal (0 °C y 1 atm)		22.413996(39) litros/mol
Aceleración debida a la gravedad (estándar)	$g$	9.80665 m/s <sup>2</sup>

\*Fuente: National Institute of Standards and Technology (<http://physics.nist.gov/cuu>). Los números entre paréntesis indican incertidumbre en los dígitos finales del número principal; por ejemplo, el número 1.6454(21) significa  $1.6454 \pm 0.0021$ . Los valores que no indican incertidumbre son exactos.

### Datos astronómicos<sup>†</sup>

Cuerpo	Masa (kg)	Radio (m)	Radio de la órbita (m)	Periodo de la órbita
Sol	$1.99 \times 10^{30}$	$6.96 \times 10^8$	—	—
Luna	$7.35 \times 10^{22}$	$1.74 \times 10^6$	$3.84 \times 10^8$	27.3 d
Mercurio	$3.30 \times 10^{23}$	$2.44 \times 10^6$	$5.79 \times 10^{10}$	88.0 d
Venus	$4.87 \times 10^{24}$	$6.05 \times 10^6$	$1.08 \times 10^{11}$	224.7 d
Tierra	$5.97 \times 10^{24}$	$6.38 \times 10^6$	$1.50 \times 10^{11}$	365.3 d
Marte	$6.42 \times 10^{23}$	$3.40 \times 10^6$	$2.28 \times 10^{11}$	687.0 d
Júpiter	$1.90 \times 10^{27}$	$6.91 \times 10^7$	$7.78 \times 10^{11}$	11.86 y
Saturno	$5.68 \times 10^{26}$	$6.03 \times 10^7$	$1.43 \times 10^{12}$	29.45 y
Urano	$8.68 \times 10^{25}$	$2.56 \times 10^7$	$2.87 \times 10^{12}$	84.02 y
Neptuno	$1.02 \times 10^{26}$	$2.48 \times 10^7$	$4.50 \times 10^{12}$	164.8 y
Plutón <sup>‡</sup>	$1.31 \times 10^{22}$	$1.15 \times 10^6$	$5.91 \times 10^{12}$	247.9 y

<sup>†</sup>Fuente: NASA Jet Propulsion Laboratory Solar System Dynamics Group (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) y P. Kenneth Seidelmann, ed., *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (University Science Books, Mill Valley, CA, 1992), pp. 704-706. Para cada cuerpo, “radio” es el radio en su ecuador y “radio de la órbita” es la distancia media desde el Sol (en el caso de los planetas) o desde la Tierra (en el caso de la Luna).

<sup>‡</sup>En agosto de 2006 la Unión Astronómica Internacional reclasificó a Plutón y a otros pequeños objetos que giran en órbita alrededor del Sol como “planetas enanos”.

# CONTENIDO BREVE

## Mecánica

1	Unidades, cantidades físicas y vectores	1
2	Movimiento en línea recta	36
3	Movimiento en dos o en tres dimensiones	71
4	Leyes del movimiento de Newton	107
5	Aplicación de las leyes de Newton	136
6	Trabajo y energía cinética	181
7	Energía potencial y conservación de la energía	213
8	Momento lineal, impulso y choques	247
9	Rotación de cuerpos rígidos	285
10	Dinámica del movimiento rotacional	316
11	Equilibrio y elasticidad	354
12	Gravitación	383
13	Movimiento periódico	419
14	Mecánica de fluidos	456

## Ondas/Acústica

15	Ondas mecánicas	487
16	Sonido y el oído	527

## Termodinámica

17	Temperatura y calor	570
18	Propiedades térmicas de la materia	610
19	La primera ley de la termodinámica	646
20	La segunda ley de la termodinámica	673

## APÉNDICES

A	El sistema internacional de unidades	A-1
B	Relaciones matemáticas útiles	A-3
C	El alfabeto griego	A-4
D	Tabla periódica de los elementos	A-5
E	Factores de conversión de unidades	A-6
F	Constantes numéricas	A-7
	Respuestas a los problemas con número impar	A-9

# SONIDO Y EL OÍDO

# 16



? A la mayoría de la gente le agrada escuchar música, pero a pocas les gusta escuchar ruido. ¿Cuál es la diferencia física entre el sonido musical y el ruido?

**D**e 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 incluso 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 los seres humanos debemos la existencia a nuestro sentido del oído altamente evolucionado.

Hasta ahora, hemos descrito las ondas mecánicas primordialmente en términos de desplazamiento; no obstante, por lo general resulta más adecuado 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, así como los vínculos entre estas cantidades y la percepción humana del sonido.

Cuando una fuente de sonido o un receptor se mueven 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 la tecnología.

## 16.1 Ondas sonoras

La definición más general del **sonido** es una onda longitudinal en un medio. Lo que más nos interesa en este capítulo son las ondas sonoras en aire; aunque 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 los altavoces (las bocinas) del aparato de sonido del vecino están junto a una pared de su casa.

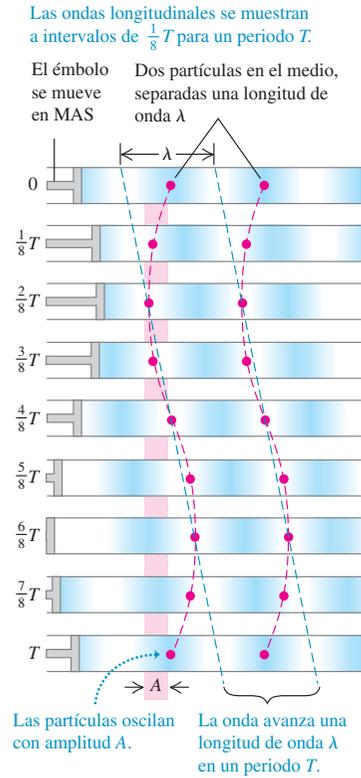
Las ondas sonoras más sencillas son las senoidales, las cuales tienen la frecuencia, la amplitud y la longitud de onda completamente especificadas. El oído humano es sensible a las ondas en el intervalo de frecuencias de 20 a 20,000 Hz, llamada **gama**

## METAS DE APRENDIZAJE

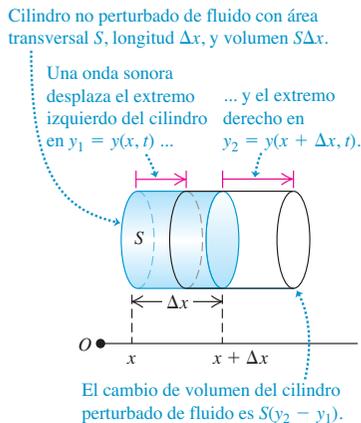
**Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:**

- Cómo describir una onda sonora en términos de los desplazamientos de partícula o de las fluctuaciones de presión.
- Cómo calcular la rapidez de las ondas sonoras en diferentes materiales.
- Cómo obtener la intensidad de una onda sonora.
- Qué determina la frecuencia específica del sonido producido por un órgano o una flauta.
- Cómo ocurre la resonancia en los instrumentos musicales.
- Qué sucede cuando se traslapan las ondas sonoras de diferentes fuentes.
- Cómo describir lo que ocurre cuando se combinan dos ondas sonoras de frecuencias ligeramente diferentes.
- Por qué el tono de una sirena cambia conforme se va alejando.

**16.1** Onda senoidal longitudinal que viaja hacia la derecha en un fluido. (Compare con la figura 15.7.)



**16.2** Al propagarse una onda sonora a lo largo del eje  $x$ , los extremos izquierdo y derecho sufren desplazamientos distintos  $y_1$  y  $y_2$ , respectivamente.



**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 sonora, con una amplitud que depende de la dirección y la distancia a la fuente. Volveremos a este punto en la siguiente sección. Por ahora, nos concentraremos 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  $x$  y en el instante  $t$ . Si la onda es senoidal, podemos expresarla usando la ecuación (15.7):

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

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 paralelas entre sí, no perpendicularmente como en las ondas transversales. La amplitud  $A$  es el máximo desplazamiento de una partícula del medio con respecto a su posición de equilibrio (figura 16.1). Por lo tanto,  $A$  también se conoce como **amplitud de desplazamiento**.

### Ondas sonoras como fluctuaciones de presión

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 pone en movimiento. 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 *difiere* 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 un material (gas, líquido, sólido) con área transversal  $S$  y su eje a lo largo de la dirección de propagación (figura 16.2). Si no está presente una onda sonora, el cilindro tiene longitud  $\Delta x$  y volumen  $V = S\Delta x$ , volumen sombreado en la figura 16.2. Si una onda está presente, al tiempo  $t$  el extremo del cilindro que estaba en  $x$  tiene un desplazamiento dado por  $y_1 = y(x, t)$ , y el extremo que estaba en  $x + \Delta x$  se desplaza  $y_2 = y(x + \Delta x, t)$ ; esto se indica con líneas rojas. Si  $y_2 > y_1$  como en la figura 16.2, el volumen del cilindro aumentó, originando 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 izquierda o a la derecha; 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  $\Delta V$  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  $dV/V$  (cambio de volumen dividido entre volumen original) 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  $p(x, t)$ :

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

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 cual 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

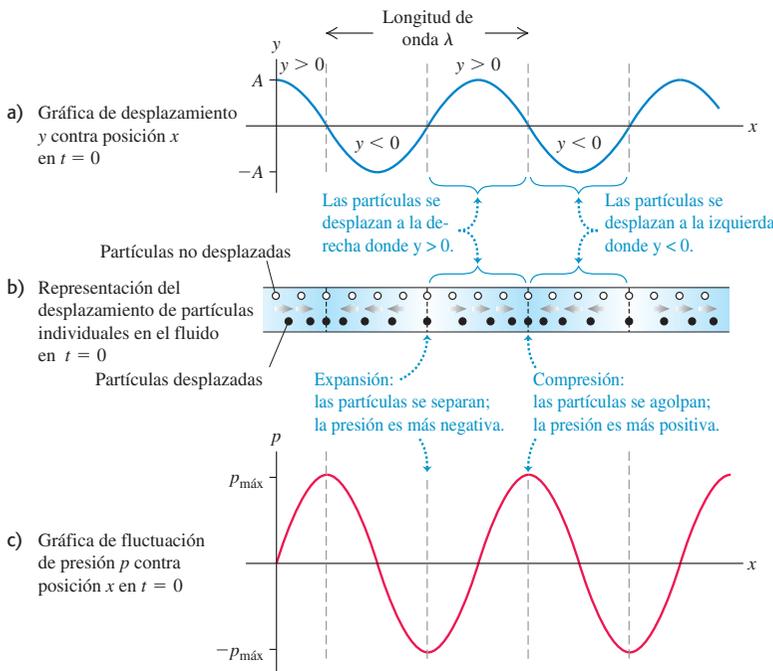
$$p(x, t) = BkA \text{sen}(kx - \omega t) \tag{16.4}$$

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.

**CUIDADO Gráficas de una onda sonora** 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  $\omega = v/k$ . Por lo 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 indica en la figura 16.1. ■

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

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



**16.3** Tres formas de describir una onda sonora.

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 longitud de onda  $\lambda$  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  $3.0 \times 10^{-2}$  Pa por arriba y por debajo de la presión atmosférica  $p_a$  (nominalmente  $1.013 \times 10^5$  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  $1.42 \times 10^5$  Pa.

#### SOLUCIÓN

**IDENTIFICAR:** Este problema implica la relación entre dos formas distintas de describir una onda sonora: en términos del desplazamiento y en términos de la presión. La incógnita es la amplitud del desplazamiento  $A$ .

**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 la vez, hace oscilar los tres huesecillos del oído medio (figura 16.4). 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  $43 \text{ mm}^2$ , y el estribo (el huesecillo más pequeño) en su contacto con el oído interno, de unos  $3.2 \text{ mm}^2$ . 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

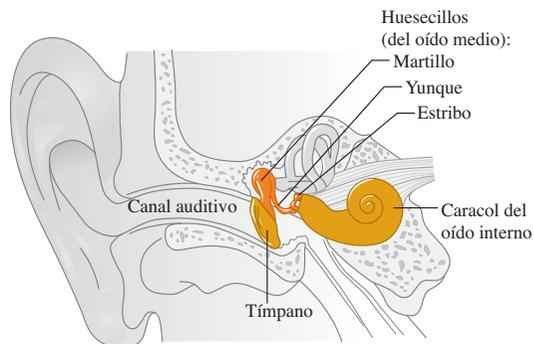
**IDENTIFICAR:** Aunque la onda sonora ahora viaja por un líquido (principalmente agua) y no por un gas, son válidos los mismos principios y relaciones entre las propiedades de la onda.

**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  $\omega$  que en

**16.4 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.



el aire porque éste, el tímpano, los huesecillos y el fluido oscilan juntos. No obstante, 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  $k = \omega/v$  es menor.

**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  $F_{\text{máx}} = p_{\text{máx}}(\text{aire})S_{\text{tímpano}}$ . Por lo 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  $\omega$  del ejemplo 16.1 y  $v = 1500 \text{ m/s}$  para el fluido del oído interno. Entonces,

$$k_{\text{oído interno}} = \frac{\omega}{v_{\text{oído interno}}} = \frac{(2\pi \text{ rad})(1000 \text{ Hz})}{1500 \text{ m/s}} = 4.2 \text{ rad/m}$$

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

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

**EVALUAR:** El resultado del inciso 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; sin embargo, lo que realmente importa ahí es la amplitud de presión, ya que las variaciones de presión en el fluido son lo que mueven las células pilosas.

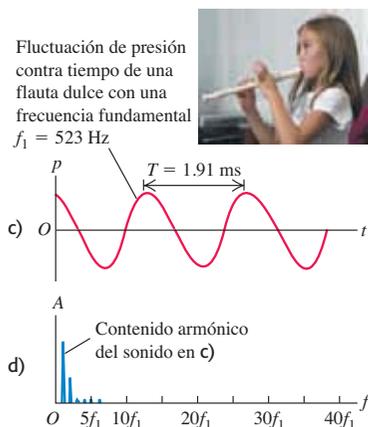
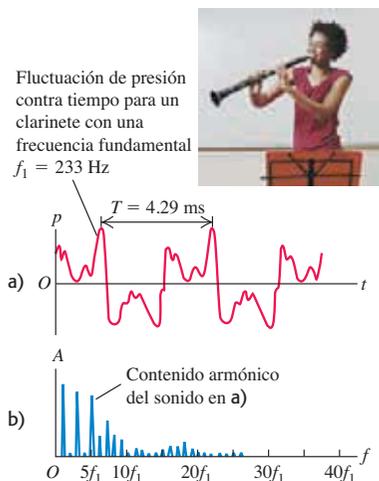
## Percepción de ondas sonoras

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 la intensidad del sonido al cual se le suele llamar, así que 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 varios músicos de rock jóvenes han sufrido daños auditivos 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 cualidad que nos permite clasificarlo como “agudo” o “grave”. Cuanta 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 16.5a 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 viento 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 16.5b muestra el contenido armónico del sonido de un clarinete. El proceso matemático de traducir una gráfica de presión-tiempo como la figura 16.5a en una gráfica de contenido armónico como la figura 16.5b se denomina *análisis de Fourier*.

**16.5** Diferentes representaciones del sonido de a) y b) un clarinete y c) y d) una flauta dulce o de pico. (Gráficas adaptadas de R.E. Berg y D.G. Stork, *The Physics of Sound*, Prentice-Hall, 1982.)



Dos tonos producidos por diferentes instrumentos podrían tener la misma frecuencia fundamental (y por lo 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, do-rado, redondo, suave y débil. Un tono rico en armónicos, como el del clarinete (figuras 16.5a y b), suele sonar “delgado”; mientras que uno que contiene principalmente una fundamental, como el tono de una flauta dulce o de pico (figuras 16.5c y d) es más suave y “aflautado”. El mismo principio puede aplicarse a la voz humana, que es otro ejemplo de instrumento de viento; las vocales “a” y “e” suenan diferentes por diferencias en su contenido armónico.

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 viento y cuerda, el ejecutante tiene un control considerable sobre el ataque y el 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 **ruído** 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 de la sección 16.1** Se produce una onda sonora senoidal en aire con un generador de señales electrónicas. Luego, se aumenta la frecuencia de la onda de 100 Hz a 400 Hz manteniendo constante la amplitud de presión. ¿Qué efecto tiene esto sobre la amplitud de desplazamiento de la onda sonora? i) se vuelve cuatro veces mayor; ii) se vuelve dos veces mayor, iii) permanece sin cambio; iv) se reduce a la mitad; v) se reduce a la cuarta parte.



## 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  $\mu$ :  $v = \sqrt{F/\mu}$ . ¿Existe una expresión correspondiente para la rapidez de las ondas sonoras en un gas o un 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  $\rho$ , que es masa por unidad de volumen. (La cantidad correspondiente para una cuerda es la masa por unidad de longitud,  $\mu$ .) Por lo 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 en un fluido en un tubo. Este tema es importante, ya que todos los instrumentos musicales de viento son básicamente tubos, en los que una onda longitudinal (sonido) se propaga en

un fluido (aire) (figura 16.6). Nuestra 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 sería útil repasar esa sección.

### Rapidez del sonido en un fluido

La figura 16.7 muestra un fluido (líquido o gas) con densidad  $\rho$  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 figura 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 de  $P$  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 el tiempo  $t$ , el pistón se mueve una distancia  $v_y t$  y la frontera avanza 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 el momento lineal.

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  $vtA$ . La masa de este fluido es  $\rho vtA$ , y su momento lineal longitudinal (a lo largo del tubo) es

$$\text{Momento lineal longitudinal} = (\rho vtA)v_y$$

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

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

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

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 figura 16.7b) es  $\Delta pA$ , 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 momento lineal hasta el instante  $t$  es igual al momento lineal en  $t$ . Aplicando el teorema de impulso y el momento lineal (sección 8.1), vemos que

$$B \frac{v_y}{v} At = \rho vtAv_y \tag{16.6}$$

Si despejamos  $v$ , obtenemos

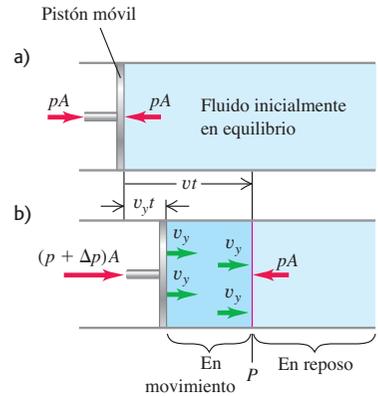
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{rapidez de una onda longitudinal en un fluido}) \tag{16.7}$$

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  $\rho$  del medio.

**16.6** Cuando se toca un instrumento de viento como este corno francés, las ondas sonoras se propagan por el aire dentro de los tubos del instrumento. Las propiedades del sonido que sale del pabellón dependen de la rapidez de tales ondas.



**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  $v$ .



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 sonoras que viajan en aire o agua se obtiene con esta ecuación.

## Rapidez del sonido en un sólido

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; en tanto 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.

**CAUIDADO** **Varillas sólidas contra material sólido en volumen** La ecuación (16.8) es válida sólo para una varilla o barra, cuyos lados pueden arquearse 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 ondas senoidales y 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, ya que 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 (100 °C)	1543
<i>Sólidos</i>	
Aluminio	6420
Plomo	1960
Acero	5941

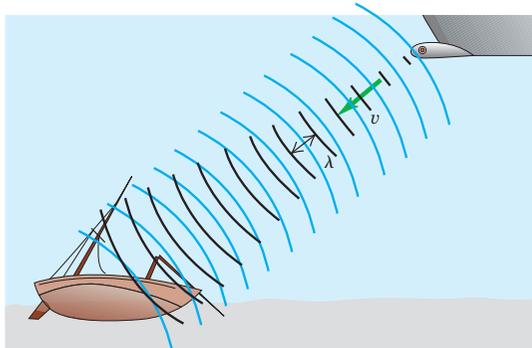
### Ejemplo 16.3 Longitud de onda del sonar

Un barco usa un sistema de sonar para detectar objetos submarinos (figura 16.8). El sistema emite ondas sonoras submarinas y mide el tiempo que tarda la onda reflejada (eco) en volver al detector. Determine 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:** Nuestras incógnitas son la rapidez y la longitud de onda de una onda sonora en un fluido.

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



**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 ( $\rho = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ). Dadas la rapidez y la frecuencia  $f = 262 \text{ Hz}$ , calculamos 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 ( $\rho$  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 frecuencia = 5 MHz =  $5 \times 10^6$  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, así como en exámenes prenatales (figura 16.9); es más sensible que los rayos x para distinguir los diversos tipos de tejidos y no tiene 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:** Ésta es la situación en la que se aplica la ecuación (16.8). Obtenemos los valores del módulo de Young  $Y$  y la densidad  $\rho$  de las tablas 11.1 y 14.1, respectivamente.

**EJECUTAR:** Conocemos que  $Y = 1.6 \times 10^{10}$  Pa y  $\rho = 11.3 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> (es decir, 11.3 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 sea la presión que se aplica a un gas para comprimirlo, mayor resistencia opondrá el gas a una compresión ulterior, y mayor será su módulo de volumen. (Por ello, 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  $\gamma$  (la letra griega gamma) se denomina *la razón de capacidades caloríficas*. Es un número adimensional 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  $p_0 = 1.01 \times 10^5$  Pa,  $B = (1.40)(1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) = 1.42 \times 10^5$  Pa. Este valor es minúsculo en comparación con el módulo de volumen de un sólido representativo (véase la tabla 11.1), que es del orden de  $10^{10}$  o  $10^{11}$  Pa. Esto es lógico: simplemente nos indica que el aire es mucho más fácil de comprimir que el acero.

La densidad  $\rho$  de un gas también depende de la presión que, a la vez, depende de la temperatura. Resulta que el cociente  $B/\rho$  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  $T$ :

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

**16.9** Esta imagen tridimensional de un feto en la matriz se obtuvo mediante una sucesión de exploraciones con ultrasonido. Cada exploración revela una “rebanada” bidimensional del feto; después, se combinaron digitalmente muchas de estas rebanadas para producir esta extraordinaria imagen.



Activ  
ONLINE  
Physics  
10.3 Rapidez del sonido en un gas

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 lo tanto, 20.00 °C corresponde a  $T = 293.15$  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,  $\gamma$ ,  $R$  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.

### Ejemplo 16.5 Rapidez del sonido en aire

Calcule la rapidez de las ondas sonoras en aire a temperatura ambiente ( $T = 20$  °C) y determine el rango de longitudes de onda en el aire a la que es sensible el oído humano (que puede escuchar frecuencias entre 20 y 20,000 Hz). 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:** Este problema utiliza la relación entre las propiedades de un gas y la rapidez del sonido en ese gas.

**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  $T = 20$  °C = 293 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. Resulta que las ondas sonoras con tales longitudes de onda cortas son reflejadas más fácilmente por objetos pequeños que las de longitudes de onda largas. Esto es importante para ciertas especies de murciélagos que se guían con el sonido reflejado de los pequeños 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, en tanto que insectos individuales se mueven dentro del enjambre, aparentemente al azar.

**Evalúe su comprensión de la sección 16.2** El mercurio es 13.6 veces más denso que el agua. De acuerdo con la tabla 16.1, ¿a 20 °C, cuál de estos líquidos tiene el mayor módulo de volumen? i) el mercurio; ii) el agua; iii) ambos tienen el mismo; iv) no se dispone de suficiente información para decidir.



## 16.3 Intensidad del sonido

Las ondas sonoras viajeras, 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*  $I$ , que es 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  $p_{\text{máx}}$ .

### Intensidad y amplitud de desplazamiento

Por sencillez, consideremos una onda sonora que se propaga en la dirección  $+x$ , con la finalidad 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 [véase la ecuación (6.18)]. Por lo 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 la *partícula*,  $v_y(x, t)$ . Esta última es la velocidad en el tiempo  $t$  de la porción del medio que está en la coordenada  $x$ . Utilizando las ecuaciones (16.1) y (16.4), tenemos

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

**CUIDADADO** **Velocidad de onda contra velocidad de partículas** 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  $\text{sen}^2(kx - \omega t)$  durante un periodo  $T = 2\pi/\omega$  es  $\frac{1}{2}$ , así que

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

Utilizando las relaciones  $\omega = vk$  y  $v^2 = B/\rho$ , transformamos 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 altavoz de baja frecuencia (*woofer*) debe vibrar con mucha mayor amplitud que un altavoz de alta frecuencia (*tweeter*) para producir la misma intensidad de sonido.

### Intensidad y amplitud de presión

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) de formas alternativas:

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

**16.10** Al firmar una oquedad con las manos cerca del rostro, como en la imagen, las ondas sonoras que salen de la boca se dirigen de manera que no se propaguen lateralmente. Por ende, la intensidad disminuye con la distancia más lentamente de lo que predice la ley del inverso del cuadrado y el sonido se puede escuchar a mayores distancias.



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 en vez del 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 aproximadamente  $3 \times 10^{-2}$  W. Si todos los residentes de Nueva York hablaran al mismo tiempo, la potencia sonora total sería de unos 100 W, equivalentes al consumo de potencia eléctrica 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 16.8).

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. Cuando el sonido viaja predominantemente en una dirección, no se aplica la ley del inverso del cuadrado y la intensidad disminuye con la distancia más lentamente que  $1/r^2$  (figura 16.10).

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 16.1

### Intensidad del sonido



**IDENTIFICAR** *los conceptos relevantes:* 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  $\omega$ ,  $k$  o  $\lambda$ . Estas cantidades se relacionan mediante la rapidez de la onda  $v$ , que a la vez depende de las propiedades del medio:  $B$  y  $\rho$  en el caso de un líquido;  $\gamma$ ,  $T$  y  $M$  en el caso de un gas.

2. Identifique qué cantidades se dan y cuáles son las incógnitas, 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, verifique 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, suponiendo que la temperatura es  $20^\circ\text{C}$ , 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:** Nuestra incógnita es la intensidad  $I$  de la onda sonora. Nos dan la amplitud de presión,  $p_{\text{máx}}$ , la densidad  $\rho$  y la rapidez de onda  $v$ .

**PLANTEAR:** Podemos calcular  $I$  con  $p_{\text{máx}}$ ,  $\rho$  y  $v$  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 percibimos 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  $1 \text{ W/m}^2$ . La amplitud de presión de la onda sonora más tenue que puede escucharse es del orden de  $3 \times 10^{-5}$  Pa, y la intensidad correspondiente es de cerca de  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . (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:** Se nos dan la intensidad y la frecuencia de la onda sonora. Nuestras incógnitas son la amplitud de desplazamiento  $A$  y la amplitud de presión  $p_{\text{máx}}$ .

**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,  $\rho$  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  $\rho$  y  $B$ ) tiene la misma intensidad  $I$  a dos frecuencias distintas, el producto  $\omega A$  debe tener el mismo valor con

ambas frecuencias. Por el ejemplo 16.1,  $A = 1.2 \times 10^{-8}$  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 lo tanto,  $p_{\text{máx}} = 3.0 \times 10^{-2}$  Pa para  $f = 20$  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  $\omega A$  debe tener el mismo valor para ambas frecuencias.

### Ejemplo 16.8 “¡Que suene!”

Para un concierto al aire libre, queremos que la intensidad del sonido a 20 m de los altavoces sea de  $1 \text{ W/m}^2$ . 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 hemisferio

de 20 m de radio (esto es, suponemos que no se dirige potencia acústica hacia el suelo). El área superficial de este hemisferio es  $(\frac{1}{2})(4\pi)(20 \text{ m})^2$ , o aproximadamente  $2500 \text{ m}^2$ . 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 amplia gama de intensidades, suele usarse una escala de intensidad *logarítmica*. El **nivel de intensidad de sonido**  $\beta$  de una onda sonora está definido por la ecuación

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

En esta ecuación,  $I_0$  es una intensidad de referencia que se toma como  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ , aproximadamente el umbral de la audición humana 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  $I_0$  o a  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ , su nivel de intensidad de sonido es de 0 dB. Una intensidad de  $1 \text{ W/m}^2$  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  $\beta$  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, $\beta$ (dB)	Intensidad, $I$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
Avión militar a reacción a 30 m	140	$10^2$
Umbral del dolor	120	1
Remachador	95	$3.2 \times 10^{-3}$
Tren elevado	90	$10^{-3}$
Tráfico urbano intenso	70	$10^{-5}$
Conversación ordinaria	65	$3.2 \times 10^{-6}$
Automóvil silencioso	50	$10^{-7}$
Radio con volumen 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 otorga menos importancia a las frecuencias bajas y muy altas, donde el oído es menos sensible.

### Ejemplo 16.9 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:** Se nos dan dos diferentes niveles de intensidades de sonido en dB, y queremos calcular las intensidades correspondientes en  $\text{W}/\text{m}^2$ .

**PLANTEAR:** Despejaremos la intensidad  $I$  de la ecuación (16.15) para cada valor del nivel de intensidad de sonido  $\beta$ .

**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  $\beta = 28$  dB,

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

De forma similar, para  $\beta = 92$  dB,

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

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

### Ejemplo 16.10 Un pájaro canta en una pradera

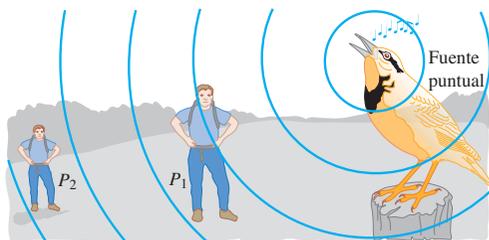
Considere un modelo idealizado en el que un pájaro (considerado como fuente puntual) emite una potencia sonora constante, cuya intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al ave. ¿Cuántos decibeles bajará el nivel de intensidad del sonido si nos alejamos al doble de la distancia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

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



**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 cual nos indica (correctamente) que el nivel de intensidad de 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 2 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 2 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.

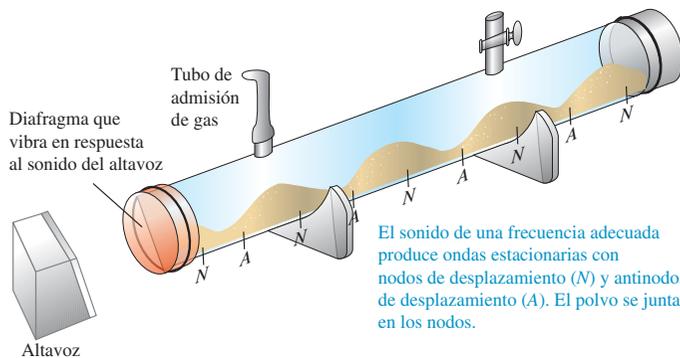
**Evalúe su comprensión de la sección 16.3** Se duplica la intensidad de una onda sonora en aire, sin alterar su frecuencia. (Tampoco cambian la presión, densidad y temperatura del aire.) ¿Qué efecto tiene esto sobre la amplitud de desplazamiento, la amplitud de presión, el módulo de volumen, la rapidez 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 transversales 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 viento 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 donde las partículas del fluido tienen cero desplazamiento y máximo desplazamiento, respectivamente.

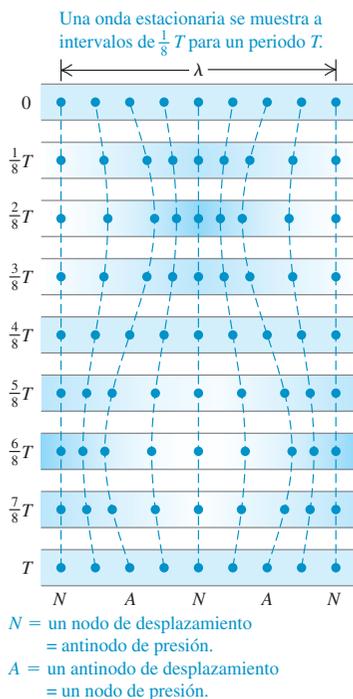
Podemos demostrar las ondas sonoras estacionarias en una columna de gas con un aparato llamado tubo de Kundt (figura 16.12). Un tubo horizontal de vidrio de



**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.

El sonido de una frecuencia adecuada produce ondas estacionarias con nodos de desplazamiento (N) y antinodos de desplazamiento (A). El polvo se junta en los nodos.

**16.13** En una onda sonora 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 donde la presión no fluctúa).



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 uniformemente un poco de polvo fino 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 se mueve el gas. Por lo 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 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 muestra los movimientos de nueve partículas diferentes dentro de un tubo lleno de gas, donde hay una onda estacionaria. Una partícula en un nodo de desplazamiento ( $N$ ) no se mueve; mientras que una partícula en un antinodo de desplazamiento ( $A$ ) oscila con amplitud máxima. Observe que las partículas en lados opuestos del nodo vibran en fase opuesta. Cuando estas partículas se acercan entre sí, 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 donde 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 sonora 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  $N$ ).

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 hablando, 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 despreciar este 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.

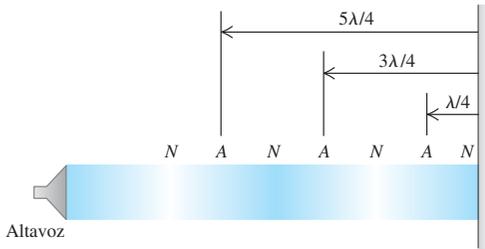
**Ejemplo 16.11 El sonido del silencio**

Un altavoz direccional dirige una onda sonora de longitud de onda  $\lambda$  a una pared (figura 16.14). ¿A qué distancias de la pared podríamos pararnos y no escuchar nada?

**SOLUCIÓN**

El oído detecta variaciones de presión en el aire; aumentos o reducciones en la presión externa del oído hacen que el tímpano se mueva lige-

**16.14** Cuando una onda sonora se dirige hacia la pared, interfiere con la onda reflejada para crear una onda estacionaria. Las  $N$  y  $A$  son nodos y antinodos de desplazamiento.



ramente 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 viaje en avión, ya sabe lo sensibles que son a los cambios de presión.) Por lo 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,  $\lambda/2$  (figura 16.14). Por consiguiente, las distancias  $d$  de la pared en las que no se escuchará sonido son

$$d = \lambda/4 \quad (\text{primer antinodo de desplazamiento y nodo de presión})$$

$$d = \lambda/4 + \lambda/2 = 3\lambda/4 \quad (\text{segundo antinodo de desplazamiento y nodo de presión})$$

$$d = 3\lambda/4 + \lambda/2 = 5\lambda/4 \quad (\text{tercer antinodo de desplazamiento y nodo de presión})$$

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

**Tubos de órganos e instrumentos de viento**

La aplicación más importante de las ondas sonoras estacionarias es la producción de tonos musicales con instrumentos de viento. Los tubos de órgano son uno de los ejemplos más sencillos (figura 16.15). Un fuelle alimenta aire a una presión manométrica del orden de  $10^3$  Pa ( $10^2$  atm) en el extremo inferior del tubo (figura 16.16). Una corriente de aire sale por la abertura angosta en el borde de la superficie 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 figura 16.16) puede estar abierto o cerrado.

En la figura 16.17, 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 (figura 16.17a). 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 16.17b y 16.17c 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 abierto, la longitud  $L$  debe ser un número entero de medias longitudes de onda, y las longitudes de onda posibles  $\lambda_n$  están dadas por

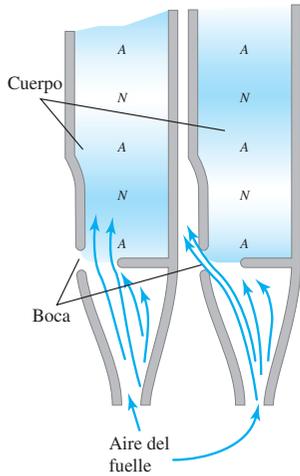
$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{o bien,} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{tubo abierto}) \quad (16.17)$$

**16.15** Tubos de órgano de distinto tamaño producen tonos de distinta frecuencia.



**16.16** Cortes transversales de un tubo de órgano en dos instantes separados medio periodo. 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.

Las vibraciones del flujo turbulento de aire crean ondas estacionarias en el tubo.



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 (o primer sobretono), etcétera. 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 16.18 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

**16.17** 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*.

a) Fundamental:  $f_1 = \frac{v}{2L}$

b) Segundo armónico:  $f_2 = 2 \frac{v}{2L} = 2f_1$

c) Tercer armónico:  $f_3 = 3 \frac{v}{2L} = 3f_1$

**16.18** 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.

a) Fundamental:  $f_1 = \frac{v}{4L}$

b) Tercer armónico:  $f_3 = 3 \frac{v}{4L} = 3f_1$

c) Quinto armónico:  $f_5 = 5 \frac{v}{4L} = 5f_1$

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  $\frac{1}{4}$  de longitud de onda. La figura 16.18a muestra el modo de más baja frecuencia; la longitud del tubo es un cuarto de longitud de onda ( $L = \lambda_1/4$ ). La frecuencia fundamental es  $f_1 = v/\lambda_1$ , o bien,

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

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 con la misma longitud. La figura 16.18b 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 16.18c,  $L = 5\lambda/4$  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  $f_n = v/\lambda_n$ , es decir,

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

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 16.12 Una 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:** Este problema utiliza la relación entre la longitud y las frecuencias de modo normal de un tubo abierto (figura 16.17) y un tubo cerrado (figura 16.18).

**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 el inciso *a)*. En el inciso *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. El tercer armónico de un tubo abierto 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 16.17a y 16.18a.

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 similar a una cuerda golpeada o punteada, como en la figura 15.28. 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.

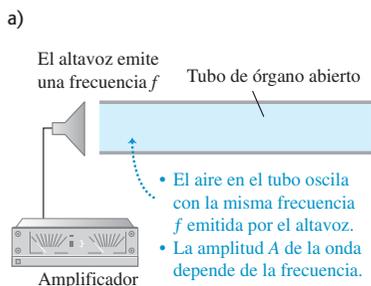
Hemos hablado de tubos de órgano, pero este análisis también es válido para otros instrumentos de viento. La flauta y la flauta dulce son directamente análogas. La diferencia más importante es que esos instrumentos tienen agujeros a lo largo del tubo. Al taparse y destaparse esos agujeros con los dedos, se modifica la longitud efectiva  $L$  de la columna de aire y por ello 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 *cerrado* (cerrado en el extremo de la lengüeta, abierto en el pabellón).

Las ecuaciones (16.18) y (16.22) indican que las frecuencias de cualquier instrumento de viento 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 cuando se incrementa la temperatura. Por lo tanto, el tono de los instrumentos de viento aumenta con la temperatura. Un órgano que tiene algunos tubos a una temperatura y otros a una temperatura distinta sonará desafinado.

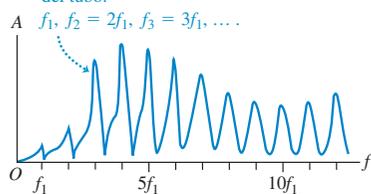
**Evalúe su comprensión de la sección 16.4** Si se conecta una manguera a un extremo de un tubo metálico y se introduce por ella aire comprimido, el tubo producirá un tono musical. Si en el tubo se inyecta helio comprimido a las mismas presión y temperatura, ¿el tubo producirá i) el mismo tono, ii) un tono más alto, o iii) un tono más bajo?



**16.19** a) Se obliga al aire dentro de un tubo abierto a resonar a la misma frecuencia que las ondas sonoras senoidales provenientes del altavoz. b) La curva de resonancia del tubo abierto representa la amplitud de la onda sonora estacionaria en el tubo en función de la frecuencia impulsora.



b) Curva de resonancia: gráfica de amplitud  $A$  contra frecuencia impulsora. Los picos ocurren en las frecuencias de modo normal del tubo:



## 16.5 Resonancia

Muchos sistemas mecánicos tienen modos normales de oscilación. Como vimos, tales sistemas incluyen columnas de aire (como en un tubo de órgano) y cuerdas estiradas (como en una guitarra; véase la sección 15.8). En cada modo, todas las partículas del sistema oscilan en movimiento armónico simple con la misma frecuencia que la del modo. Las columnas de aire y cuerdas estiradas tienen una serie infinita de modos normales; pero el concepto básico está íntimamente relacionado con el oscilador armónico simple, descrito en el capítulo 13, que sólo tiene un modo normal (es decir, sólo una frecuencia con la que oscila cuando se le perturba).

Suponga que aplicamos una fuerza que varía periódicamente a un sistema que puede oscilar. Así que se fuerza a éste a oscilar con una frecuencia igual a la frecuencia de la fuerza aplicada (llamada *frecuencia impulsora*). Este movimiento se denomina *oscilación forzada*. Ya hablamos de oscilaciones forzadas del oscilador armónico en la sección 13.8, y sugerimos repasar esa explicación. En particular, describimos el fenómeno de **resonancia** mecánica. Un ejemplo sencillo de resonancia es empujar al primo Morton en un columpio. El columpio es un péndulo; sólo tiene un modo normal, con una frecuencia determinada por su longitud. Si empujamos el columpio periódicamente con esta frecuencia, podemos acrecentar la amplitud del movimiento; pero si empujamos con una frecuencia muy distinta, el columpio casi no se moverá.

También hay resonancia cuando una fuerza que varía periódicamente se aplica a un sistema con muchos modos normales. Se muestra un ejemplo en la figura 16.19a. Un tubo de órgano abierto se coloca junto a un altavoz alimentado por un amplificador que emite ondas sonoras senoidales puras con frecuencia  $f$ , la cual puede variarse ajustando el amplificador. El aire del tubo es forzado a vibrar con la misma frecuencia  $f$  que la *fuerza impulsora* provista por el altavoz. En general, la amplitud de este

movimiento es relativamente pequeña y el movimiento del aire dentro del tubo no será ninguno de los patrones de modo normal de la figura 16.17; no obstante, si la frecuencia  $f$  de la fuerza es cercana a la frecuencia de uno de los modos normales, el aire en el tubo se moverá según el patrón de modo normal para esa frecuencia, y la amplitud puede aumentar mucho. La figura 16.19b muestra la amplitud de oscilación del aire en el tubo en función de la frecuencia impulsora  $f$ . La forma de esta gráfica se denomina **curva de resonancia** del tubo; tiene picos donde  $f$  es igual a las frecuencias de los modos normales del tubo. La forma detallada de la curva de resonancia depende de la geometría del tubo.

Si la frecuencia de la fuerza es exactamente *igual* a una frecuencia de modo normal, el sistema está en resonancia, y la amplitud de la oscilación forzada es máxima. Si no hubiera fricción ni otro mecanismo de disipación de la energía, una fuerza impulsora a una frecuencia de modo normal continuaría agregando energía al sistema, y la amplitud aumentaría indefinidamente. En tal caso idealizado, los picos de la curva de resonancia de la figura 16.19b serían infinitamente altos. En un sistema real, sin embargo, siempre hay disipación de energía, o amortiguación, como vimos en la sección 13.8; la amplitud de oscilación en resonancia puede ser grande, pero no infinita.

El “sonido del océano” que escuchamos cuando pegamos el oído a un caracol grande se debe a la resonancia. El ruido del aire exterior que roza el caracol es una mezcla de ondas sonoras de casi todas las frecuencias audibles, que obliga al aire dentro del caracol a oscilar. El caracol se comporta como un tubo de órgano, con una serie de frecuencias de modos normales; el aire interior oscila con más fuerza a esas frecuencias, produciendo el sonido característico del caracol. Para escuchar un fenómeno similar, destape una botella llena de su bebida preferida y sople al ras de la abertura. El ruido lo produce su aliento, y el “tubo de órgano” es la columna de aire dentro de la botella arriba de la superficie del líquido. Si toma un trago y repite el experimento, oír un tono más bajo porque el “tubo” es más largo y las frecuencias de modos normales son más bajas.

También hay resonancia cuando se hace oscilar una cuerda estirada (sección 15.8). Suponga que un extremo de una cuerda estirada se mantiene fijo, mientras al otro se imparte un movimiento senoidal transversal de amplitud pequeña, creando así ondas estacionarias. Si la frecuencia del mecanismo impulsor *no* es igual a una de las frecuencias de modo normal de la cuerda, la amplitud en los antinodos es pequeña; pero si la frecuencia es igual a cualquiera de las frecuencias de modo normal, la cuerda estará en resonancia y la amplitud en los antinodos será mucho mayor que en el extremo impulsado. Este último no es precisamente un nodo, aunque está mucho más cerca de un nodo que de un antinodo cuando la cuerda está en resonancia. Las fotografías de la figura 15.23 se obtuvieron así, con el extremo izquierdo de la cuerda fijo y el derecho oscilando verticalmente con pequeña amplitud; se obtuvieron ondas estacionarias de amplitud grande cuando la frecuencia de oscilación del extremo derecho fue igual a la frecuencia fundamental o a uno de los primeros tres sobretonos.

Es fácil demostrar la resonancia con un piano. Pise el pedal del amortiguador (el derecho) para que los amortiguadores se levanten y las cuerdas puedan vibrar libremente, luego cante un tono constante hacia el piano. Cuando deje de cantar, parecerá que el piano sigue cantando la misma nota. Las ondas sonoras de su voz excitan vibraciones en las cuerdas, cuyas frecuencias naturales son cercanas a las que estaban presentes (fundamental y armónicas) en la nota que usted cantó.

Un ejemplo más espectacular es cuando una cantante rompe una copa de cristal con su voz amplificadas. Una copa de buena calidad tiene frecuencias de modo normal que podemos escuchar dándole un golpecito. Si la cantante emite una nota fuerte con una frecuencia exactamente igual a una de estas frecuencias de modo normal, se pueden crear oscilaciones de gran amplitud que llegan a romper el cristal (figura 16.20).

La resonancia es un concepto muy importante, no sólo en los sistemas mecánicos sino en todas las áreas de la física. En el capítulo 31 veremos ejemplos de resonancia en circuitos eléctricos.

**16.20** La frecuencia del sonido de esta trompeta coincide exactamente con una de las frecuencias de modo normal de la copa. Las vibraciones resonantes de la copa tienen una amplitud tan grande que el cristal se hace añicos.



**Ejemplo 16.13 Dueto órgano-guitarra**

Un tubo de órgano cerrado se hace sonar cerca de una guitarra, haciendo que una de las cuerdas vibre con amplitud grande. Variamos la tensión de la cuerda hasta encontrar la amplitud máxima. La longitud de la cuerda es el 80% de la del tubo. Si tanto el tubo como la cuerda vibran en su frecuencia fundamental, calcule el cociente entre la rapidez de la onda en la cuerda y la del sonido en el aire.

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR:** La gran respuesta de la cuerda es un ejemplo de resonancia; se da porque el tubo y la cuerda tienen la misma frecuencia fundamental.

**PLANTEAR:** Si usamos los subíndices *a* y *s* para indicar el aire dentro del tubo y la cuerda, respectivamente, la condición de resonancia es  $f_{1a} = f_{1s}$ . La ecuación (16.20) da la frecuencia fundamental de un tubo cerrado; en tanto que la frecuencia fundamental de una cuerda de guitarra sujeta por ambos extremos está dada por la ecuación (15.32). En estas expresiones interviene la rapidez de la onda en el aire ( $v_a$ ) y en la

cuerda ( $v_s$ ), así como las longitudes del tubo y de la cuerda; nos dicen que  $L_s = 0.80L_a$ , y la incógnita es la razón  $v_s/v_a$ .

**EJECUTAR:** Por las ecuaciones (16.20) y (15.32),  $f_{1a} = v_a/4L_a$  y  $f_{1s} = v_s/2L_s$ . Igualando estas dos expresiones,

$$\frac{v_a}{4L_a} = \frac{v_s}{2L_s}$$

Sustituyendo  $L_s = 0.80 L_a$  y reacomodando,

$$\frac{v_s}{v_a} = 0.40$$

**EVALUAR:** Por ejemplo, si la rapidez del sonido en aire es de 345 m/s, la rapidez de la onda en la cuerda es (0.40) (345 m/s) = 138 m/s. Cabe señalar que, si bien las ondas estacionarias en el tubo y en la cuerda tienen la misma frecuencia, tienen diferente longitud de onda  $\lambda = v/f$  porque los dos medios tienen diferente rapidez de ondas *v*. ¿Cuál onda estacionaria tiene mayor longitud de onda?

**Evalúe su comprensión de la sección 16.5** Un tubo de órgano cerrado de longitud *L* tiene una frecuencia fundamental de 220 Hz. ¿En cuál de los siguientes tubos de órgano habrá una resonancia, si un diapasón con frecuencia de 660 Hz se hace sonar cerca del tubo? (Hay más de una respuesta correcta.) i) un tubo de órgano cerrado de longitud *L*; ii) un tubo de órgano cerrado de longitud 2*L*; iii) un tubo de órgano abierto de longitud *L*; iv) un tubo de órgano abierto de longitud 2*L*.



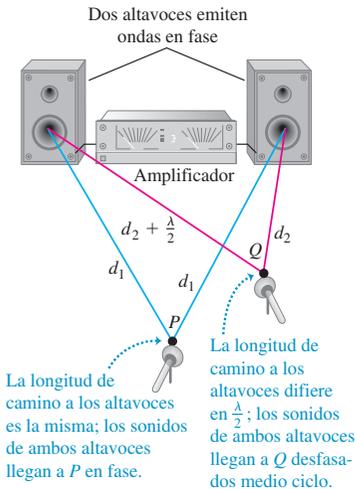
## 16.6 Interferencia de ondas

Los fenómenos ondulatorios que se presentan cuando dos o más ondas se traslapan en la misma región del espacio se agrupan bajo el concepto de *interferencia*. Como hemos visto, las ondas estacionarias son un ejemplo sencillo del efecto de interferencia: dos ondas que viajan en direcciones opuestas en un medio se combinan para producir un patrón de onda estacionaria con nodos y antinodos que no se mueven.

La figura 16.21 muestra un ejemplo de otro tipo de interferencia, que implica ondas que se propagan en el espacio. Dos altavoces, alimentados en fase por el mismo amplificador, emiten ondas sonoras senoidales idénticas con la misma frecuencia constante. Colocamos un micrófono en el punto *P*, equidistante de los altavoces. Las crestas de onda emitidas por los dos altavoces al mismo tiempo viajan distancias iguales y llegan a *P* al mismo tiempo; por lo tanto, las ondas llegan en fase, y hay interferencia constructiva. La amplitud total de la onda en *P* es el doble de la amplitud de cada onda individual, y podemos medir esta amplitud combinada con el micrófono.

Pasemos ahora el micrófono al punto *Q*, donde las distancias de los altavoces al micrófono difieren en media longitud de onda. Las dos ondas llegan *desfasadas* medio ciclo; una cresta positiva de un altavoz llega al mismo tiempo que una cresta negativa del otro. Hay interferencia destructiva, y la amplitud medida por el micrófono es mucho *menor* que cuando sólo está presente un altavoz. Si las amplitudes de los dos altavoces son iguales, las dos ondas se cancelan por completo en el punto *Q*, y la amplitud total ahí es cero.

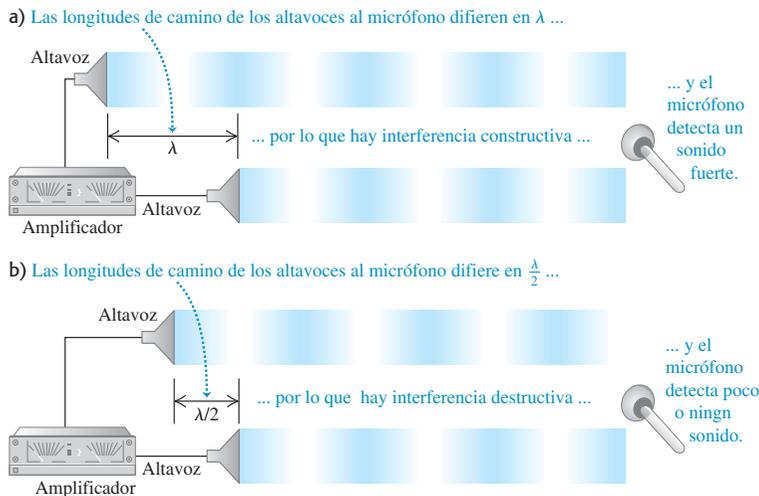
**16.21** Dos altavoces alimentados por el mismo amplificador. Hay interferencia constructiva en el punto *P*, e interferencia destructiva en el punto *Q*.



**CUIDAD** **Interferencia y ondas viajeras** Aunque esta situación se parece un poco a las ondas estacionarias en un tubo, la onda total de la figura 16.21 es una onda *viajera*, no estacionaria. Para entender por qué, recuerde que en una onda estacionaria no hay flujo neto de

energía en ninguna dirección. En cambio, en la figura 16.21 hay un flujo global de energía de los altavoces al aire circundante; esto es característico de las ondas viajeras. La interferencia entre las ondas de los dos altavoces simplemente hace que el flujo de energía se *canalice* en ciertas direcciones (por ejemplo, hacia *P*), alejándolo de otras direcciones (por ejemplo, de *Q*). Podemos ver otra diferencia entre la figura 16.21 y una onda estacionaria si consideramos un punto, como *Q*, donde se presenta interferencia destructiva. Tal punto es *tanto* un nodo de desplazamiento *como* un nodo de presión, ya que no hay onda en este punto. Compare esto con una onda estacionaria, en la que un nodo de presión es un antinodo de desplazamiento, y viceversa. ■

Hay interferencia constructiva siempre que las distancias recorridas por las dos ondas difieren en un número entero de longitudes de onda,  $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ ; en todos estos casos, las ondas llegan al micrófono en fase (figura 16.22a). Si las distancias de los dos altavoces al micrófono difieren en cualquier número semientero de longitudes de onda,  $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$ , las ondas llegan al micrófono desfasadas y habrá interferencia destructiva (figura 16.22b). En este caso, poca o ninguna energía sonora fluye hacia el micrófono directamente enfrente de los altavoces. En vez de ello, la energía se dirige hacia los lados, donde hay interferencia constructiva.



**16.22** Dos altavoces, alimentados por el mismo amplificador, que emiten ondas en fase. Sólo se muestran las ondas dirigidas hacia el micrófono, y se han separado por claridad. a) Hay interferencia constructiva cuando la diferencia de camino es  $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  b) Hay interferencia destructiva cuando la diferencia de camino es  $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$

**Ejemplo 16.14 Interferencia de altavoces**

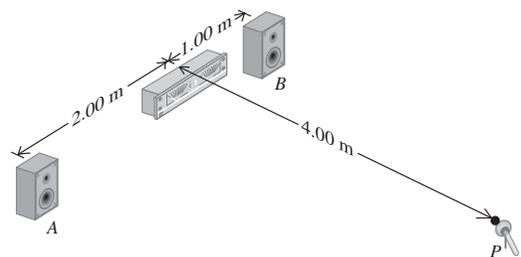
Dos altavoces pequeños, *A* y *B* (figura 16.23), son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales puras en fase. Si la rapidez del sonido es de 350 m/s, a) ¿para qué frecuencias se presenta interferencia constructiva en el punto *P*? b) ¿E interferencia destructiva?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR:** La naturaleza de la interferencia en *P* depende de la diferencia en las longitudes de camino de los puntos *A* y *B* a *P*, y la relación entre esa diferencia y la longitud de onda.

**PLANTEAR:** Calculamos las distancias de *A* a *P* y de *B* a *P* con el teorema de Pitágoras. Hay interferencia constructiva cuando la diferencia

**16.23** ¿Qué tipo de interferencia ocurre en *P*?



entre esas distancias es un número entero de longitudes de onda; hay interferencia destructiva cuando esa diferencia es un número semientero de longitudes de onda. Para obtener las frecuencias correspondientes, usamos la relación  $v = f\lambda$ .

**EJECUTAR:** La distancia del altavoz  $A$  a  $P$  es  $[(2.00 \text{ m})^2 + (4.00 \text{ m})^2]^{1/2} = 4.47 \text{ m}$ ; la distancia de  $B$  a  $P$  es  $[(1.00 \text{ m})^2 + (4.00 \text{ m})^2]^{1/2} = 4.12 \text{ m}$ . La diferencia entre los caminos es  $d = 4.47 \text{ m} - 4.12 \text{ m} = 0.35 \text{ m}$ .

a) Hay interferencia constructiva cuando la diferencia de trayecto  $d$  es  $d = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$  es decir,  $d = 0, v/f, 2v/f, \dots = nv/f$ . Por lo tanto, las posibles frecuencias son

$$f_n = \frac{nv}{d} = n \frac{350 \text{ m/s}}{0.35 \text{ m}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$= 1000 \text{ Hz}, 2000 \text{ Hz}, 3000 \text{ Hz}, \dots$$

b) Hay interferencia destructiva cuando la diferencia de camino es  $d = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$  es decir,  $d = v/2f, 3v/2f, 5v/2f, \dots$ . Las posibles frecuencias son

$$f_n = \frac{nv}{2d} = n \frac{350 \text{ m/s}}{2(0.35 \text{ m})} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$= 500 \text{ Hz}, 1500 \text{ Hz}, 2500 \text{ Hz}, \dots$$

**EVALUAR:** Conforme aumentemos la frecuencia, el sonido en  $P$  alternará entre amplitudes grandes y pequeñas; los máximos y mínimos estarán en las frecuencias que calculamos. Suele ser difícil notar este efecto en un recinto ordinario a causa de las múltiples reflexiones de paredes, piso y techo. El mejor lugar para hacer este experimento es en exteriores o en una cámara anecoica, cuyas paredes absorben casi todo el sonido y así eliminan las reflexiones.

Experimentos muy parecidos al del ejemplo 16.14, pero usando luz, han proporcionado tanto pruebas convincentes de la naturaleza ondulatoria de la luz, como una forma de medir sus longitudes de onda. Veremos estos experimentos con detalle en el capítulo 35.

Se usan efectos de interferencia para controlar el ruido de fuentes de sonido intenso como las plantas de electricidad de turbinas de gas o las celdas de prueba de motores a reacción. La idea es usar fuentes de sonido adicionales que, en algunas regiones del espacio, interfieren destructivamente con el sonido indeseable y lo cancelan. Micrófonos en el área controlada alimentan señales de vuelta a las fuentes de sonido, que se ajustan continuamente para una cancelación óptima del ruido en el área controlada.

**Evalúe su comprensión de la sección 16.6** Suponga el altavoz  $A$  en la figura 16.23 emite una onda sonora senoidal con frecuencia de 500 Hz, y el altavoz  $B$  emite una onda sonora senoidal con frecuencia de 1000 Hz. ¿Qué clase de interferencia habrá entre estas dos ondas? i) interferencia constructiva en varios puntos, incluyendo el punto  $P$ , y destructiva en varios otros puntos; ii) interferencia destructiva en varios puntos, incluyendo el punto  $P$ , y constructiva en otros varios puntos; iii) ni i) ni ii).

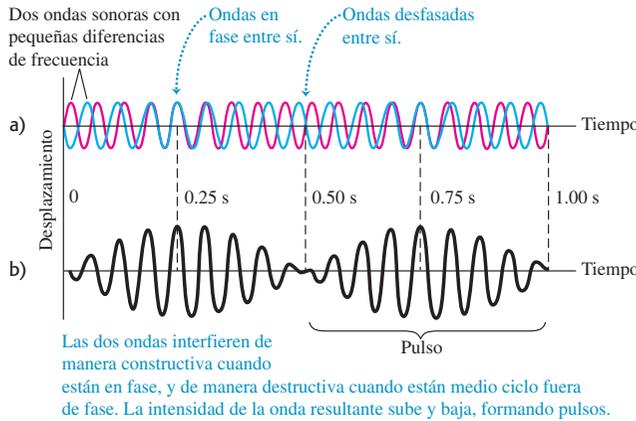
## 16.7 Pulsos

En la sección 16.6 hablamos de efectos de *interferencia* que se presentan cuando dos ondas distintas con la misma frecuencia se traslapan en la misma región del espacio. Veamos ahora lo que sucede cuando tenemos dos ondas de la misma amplitud, pero frecuencias ligeramente distintas. Esto ocurre, por ejemplo, cuando dos diapasones con frecuencias un poco diferentes se suenan juntos, o cuando dos tubos de órgano que supuestamente deben tener la misma frecuencia están un poco “desafinados”.

Considere un punto en el espacio donde las dos ondas se traslapan. En la figura 16.24a, se grafican los desplazamientos de las ondas individuales en este punto en función del tiempo. La longitud total del eje del tiempo representa un segundo, y las frecuencias son 16 Hz (azul) y 18 Hz (rojo). Aplicando el principio de superposición, sumamos los dos desplazamientos en cada instante para obtener el desplazamiento total en ese instante. El resultado es la curva de la figura 16.24b. En ciertos momentos, las ondas están en fase; sus máximos coinciden y sus amplitudes se suman. Sin embargo, debido a la pequeña diferencia entre sus frecuencias, las dos ondas no pueden estar en fase todo el tiempo. Efectivamente, en ciertos instantes (como  $t = 0.50 \text{ s}$  en la figura 16.24), las dos ondas están completamente *desfasadas*. Las ondas se cancelan y la amplitud total es cero.

La onda resultante en la figura 16.24b semeja una onda senoidal con amplitud variable que va de un máximo a cero y repite. En este ejemplo, la amplitud pasa por dos





**16.24** Los pulsos son fluctuaciones de la amplitud producidas por dos ondas sonoras con pequeñas diferencias de frecuencia (16 Hz y 18 Hz, en este ejemplo). a) Ondas individuales. b) Onda resultante formada por superposición de las dos ondas. La frecuencia del pulso  $18 \text{ Hz} - 16 \text{ Hz} = 2 \text{ Hz}$ .

máximos y dos mínimos en 1 s, así que la frecuencia de esta variación de amplitud es de 2 Hz. La variación de amplitud causa variaciones de volumen llamados **pulsos**, y la frecuencia con que varía el volumen es la **frecuencia del pulso**. En este ejemplo, la frecuencia del pulso es la *diferencia* de las dos frecuencias. Si la frecuencia del pulso es de unos cuantos hertz, la oímos como una ondulación o un pulso del tono.

Podemos demostrar que la frecuencia del pulso *siempre* es la diferencia de las dos frecuencias  $f_a$  y  $f_b$ . Suponga que  $f_a$  es mayor que  $f_b$ ; los periodos correspondientes son  $T_a$  y  $T_b$ , con  $T_a < T_b$ . Si las dos ondas inician desfasadas en  $t = 0$ , volverán a estar en fase cuando la primera onda haya pasado por exactamente un ciclo más que la segunda. Esto sucederá en  $t = T_{\text{pulso}}$ , el *periodo* del pulso. Sea  $n$  el número de ciclos de la primera onda en un tiempo  $T_{\text{pulso}}$ ; el número de ciclos de la segunda onda en el mismo tiempo es  $(n - 1)$ , y tenemos las relaciones

$$T_{\text{pulso}} = nT_a \quad \text{y} \quad T_{\text{pulso}} = (n - 1)T_b$$

Eliminando  $n$  entre estas dos ecuaciones:

$$T_{\text{pulso}} = \frac{T_a T_b}{T_b - T_a}$$

El recíproco del periodo de pulso es la *frecuencia* del pulso,  $f_{\text{pulso}} = 1/T_{\text{pulso}}$ ; así que

$$f_{\text{pulso}} = \frac{T_b - T_a}{T_a T_b} = \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b}$$

y por último

$$f_{\text{pulso}} = f_a - f_b \quad (\text{frecuencia del pulso}) \quad (16.24)$$

Como dijimos, la frecuencia del pulso es la diferencia de las dos frecuencias. Al usar la ecuación (16.24), recuerde que  $f_a$  es la frecuencia más alta.

Otra forma de deducir la ecuación (16.24) es escribir funciones que describan las curvas de la figura 16.24a y luego sumarlas. Suponga que, en cierta posición, las dos ondas están dadas por  $y_a(t) = A \text{ sen } 2\pi f_a t$  y  $y_b(t) = -A \text{ sen } 2\pi f_b t$ . Usamos la identidad trigonométrica

$$\text{sen } a - \text{sen } b = 2 \text{ sen } \frac{1}{2}(a - b) \cos \frac{1}{2}(a + b)$$

Ahora podemos expresar la onda total  $y(t) = y_a(t) + y_b(t)$  como

$$y_a(t) + y_b(t) = \left[ 2A \text{ sen } \frac{1}{2}(2\pi)(f_a - f_b)t \right] \cos \frac{1}{2}(2\pi)(f_a + f_b)t$$

**16.25** Si las dos hélices de este avión no se sincronizan con precisión, los pilotos, pasajeros y escuchas en tierra oirán pulsos.



El factor amplitud (en corchetes) varía lentamente con la frecuencia  $\frac{1}{2}(f_a - f_b)$ . El factor coseno varía con la frecuencia *media*  $\frac{1}{2}(f_a + f_b)$ . El *cuadrado* del factor amplitud, que es proporcional a la intensidad que el oído percibe, pasa por dos máximos y dos mínimos por ciclo. Así, la frecuencia del pulso  $f_{\text{pulso}}$  que se escucha es dos veces la cantidad  $\frac{1}{2}(f_a - f_b)$ , es decir,  $f_a - f_b$ , en concordancia con la ecuación (16.24).

Se pueden escuchar pulsaciones entre dos tonos hasta una frecuencia del pulso de 6 o 7 Hz. Dos cuerdas de piano o dos tubos de órgano que difieren en su frecuencia en 2 o 3 Hz suenan temblorosos y “desafinados”, aunque algunos registros de órgano contienen dos juegos de tubos deliberadamente afinados a frecuencias del pulso de 1 o 2 Hz, para dar un suave efecto ondulante. Tratar de detectar pulsos es una técnica importante al afinar todos los instrumentos musicales.

Con diferencias de frecuencia mayores que 6 o 7 Hz, ya no oímos pulsos individuales, y la sensación se funde en una de *consonancia* o *disonancia*, según la relación de frecuencia de los dos tonos. En algunos casos, el oído percibe un tono llamado *tono de diferencia*, igual a la frecuencia del pulso de los dos tonos. Por ejemplo, si escuchamos un silbato que produce sonidos a 1800 Hz y 1900 Hz, oiremos no sólo estos tonos, sino también un tono mucho más grave que 100 Hz.

Los motores de avión con varias hélices deben sincronizarse de modo que los sonidos de hélice no causen pulsos molestos, que se escuchan como fuertes sonidos pulsantes (figura 16.25). En algunos aviones, esto se hace por medios electrónicos; en otros, el piloto lo hace por oído, como si afinara un piano.

**Evalúe su comprensión de la sección 16.7** Un diapasón vibra a 440 Hz, mientras que otro lo hace a una frecuencia desconocida. Cuando ambos diapasones se hacen sonar de modo simultáneo, se escucha un tono que sube y baja en intensidad tres veces cada segundo. ¿Cuál es la frecuencia del segundo diapasón? i) 434 Hz; ii) 437 Hz; iii) 443 Hz; iv) 446 Hz; v) ya sea 434 Hz o 446 Hz; vi) ya sea 437 Hz o 443 Hz.



10.8 Efecto Doppler: introducción conceptual  
10.9 Efecto Doppler: problemas

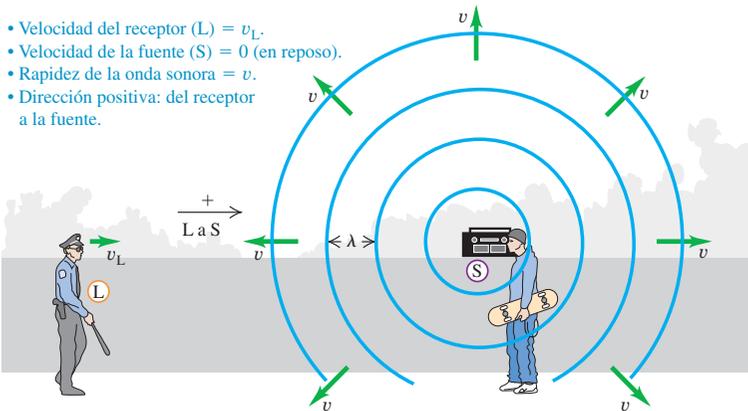
## 16.8 El efecto Doppler

Quizás usted 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 en esta sección.

Con la finalidad 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 se propagan las ondas sonoras. 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  $v_s$  y  $v_L$  las componentes de velocidad en esta línea de la fuente (*source*) y el receptor (*listener*), respectivamente, relativas al medio. Elegimos como dirección positiva la que va del receptor L a la fuente S. La rapidez del sonido relativa al medio  $v$  siempre se considera positiva.

### Receptor en movimiento

Imaginemos primero un receptor L que se mueve con velocidad  $v_L$  hacia una fuente estacionaria S (figura 16.26). La fuente emite una onda sonora con frecuencia  $f_S$  y longitud de onda  $\lambda = v/f_S$ . La figura muestra varias crestas de onda, separadas por distancias iguales  $\lambda$ . Las crestas que se acercan al receptor en movimiento tie-



- Velocidad del receptor (L) =  $v_L$ .
- Velocidad de la fuente (S) = 0 (en reposo).
- Rapidez de la onda sonora =  $v$ .
- Dirección positiva: del receptor a la fuente.

**16.26** Un receptor que se mueve hacia una fuente estacionaria oye una frecuencia más alta que la frecuencia fuente, porque la rapidez de la onda relativa al receptor es mayor que la rapidez de la onda relativa al medio  $v$ .

nen una rapidez de propagación *relativa al receptor* de  $(v + v_L)$ , así que la frecuencia  $f_L$  con que llegan a la posición del receptor (esto es, la frecuencia que el receptor oye) es

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda} = \frac{v + v_L}{v/f_S} \tag{16.25}$$

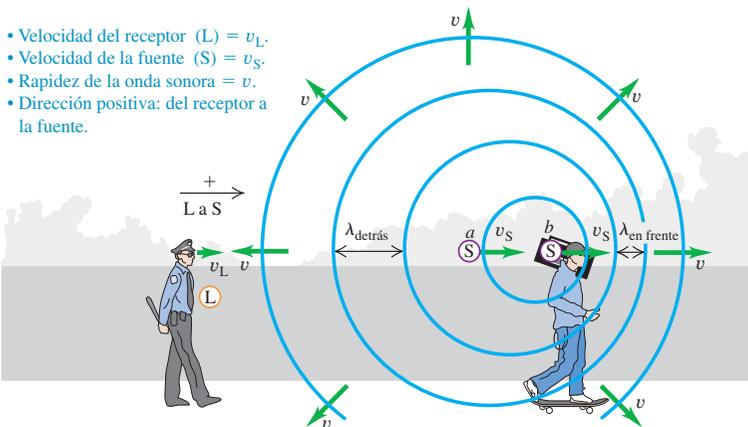
o bien,

$$f_L = \left(\frac{v + v_L}{v}\right)f_S = \left(1 + \frac{v_L}{v}\right)f_S \quad \text{(receptor móvil, fuente estacionaria)} \tag{16.26}$$

Así, un receptor que se mueve hacia una fuente ( $v_L > 0$ ), como en la figura 16.26, oye una frecuencia más alta (tono más agudo) que un receptor estacionario. Un receptor que se aleja de la fuente ( $v_L < 0$ ) oye una frecuencia más baja (tono más grave).

### Fuente en movimiento y receptor en movimiento

Suponga ahora que la fuente también se mueve, con velocidad  $v_S$  (figura 16.27). 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. Sin embargo, la longitud de onda ya no es igual a  $v/f_S$ ; veamos por qué. El tiempo que tarda en emitirse un ciclo de la onda es el periodo  $T = 1/f_S$ . Durante este tiempo, la onda viaja una distancia  $vT = v/f_S$  y la fuente se mueve una distancia  $v_S T = v_S/f_S$ . 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 16.27, éste es diferente adelante y atrás



- Velocidad del receptor (L) =  $v_L$ .
- Velocidad de la fuente (S) =  $v_S$ .
- Rapidez de la onda sonora =  $v$ .
- Dirección positiva: del receptor a la fuente.

**16.27** 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).

de la fuente. En la región a la derecha de la fuente en la figura 16.27 (es decir, adelante de la fuente), la longitud de onda es

$$\lambda_{\text{al frente}} = \frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s} = \frac{v - v_s}{f_s} \quad (\text{longitud de onda adelante de una fuente móvil}) \quad (16.27)$$

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

$$\lambda_{\text{detrás}} = \frac{v + v_s}{f_s} \quad (\text{longitud de onda atrás de una fuente móvil}) \quad (16.28)$$

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

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

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda_{\text{detrás}}} = \frac{v + v_L}{(v + v_s)/f_s}$$

$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_s} f_s \quad (\text{efecto Doppler, fuente móvil y receptor móvil}) \quad (16.29)$$

**16.28** El efecto Doppler explica por qué la sirena de un carro de bomberos o de una ambulancia tiene un tono alto ( $f_L > f_s$ ) cuando se acerca ( $v_s < 0$ ) y un tono bajo ( $f_L < f_s$ ) cuando se aleja ( $v_s > 0$ ).



Esto expresa la frecuencia  $f_L$  oída por el receptor en términos de la frecuencia  $f_s$  de la fuente.

Aunque lo dedujimos para la situación específica de la figura 16.27, 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,  $v_L = 0$ . Cuando la fuente y el receptor están en reposo o tienen la misma velocidad relativa al medio, entonces  $v_L = v_s$  y  $f_L = f_s$ . Siempre que la dirección de la velocidad de la fuente o del receptor sea 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.

Como ejemplo, la frecuencia oída por un receptor en reposo ( $v_L = 0$ ) es  $f_L = [v/(v + v_s)]f_s$ . Si la fuente se mueve hacia el receptor (en la dirección negativa), entonces  $v_s < 0$ ,  $f_L > f_s$ , y el receptor escucha una frecuencia mayor que la emitida por la fuente. En cambio, si la fuente se mueve alejándose del receptor (en la dirección positiva), entonces  $v_s > 0$ ,  $f_L < f_s$ , y el receptor oye una frecuencia menor. Esto explica el cambio de tono que se escucha cuando la sirena de una ambulancia pasa cerca de usted (figura 16.28).

## Estrategia para resolver problemas 16.2 Efecto Doppler



**IDENTIFICAR** *los conceptos relevantes:* 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 S para la fuente (*source*), L para el receptor (*listener*).
3. Determine cuáles son las incógnitas.

**EJECUTAR** *la solución* de la siguiente manera:

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  $f_L$ . Luego, considere la superficie como nueva fuente, que emite ondas con esta misma frecuencia  $f_L$ . Por último, determine qué frecuencia oye un receptor que detecta esta nueva onda.

**EVALUAR** *la respuesta:* Vea si su resultado final es lógico. Si la fuente y el receptor se están acercando entre sí,  $f_L > f_s$ ; si se están alejando,  $f_L < f_s$ . Si la fuente y el receptor no tienen movimiento relativo,  $f_L = f_s$ .

**Ejemplo 16.15 Efecto Doppler I: Longitudes de onda**

Una sirena policiaca emite una onda senoidal con frecuencia  $f_s = 300$  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, o bien, 67 mi/h), calcule las longitudes de onda para las ondas adelante y atrás de la fuente.

**SOLUCIÓN**

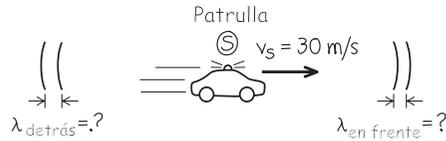
**IDENTIFICAR:** El efecto Doppler no interviene en el inciso *a)*, ya que ni la fuente ni el receptor están en movimiento. En el inciso *b)*, la fuente está en movimiento, así que deberemos considerar el efecto Doppler.

**PLANTEAR:** La figura 16.29 muestra la situación. Usamos la relación  $v = \lambda f$  para determinar la longitud de onda cuando la sirena está en reposo. Cuando está en movimiento, obtenemos la longitud de onda a cada lado de la sirena usando las ecuaciones (16.27) y (16.28).

**EJECUTAR:** *a)* Cuando la fuente está en reposo,

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

**16.29** Nuestro esquema de este problema.



*b)* La situación se muestra en la figura 16.29. Por la ecuación (16.27), delante de la sirena,

$$\lambda_{\text{al frente}} = \frac{v - v_s}{f_s} = \frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1.03 \text{ m}$$

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

$$\lambda_{\text{detrás}} = \frac{v + v_s}{f_s} = \frac{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1.23 \text{ m}$$

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

**Ejemplo 16.16 Efecto Doppler II: Frecuencias**

Si un receptor L está en reposo y la sirena del ejemplo 16.15 se aleja de L a 30 m/s, ¿qué frecuencia oye el receptor?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR:** Nuestra incógnita es la frecuencia  $f_L$  que escucha el receptor, quien está detrás de la fuente móvil.

**PLANTEAR:** La figura 16.30 muestra la situación. Conocemos  $f_s = 300$  Hz por el ejemplo 16.15, y tenemos  $v_L = 0$  y  $v_s = 30$  m/s. (La

velocidad de la fuente  $v_s$  es positiva porque la sirena se mueve en la dirección que va del receptor a la fuente.)

**EJECUTAR:** Por la ecuación (16.29),

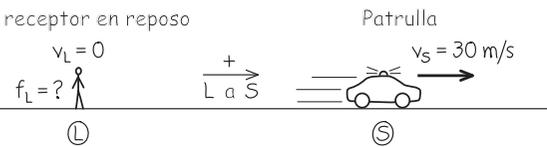
$$f_L = \frac{v}{v + v_s} f_s = \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 276 \text{ Hz}$$

**EVALUAR:** La fuente y el receptor se están separando, así que la frecuencia  $f_L$  oída por el receptor es menor que la frecuencia  $f_s$  emitida por la fuente.

Veamos otro enfoque que nos puede servir para comprobar nuestro resultado. Por el ejemplo 16.15, la longitud de onda detrás de la fuente (que es donde está parado el receptor de la figura 16.30) es 1.23 m, así que

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

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



**Ejemplo 16.17 Efecto Doppler III: Un receptor móvil**

Si la sirena está en reposo y el receptor se mueve alejándose de la sirena a 30 m/s, ¿qué frecuencia oye?

**SOLUCIÓN**

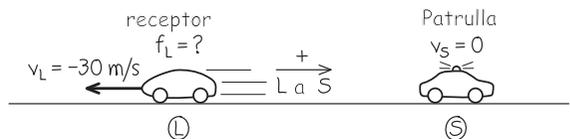
**IDENTIFICAR:** De nuevo nuestra variable es la frecuencia  $f_L$  escuchada por el receptor, pero ahora el receptor está en movimiento y la fuente está en reposo.

**PLANTEAR:** La figura 16.31 muestra la situación. La dirección positiva (del receptor a la fuente) sigue siendo de izquierda a derecha, así que  $v_L = -30$  m/s.

**EJECUTAR:** Por la ecuación (16.29),

$$f_L = \frac{v + v_L}{v} f_s = \frac{340 \text{ m/s} + (-30 \text{ m/s})}{340 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 274 \text{ Hz}$$

**16.31** Nuestro esquema de este problema.



**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.

### Ejemplo 16.18 Efecto Doppler IV: Fuente en movimiento, receptor en movimiento

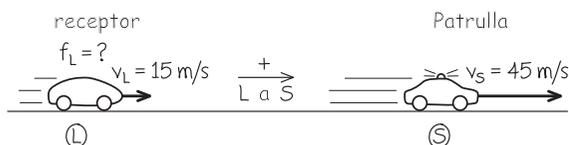
Si la sirena se está alejando del receptor con una rapidez de 45 m/s relativa al aire, y el receptor se mueve hacia la sirena con una rapidez de 15 m/s relativa al aire (figura 16.33), ¿qué frecuencia oye el escucha?

#### SOLUCIÓN

**IDENTIFICAR:** Ahora *tanto* el receptor *como* la fuente están en movimiento. Una vez más, la incógnita es la frecuencia  $f_L$  escuchada por el receptor.

**PLANTEAR:** La figura 16.32 muestra la situación. Tanto la velocidad de la fuente  $v_s = 45$  m/s y la velocidad del receptor  $v_L = 15$  m/s son

**16.32** Nuestro esquema para este problema.



positivas porque los vectores apuntan en la dirección del receptor a la fuente).

**EJECUTAR:** Usamos otra vez la ecuación (16.29) para obtener

$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_s} f_s = \frac{340 \text{ m/s} + 15 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 45 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 277 \text{ Hz}$$

**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  $f_L$  es menor o mayor que  $f_s$ ) depende del movimiento relativo entre 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.

### Ejemplo 16.19 Efecto Doppler V: Un cambio Doppler doble

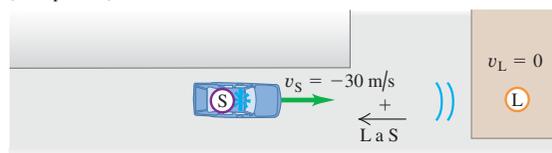
La patrulla con su sirena de 300 Hz se mueve hacia una bodega a 30 m/s, intentando atravesar su puerta. ¿Qué frecuencia escucha el conductor reflejada de la bodega?

#### SOLUCIÓN

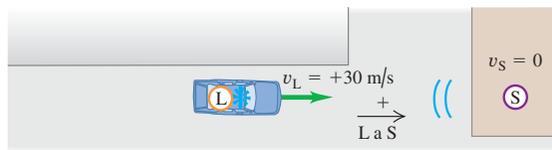
**IDENTIFICAR:** En esta situación, hay *dos* cambios Doppler, como se muestra en la figura 16.33. En el primero, la bodega es el “receptor”

**16.33** Dos etapas del movimiento de la onda sonora desde la patrulla hacia la bodega y de regreso a la patrulla.

a) El sonido viaja de la sirena de la patrulla (fuente S) a la bodega (“receptor” L)



b) El sonido reflejado viaja de la bodega (fuente S) a la patrulla (receptor L)



estacionario. La frecuencia del sonido que llega a la bodega (*warehouse*), que llamamos  $f_w$ , es mayor que 300 Hz porque la fuente se aproxima. En el segundo cambio, la bodega actúa como fuente de un sonido con frecuencia  $f_w$ , y el receptor es el conductor de la patrulla, quien oye una frecuencia mayor que  $f_w$  porque se está acercando a la fuente.

**PLANTEAR:** Para determinar  $f_w$ , usamos la ecuación (16.29) cambiando  $f_L$  por  $f_w$ . En esta parte del problema,  $v_L = v_w = 0$  (la bodega está en reposo) y  $v_s = -30$  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 de nuevo la ecuación (16.29), pero ahora cambiando  $f_s$  por  $f_w$ . En esta segunda parte del problema,  $v_s = 0$  porque la bodega estacionaria es la fuente y la velocidad del receptor (el conductor) es  $v_L = +30$  m/s (positiva porque va del receptor a la fuente).

**EJECUTAR:** La frecuencia que llega a la bodega es

$$f_w = \frac{v}{v + v_s} f_s = \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + (-30 \text{ m/s})} (300 \text{ Hz}) = 329 \text{ Hz}$$

Entonces, la frecuencia que el conductor oye es

$$f_L = \frac{v + v_L}{v} f_w = \frac{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} (329 \text{ Hz}) = 358 \text{ Hz}$$

**EVALUAR:** Como hay dos cambios Doppler, el sonido reflejado que el conductor oye tiene una frecuencia aún más alta que el oído por un receptor estacionario en la bodega.

## Efecto Doppler para ondas electromagnéticas

En el efecto Doppler para el sonido, las velocidades  $v_L$  y  $v_s$  siempre se miden relativas al *aire* o al medio que consideramos. También hay un efecto Doppler para ondas *electromagnéticas* en el espacio vacío, como las de luz o de radio. En este caso, no

hay medio que podamos usar como referencia para medir velocidades, y lo único que importa es la velocidad *relativa* entre la fuente y el receptor. (En contraste, el efecto Doppler para el sonido no depende simplemente de esta velocidad relativa, como vimos en el ejemplo 16.18.)

Para deducir la expresión del cambio de frecuencia Doppler para la luz, tenemos que usar la teoría especial de la relatividad. Explicaremos esta teoría en el capítulo 37, pero por ahora citaremos el resultado sin deducirlo. La rapidez de onda es la rapidez de la luz, denotada con  $c$ , y es la misma para la fuente y el receptor. En el marco de referencia en el que el receptor está en reposo, la fuente se aleja del receptor con velocidad  $v$ . (Si la fuente se *acerc*a al receptor,  $v$  es negativa.) La frecuencia fuente es otra vez  $f_s$ . La frecuencia  $f_R$  medida por el receptor R (la frecuencia con que llegan las ondas al receptor) está dada por

$$f_R = \sqrt{\frac{c - v}{c + v}} f_s \quad (\text{efecto Doppler para la luz}) \quad (16.30)$$

Si  $v$  es positiva, la fuente se *aleja* directamente del receptor y  $f_R$  siempre es menor que  $f_s$ ; si  $v$  es negativa, la fuente se mueve directamente *hacia* el receptor y  $f_R$  es *mayor* que  $f_s$ . El efecto cualitativo es el mismo que con el sonido, pero la relación cuantitativa es diferente.

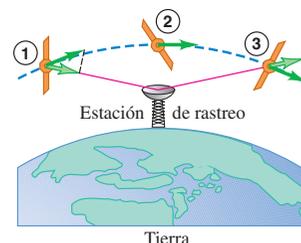
Una aplicación conocida del efecto Doppler para ondas de radio es el radar montado en la ventana de una patrulla de policía para verificar la rapidez de otros vehículos. La onda electromagnética emitida por el dispositivo se refleja de un auto en movimiento, que actúa como fuente móvil, y la onda reflejada hacia el dispositivo sufre un cambio Doppler de frecuencia. Las señales transmitida y reflejada se combinan para producir pulsos, y la rapidez se puede calcular a partir de la frecuencia de los pulsos. Se usan técnicas similares (“radar Doppler”) para medir velocidades del viento en la atmósfera.

El efecto Doppler también se usa para rastrear satélites y otros vehículos espaciales. En la figura 16.34, un satélite emite una señal de radio de frecuencia constante  $f_s$ . Al pasar el satélite en su órbita, primero se acerca y luego se aleja del receptor; la frecuencia  $f_R$  de la señal recibida en tierra cambia de un valor mayor que  $f_s$  a uno menor cuando el satélite pasa por arriba.

El efecto Doppler para ondas electromagnéticas, incluida la luz visible, es importante en astronomía. Los astrónomos comparan las longitudes de onda de la luz de estrellas distantes con las emitidas por los mismos elementos en la Tierra. Por ejemplo, en un sistema estelar binario, con dos estrellas en órbita alrededor de su centro de masa común, la luz se desplaza a frecuencias más altas cuando una estrella se mueve hacia un observador en la Tierra y a más bajas cuando se aleja. La medición de estos cambios Doppler de frecuencia da información acerca de las órbitas y las masas de las estrellas que constituyen el sistema binario.

La luz de la mayoría de las galaxias está desplazada hacia el extremo de mayor longitud de onda (rojo) del espectro visible, efecto llamado *desplazamiento* o *corrimiento al rojo*. Esto suele describirse como un efecto Doppler debido al alejamiento de las galaxias pero; no obstante, desde el punto de vista de la teoría general de la relatividad, es algo mucho más fundamental, asociado a la expansión del espacio mismo. Las galaxias distantes tienen desplazamientos al rojo grandes, porque su luz ha estado viajando mucho tiempo y su longitud de onda ha compartido la expansión del espacio por la que se propagó. Una extrapolación de esta expansión hacia atrás 13,700 millones de años nos lleva a la imagen del “Big Bang”. Desde esta perspectiva, el Big Bang no fue una explosión en el espacio, sino la rápida expansión inicial del espacio mismo.

**16.34** Cambio de la componente de velocidad a lo largo de la línea visual de un satélite que pasa por una estación de rastreo. La frecuencia recibida en la estación cambia de alta a baja cuando el satélite pasa por arriba.



**Evalúe su comprensión de la sección 16.8** Imagine que está en un concierto al aire libre y que el viento sopla a 10 m/s de los músicos hacia usted. ¿El sonido que escucha ha sufrido un cambio Doppler? Si acaso, ¿se desplazó a frecuencias más bajas o más altas?

## \*16.9 Ondas de choque

El lector tal vez haya experimentado “estampidos sónicos” causados por un avión que pasa volando con una rapidez mayor que la del sonido. La figura 16.35 muestra cualitativamente por qué sucede esto. Denotemos con  $v_S$  la *rapidez* del avión relativa al aire, que siempre es positiva. El movimiento del avión en el aire produce sonido; si  $v_S$  es menor que la rapidez del sonido  $v$ , las ondas delante del avión se apretarán con una longitud de onda dada por la ecuación (16.27):

$$\lambda_{\text{enfrente}} = \frac{v - v_S}{f_S}$$

Conforme la rapidez del avión  $v_S$  se acerca a la rapidez del sonido  $v$ , la longitud de onda se acerca a cero y las crestas de la onda se apilan (figura 16.35a). El avión debe ejercer una fuerza grande para comprimir el aire frente a él; por la tercera ley de Newton, el aire ejerce una fuerza igualmente grande sobre el avión; por lo tanto, hay un aumento considerable en el arrastre aerodinámico (resistencia del aire) conforme el avión se acerca a la rapidez del sonido; se trata de un fenómeno llamado “barrera del sonido”.

Cuando  $v_S$  es mayor en magnitud que  $v$ , la fuente del sonido es **supersónica**, y las ecuaciones (16.27) y (16.29) para el efecto Doppler ya no describen la onda sonora al frente de la fuente. La figura 16.35b muestra un corte transversal de lo que sucede. Al avanzar el avión, desplaza el aire circundante y produce sonido. La punta del avión emite una serie de crestas de onda; cada una se expande en un círculo centrado en la posición del avión cuando emitió esa cresta. Después de un tiempo  $t$ , la cresta emitida de un punto  $S_1$  se extendió a un círculo de radio  $vt$ , y el avión se ha movido una distancia mayor  $v_S t$ , a la posición  $S_2$ . Podemos ver que las crestas circulares se interfieren constructivamente en puntos a lo largo de la línea azul que forma un ángulo  $\alpha$  con la dirección de la velocidad del avión, dando lugar a una cresta de onda de amplitud muy grande sobre la línea. Esta cresta se llama **onda de choque** (figura 16.35c).

Por el triángulo rectángulo de la figura 16.35b, vemos que el ángulo  $\alpha$  está dado por

$$\sin \alpha = \frac{vt}{v_S t} = \frac{v}{v_S} \quad (\text{onda de choque}) \quad (16.31)$$

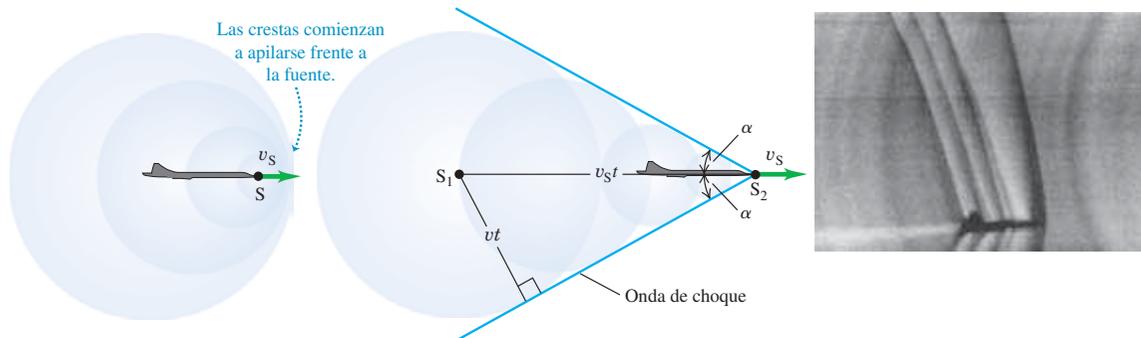
En esta relación,  $v_S$  es la *rapidez* de la fuente (la magnitud de su velocidad) relativa al aire y siempre es positiva. La relación  $v_S/v$  se llama **número de Mach**; es mayor que 1 para todas las rapideces supersónicas, y  $\sin \alpha$  en la ecuación (16.31) es su recíproco. El primer ser humano que rompió la barrera del sonido fue el capitán Chuck

**16.35** Crestas de onda alrededor de una fuente de sonido  $S$  que se mueve a) ligeramente más lento que la rapidez del sonido  $v$  y b) más rápido que la rapidez del sonido  $v$ . c) La fotografía muestra un jet T-38 que se mueve a 1.1 veces la rapidez del sonido. Las ondas de choque individuales son producidas por la punta, las alas y la cola. Los ángulos de estas ondas varían porque la rapidez del aire aumenta y disminuye al moverse relativo al avión, así que la rapidez  $v_S$  del avión relativa al aire es distinta para las ondas de choque producidas en diferentes puntos del avión.

a) La fuente de sonido  $S$  (el avión) se acerca a la rapidez del sonido

b) La fuente de sonido se mueve con mayor rapidez que la del sonido

c) Ondas de choque alrededor de un avión supersónico





**16.36** El primer avión supersónico, el Bell X-1, tenía una forma parecida a la de una bala calibre 50, la cual se sabía que podía viajar más rápidamente que el sonido.

Yeager de la fuerza aérea estadounidense, volando el Bell X-1 a Mach 1.06 el 14 de octubre de 1947 (figura 16.36).

La situación real es tridimensional; la onda de choque forma un *cono* alrededor de la dirección de movimiento de la fuente. Si ésta (digamos, un avión supersónico o la bala de un rifle) se mueve con velocidad constante, el ángulo  $\alpha$  es constante, y el cono de la onda de choque se mueve junto con la fuente. Es la llegada de esta onda de choque lo que causa el estampido sónico que oímos después de que pasó un avión supersónico. Cuanto más grande sea el avión, más fuerte será el estampido sónico; la onda de choque producida en el nivel del suelo por el vuelo del avión supersónico de pasajeros Concorde (en desuso) a 12,000 m (40,000 ft) causa un salto repentino en la presión del aire de cerca de 20 Pa. Frente al cono de la onda de choque, no hay sonido. Dentro del cono, un receptor estacionario oye el sonido con desplazamiento Doppler del avión que se aleja.

**CAUIDADO Ondas de choque** Destacamos que cualquier objeto que se mueve en aire a velocidad supersónica produce una onda de choque *continuamente*, no sólo en el instante en que “rompe la barrera del sonido”. Las ondas sonoras que se combinan para formar la onda de choque, como en la figura 16.35b, son creadas por el movimiento del objeto mismo, no por alguna fuente de sonido que el objeto pudiera llevar. El chasquido de una bala y de la punta de un látigo se deben a su movimiento supersónico. Un avión supersónico podría tener motores muy ruidosos, pero éstos no causan la onda de choque. De hecho, el transbordador espacial produce un estampido sónico muy fuerte al bajar a tierra; sus motores ya no tienen combustible en este punto, así que es un planeador supersónico. ■

Las ondas de choque tienen aplicaciones fuera de la aviación; se usan para desintegrar *cálculos* renales y biliares sin cirugía invasiva, usando una técnica con el llamativo nombre de *litotricia extracorpórea por onda de choque*. Una onda de choque producida fuera del cuerpo se enfoca con un reflector o una lente acústica, de modo que la mayor parte posible de la onda converja en el cálculo. Cuando los esfuerzos resultantes en el cálculo exceden la resistencia de éste a la tensión, el cálculo se deshace formando partículas que pueden eliminarse. Esta técnica requiere una determinación exacta de la ubicación del cálculo, lo cual puede hacerse con técnicas de visualización por ultrasonido (véase el análisis concerniente en la página 535).

### Ejemplo 16.20 Estampido sónico de un avión supersónico

La onda de choque forma un cono que se extiende hacia atrás desde el avión, así que lo que el problema realmente pregunta es cuánto tiempo transcurre, entre que el avión pasa por arriba y que la onda de choque llega al observador.

#### SOLUCIÓN

**IDENTIFICAR:** La onda de choque forma un cono que se extiende hacia atrás desde el avión, así que lo que el problema realmente pregunta es cuánto tiempo transcurre, entre que el avión pasa por arriba y que la onda de choque llega al observador.

**PLANTEAR:** La figura 16.37 muestra la situación cuando la onda de choque llega al receptor en el punto R. Ha transcurrido un tiempo  $t$

(la incógnita) desde que el avión pasó por arriba. En ese tiempo, el avión que vuela con rapidez  $v_s$  recorrió una distancia  $v_s t$ . Usaremos trigonometría para despejar  $t$ .

**EJECUTAR:** Por la ecuación (16.31), el ángulo  $\alpha$  del cono de choque es

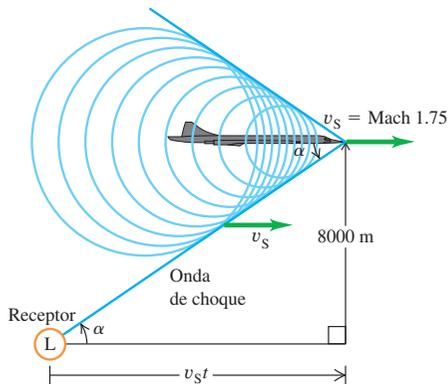
$$\alpha = \arcsen \frac{1}{1.75} = 34.8^\circ$$

La rapidez del avión es la rapidez del sonido multiplicada por el número de Mach:

$$v_s = (1.75)(320 \text{ m/s}) = 560 \text{ m/s}$$

*continúa*

**16.37** Oímos un estampido sónico cuando la onda de choque nos alcanza en L (no sólo cuando el avión rompa la barrera del sonido). Un receptor a la derecha de L todavía no oye el estampido pero pronto lo oirá; un receptor a la izquierda de L ya lo oyó.



De la figura 16.37, tenemos

$$\tan \alpha = \frac{8000 \text{ m}}{v_s t}$$

$$t = \frac{8000 \text{ m}}{(560 \text{ m/s})(\tan 34.8^\circ)} = 20.5 \text{ s}$$

**EVALUAR:** Oímos el estampido 20.5 s después de que pasa el avión; en ese tiempo, el avión recorrió  $(560 \text{ m/s})(20.5 \text{ s}) = 11.5 \text{ km}$  más allá del punto directamente arriba de nosotros.

En este cálculo, supusimos que la rapidez del sonido es la misma a todas las alturas, de modo que  $\alpha = \arcsin v/v_s$  es constante y la onda de choque forma un cono perfecto. De hecho, la rapidez del sonido disminuye al aumentar la altura. ¿Cómo afectaría esto el resultado?

**Evalúe su comprensión de la sección 16.9** ¿Qué escucharía usted si estuviera directamente detrás (a la izquierda) del avión supersónico de la figura 16.37? i) un estampido sónico; ii) el sonido de un avión, el desplazamiento Doppler a frecuencias mayores; iii) el sonido del avión, el desplazamiento Doppler a menores frecuencias; iv) ninguno de los anteriores.

# CAPÍTULO 16 RESUMEN

**Ondas sonoras:** El sonido consiste en ondas longitudinales en un medio. Una onda sonora senoidal se caracteriza tanto por su frecuencia  $f$  y longitud de onda  $\lambda$  (o frecuencia angular  $\omega$  y número de onda  $k$ ), como por su amplitud de desplazamiento  $A$ . La amplitud de presión  $p_{\text{máx}}$  es directamente proporcional a la amplitud de desplazamiento, el número de onda y el módulo de volumen  $B$  del medio de la onda. (Véanse los ejemplos 16.1 y 16.2.)

La rapidez de una onda sonora en un fluido depende del módulo volumétrico  $B$  y densidad  $\rho$ . Si el fluido es un gas ideal, la rapidez puede expresarse en términos de la temperatura  $T$ , la masa molar  $M$  y la razón de las capacidades caloríficas  $\gamma$  del gas. La rapidez de las ondas longitudinales en una varilla sólida depende de la densidad y del módulo de Young  $Y$ . (Véanse los ejemplos 16.3 a 16.5.)

$$p_{\text{máx}} = BkA \quad (16.5)$$

(onda sonora senoidal)

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (16.7)$$

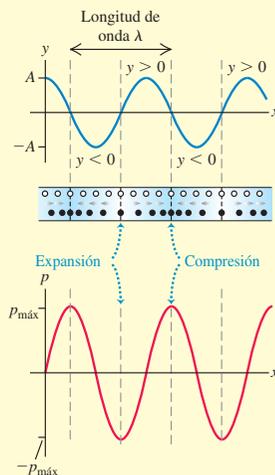
(onda longitudinal en un fluido)

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (16.10)$$

(onda sonora en un gas ideal)

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (16.8)$$

(onda longitudinal en una varilla sólida)



**Intensidad y nivel de intensidad de un sonido:** La intensidad  $I$  de una onda sonora es la rapidez media con que transporta energía por unidad de área. Para una onda senoidal, la intensidad puede expresarse en términos de la amplitud de desplazamiento  $A$  o la amplitud de presión  $p_{\text{máx}}$ . (Véanse los ejemplos 16.6 a 16.8.)

El nivel de intensidad de sonido  $\beta$  de una onda sonora es una medida logarítmica de su intensidad. Se mide relativa a  $I_0$ , una intensidad arbitraria que por definición es  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>. Los niveles de intensidad de sonido se expresan en decibeles (dB). (Véanse los ejemplos 16.9 y 16.10.)

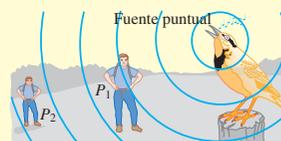
$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\rho B} \omega^2 A^2 = \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\rho v}$$

$$= \frac{p_{\text{máx}}^2}{2\sqrt{\rho B}} \quad (16.12), (16.14)$$

(intensidad de una onda sonora senoidal)

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0} \quad (16.15)$$

(definición de nivel de intensidad de sonido)



**Ondas sonoras estacionarias:** Se pueden establecer ondas sonoras estacionarias en un tubo. Un extremo cerrado es un nodo de desplazamiento y un antinodo de presión; un extremo abierto es un antinodo de desplazamiento y un nodo de presión. En el caso de un tubo de longitud  $L$  abierto por ambos extremos, las frecuencias de modo normal son múltiplos enteros de la rapidez del sonido dividida entre  $2L$ . En el caso de un tubo cerrado (abierto sólo en un extremo), las frecuencias de modo normal son los múltiplos impares de la rapidez del sonido dividida entre  $4L$ . (Véanse los ejemplos 16.11 y 16.12.)

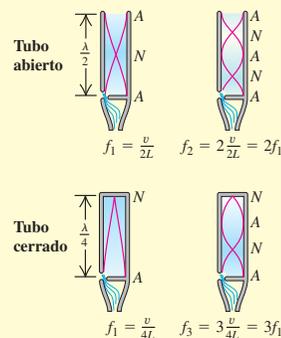
Se puede forzar al aire en un tubo, o a cualquier sistema de modos normales, a oscilar con cualquier frecuencia. Se presenta una respuesta máxima, o resonancia, si la frecuencia impulsora es cercana a una de las frecuencias de modo normal del sistema. (Véase el ejemplo 16.13.)

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

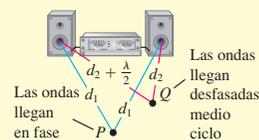
(tubo abierto)

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

(tubo cerrado)



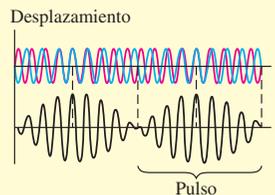
**Interferencia:** Si dos o más ondas se traslapan en la misma región del espacio, los efectos resultantes se llaman interferencia. La amplitud resultante puede ser mayor o menor que la de cada onda individual, dependiendo de si las ondas están en fase (interferencia constructiva) o desfasadas (interferencia destructiva). (Véase el ejemplo 16.14.)



**Pulsos:** Se escuchan pulsos cuando dos tonos con frecuencias ligeramente distintas  $f_a$  y  $f_b$  suenan juntos. La frecuencia del pulso  $f_{\text{pulso}}$  es la diferencia entre  $f_a$  y  $f_b$ .

$$f_{\text{pulso}} = f_a - f_b \quad (16.24)$$

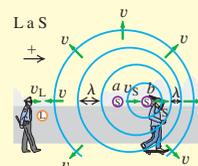
(frecuencia del pulso)



**Efecto Doppler:** El efecto Doppler para el sonido es el cambio de frecuencia que se da cuando hay movimiento de la fuente de sonido, de un receptor o de ambos, relativo al medio. Las frecuencias en la fuente y el receptor  $f_S$  y  $f_L$  tienen una relación con las velocidades de la fuente y el receptor  $v_S$  y  $v_L$  relativas al medio, y con la rapidez del sonido  $v$  respecto del medio. (Véanse los ejemplos 16.15 a 16.19.)

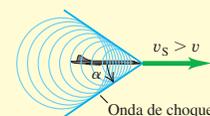
$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_S} f_S \quad (16.29)$$

(efecto Doppler, fuente en movimiento y receptor en movimiento)



**\*Ondas de choque:** Una fuente de sonido que se mueve con rapidez  $v_S$  mayor que la del sonido  $v$  crea una onda de choque. El frente de onda es un cono con ángulo  $\alpha$ . (Véase el ejemplo 16.20.)

$$\sin \alpha = \frac{v}{v_S} \quad (16.31)$$



## Términos clave

sonido, 527  
gama audible, 527  
ultrasónico, 528  
infrasónico, 528  
amplitud de desplazamiento, 528  
amplitud de presión, 529  
volumen, 531  
tono, 531

timbre, 532  
ruido, 532  
nivel de intensidad de sonido, 539  
decibel, 539  
nodo de desplazamiento, 541  
antinodo de desplazamiento, 541  
nodo de presión, 542  
antinodo de presión, 542

resonancia, 546  
curva de resonancia, 547  
pulsos, 551  
frecuencia del pulso, 551  
efecto Doppler, 552  
\*supersónico, 558  
\*onda de choque, 558  
\*número de Mach, 558

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo?

Tanto los sonidos musicales como el ruido consisten en una combinación de ondas sonoras senoidales. La diferencia es que todas las frecuencias de las ondas senoidales de un sonido musical son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental; en tanto que en el ruido están presentes *todas* las frecuencias.

## Respuestas a las preguntas de Evalué su comprensión

**16.1 Respuesta: v)** Por la ecuación (16.5), la amplitud de desplazamiento es  $A = p_{\text{máx}}/Bk$ . La amplitud de presión  $p_{\text{máx}}$  y el módulo de volumen  $B$  no cambian; pero la frecuencia  $f$  aumenta en un factor de 4. Por lo tanto, el número de onda  $k = \omega/v = 2\pi f/v$  también aumenta en un factor de 4. Puesto que  $A$  es inversamente proporcional a  $k$ , la amplitud de desplazamiento disminuye a  $\frac{1}{4}$ . Dicho de otro modo, a una frecuencia más alta se requiere un menor desplazamiento máximo, para producir la misma fluctuación de la presión máxima.

**16.2 Respuesta: i)** Por la ecuación (16.7), la rapidez de las ondas longitudinales (sonido) en un fluido es  $v = \sqrt{B/\rho}$ . Podemos reescribir esto para obtener una expresión del módulo de volumen  $B$  en términos de la densidad de fluido  $\rho$  y la rapidez del sonido  $v$ :  $B = \rho v^2$ . A 20 °C la rapidez del sonido en el mercurio es ligeramente menor que en el agua (1451 m/s contra 1482 m/s); sin embargo, la densidad del mercurio

es mayor que la del agua por un factor grande (13.6). De esta manera, el módulo de volumen del mercurio es mayor que el del agua en un factor de  $(13.6)(1451/1482)^2 = 13.0$ .

**16.3 Respuestas: A y  $p_{\text{máx}}$  aumentan en un factor de  $\sqrt{2}$ , B y v permanecen sin cambio,  $\beta$  aumenta en 3.0 dB** Las ecuaciones (16.9) y (16.10) muestran que el módulo de volumen  $B$  y la rapidez del sonido  $v$  no cambian porque tampoco cambian las propiedades físicas del aire. Por las ecuaciones (16.12) y (16.14), la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud de desplazamiento o al cuadrado de la amplitud de presión. Por lo tanto, un aumento al doble de la intensidad implica un aumento tanto de  $A$  como de  $p_{\text{máx}}$  en un factor de  $\sqrt{2}$ . El ejemplo 16.10 muestra que una *multiplicación* de la intensidad por un factor de 2 ( $I_2/I_1 = 2$ ) corresponde a *sumar* (10 dB)  $\log(I_2/I_1 = 10 \text{ dB}) \log 2 = 3.0 \text{ dB}$  al nivel de intensidad de sonido.

**16.4 Respuesta: ii)** El helio es menos denso que el aire y su masa molar es menor, así que el sonido viaja con mayor rapidez en helio que en aire. Las frecuencias de modo normal de un tubo son proporcionales a la rapidez del sonido  $v$ , así que la frecuencia y por ende el tono aumentan cuando el tubo se llena con helio en vez de aire.

**16.5 Respuesta: i) y iv)** Habrá resonancia si 660 Hz es una de las frecuencias de modo normal del tubo. Un tubo de órgano cerrado tiene frecuencias de modo normal que son múltiplos impares de su frecuencia fundamental [véase la ecuación (16.22) y la figura 16.18]. Por lo tanto, el tubo i), que tiene frecuencia fundamental de 220 Hz, también tiene frecuencia de modo normal de  $3(220 \text{ Hz}) = 660 \text{ Hz}$ . El tubo

ii) tiene el doble de la longitud del tubo i); por la ecuación (16.20), la frecuencia fundamental de un tubo cerrado es inversamente proporcional a la longitud, así que el tubo ii) tiene una frecuencia fundamental de  $(\frac{1}{2})(220 \text{ Hz}) = 110 \text{ Hz}$ . Sus otras frecuencias de modo normal son 330 Hz, 550 Hz, 770 Hz, . . . , por lo que un diapason de 660 Hz no causará resonancia. El tubo ii) es un tubo abierto de la misma longitud que el tubo i); por ello, su frecuencia fundamental es dos veces mayor que la del tubo i) [compare las ecuaciones 16.16 y 16.20], o bien,  $2(220 \text{ Hz}) = 440 \text{ Hz}$ . Sus otras frecuencias de modo normal son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental [véase la ecuación (16.19)], o bien, 880 Hz, 1320 Hz, . . . , ninguno de los cuales coincide con la frecuencia de 660 Hz del diapason. El tubo iv) es también un tubo abierto pero con el doble de longitud que el tubo iii) [véase la ecuación (16.18)], por ello, sus frecuencias de modo normal son de  $\frac{1}{2}$  de las del tubo iii): 220 Hz, 440 Hz, 660 Hz, . . . , de manera que el tercer armónico resonará con el diapason.

**16.6 Respuesta: iii)** Las interferencias constructiva y destructiva entre las dos ondas puede ocurrir sólo si las dos ondas tienen la misma frecuencia. En este caso las frecuencias son diferentes, por lo que no hay puntos donde las dos ondas siempre se refuerzan mutuamente (interferencia constructiva) o siempre se cancelen (interferencia destructiva).

**16.7 Respuesta: vi)** La frecuencia del pulso es de 3 Hz, así que la diferencia entre las frecuencias de los dos diapasones también es de 3 Hz. Por lo tanto, el segundo diapason vibra a una frecuencia de 443 Hz, o bien, de 437 Hz. Podemos distinguir entre las dos posibilidades comparando los tonos de los dos diapasones cuando suenan individualmente: la frecuencia será de 437 Hz si el segundo diapason tiene tono más grave, y de 433 Hz si tiene un tono más agudo.

**16.8 Respuesta: no** El aire (el medio de las ondas sonoras) se está moviendo desde la fuente hacia el receptor. Por lo tanto, relativos al aire, tanto la fuente como el receptor se están moviendo en la dirección del receptor a la fuente. Entonces, ambas velocidades son positivas y  $v_s = v_L = +10 \text{ m/s}$ . La igualdad de estas dos velocidades implica que el numerador y el denominador en la ecuación (16.29) son iguales, así que  $f_L = f_s$  y no hay desplazamiento Doppler.

**16.9 Respuesta: iii)** La figura 16.37 muestra que hay ondas sonoras dentro del cono de la onda de choque. Detrás del avión las crestas de las ondas se dispersan, justo cuando están detrás de la fuente en movimiento de la figura 16.27. Por lo tanto, las ondas que llegarían a usted tienen una longitud de onda ampliada y una menor frecuencia.

## PROBLEMAS

Para la tarea asignada por el profesor, visite [www.masteringphysics.com](http://www.masteringphysics.com)



### Preguntas para análisis

**P16.1.** Cuando el sonido viaja del aire al agua, ¿cambia la frecuencia de la onda? ¿La rapidez? ¿Y la longitud de onda? Explique su razonamiento.

**P16.2.** El héroe de una película del oeste trata de detectar la aproximación de un tren pegando su oreja a la vía. ¿Por qué obtiene así una advertencia temprana de la llegada del tren?

**P16.3.** ¿El tono (o frecuencia) de un tubo de órgano aumenta o disminuye al aumentar la temperatura? Explique su respuesta.

**P16.4.** En casi todos los instrumentos de viento modernos, el tono se modifica usando llaves o válvulas para alterar la longitud de la columna de aire en vibración. La corneta, en cambio, no tiene válvulas ni llaves; pero puede tocar muchas notas. ¿Cómo es posible esto? ¿Hay restricciones en cuanto a las notas que puede tocar?

**P16.5.** Los músicos sinfónicos siempre “calientan” sus instrumentos de viento soplándolos antes de un concierto. ¿Por qué?

**P16.6.** En una conocida y divertida demostración científica, cuando una persona inhala helio, su voz se torna aguda. ¿Por qué sucede esto? (*Advertencia:* inhalar demasiado helio puede provocar un estado de inconsciencia o incluso la muerte.)

**P16.7.** En ciertas autopistas los divisores de carriles a veces tienen cordoncillos o rizos equiespaciados. Cuando los neumáticos de un automóvil ruedan sobre ellos, se produce una nota musical. ¿Por qué? Explique cómo podría usarse este fenómeno para medir la rapidez del vehículo.

**P16.8.** La calidad del tono de una guitarra acústica es diferente cuando las cuerdas se puntean cerca del puente (el extremo inferior de las cuerdas), que cuando se puntean cerca del agujero (cerca del centro de las cuerdas). ¿Por qué?

**P16.9.** ¿Qué influye de manera más directa sobre el volumen de una onda sonora: la amplitud de *desplazamiento* o la amplitud de *presión*? Explique su razonamiento.

**P16.10.** Si se reduce a la mitad la amplitud de presión de una onda sonora, ¿en qué factor disminuirá su intensidad? ¿En qué factor debe aumentarse la amplitud de presión de una onda sonora para aumentar la intensidad en un factor de 16? Explique su respuesta.

**P16.11.** ¿El nivel de intensidad del sonido  $\beta$  obedece la ley del inverso del cuadrado? ¿Por qué?

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

**P16.13.** Un alambre bajo tensión y que vibra en su primer sobretono produce un sonido con longitud de onda  $\lambda$ . ¿Cuál será la nueva longitud de onda del sonido (en términos de  $\lambda$ ) si se duplica la tensión?

**P16.14.** Una pequeña banda metálica se desliza por una de las puntas de un diapason. Como esta banda se mueve cada vez más cerca del extremo de la punta, ¿qué efecto tiene sobre la longitud de onda y la frecuencia del sonido que produce la punta? ¿Por qué?

**P16.15.** 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?

**P16.16.** 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 su respuesta.

**P16.17.** Una iglesia grande tiene parte del órgano al frente y parte al fondo. Un feligrés que camina rápidamente por el pasillo, mientras ambos segmentos están tocando, dice que los dos segmentos suenan desafinados. ¿Por qué?

**P16.18.** 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?

**P16.19.** ¿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 acaso, describa las circunstancias y explique su razonamiento. Si no, explique por qué no.

**P16.20.** Las estrellas diferentes de nuestro Sol aparecen sin rasgos sobresalientes cuando se observan a través de telescopios. Sin embargo, los astrónomos puede utilizar fácilmente la luz proveniente de esas estrellas para determinar que están girando e incluso para medir la rapidez de su superficie. ¿Cómo cree que pueden hacer esto?

**P16.21.** Si usted se detiene frente a una vía férrea cuando un tren se aproxima, y éste pasa frente a usted, escuchará el desplazamiento Doppler en el sonido. Pero si escucha más de cerca, se dará cuenta de que el cambio en la frecuencia es continuo; no va súbitamente de una frecuencia alta a una frecuencia baja. En vez de ello, la frecuencia cambia *suavemente* (pero rápido) de alta a baja conforme el tren pasa. ¿Por qué ocurre este cambio de manera suave?

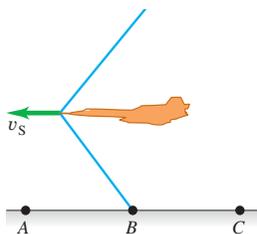
**P16.22.** En el caso 1, una fuente de sonido se aproxima a un observador estacionario con rapidez  $v$ . En el caso 2, el observador se mueve hacia una fuente estacionaria con la misma rapidez  $v$ . Si la fuente siempre produce un sonido con la misma frecuencia, ¿el observador escuchará la misma frecuencia en ambos casos, puesto que la rapidez relativa es la misma en ambas situaciones? ¿Por qué?

**\*P16.23.** ¿Un avión sólo produce un estampido sónico en el instante en que su rapidez excede de Mach 1? Explique su razonamiento.

**\*P16.24.** Si va en un avión supersónico, ¿qué oye? Explique su razonamiento. En particular, ¿escucha un estampido sónico continuo? ¿Por qué?

**\*P16.25.** Un jet vuela a una altitud constante con rapidez constante  $v_s$  mayor que la rapidez del sonido. Describa qué oyen los receptores en los puntos  $A$ ,  $B$  y  $C$  en el instante que se indica en la figura 16.38, cuando la onda de choque recién llegó al punto  $B$ . Explique su razonamiento.

Figura 16.38 Pregunta P16.25.



## Ejercicios

A menos que se indique algo diferente, 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 frecuencia de 1000 Hz, una amplitud de desplazamiento de  $1.2 \times 10^{-8}$  m produce una amplitud de presión de  $3.0 \times 10^{-2}$  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  $1.2 \times 10^{-8}$  m para producir una amplitud de presión de  $1.5 \times 10^{-3}$  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  $1.2 \times 10^{-8}$  m produce una amplitud de presión de  $3.0 \times 10^{-2}$  Pa. A  $20^\circ\text{C}$  el agua tiene un módulo de volumen de  $2.2 \times 10^9$  Pa, y la rapidez del sonido en ella es de 1480 m/s. Para ondas sonoras de 1000 Hz en agua a  $20^\circ\text{C}$ , ¿qué amplitud de desplazamiento se produce si la amplitud de presión es de  $3.0 \times 10^{-2}$  Pa? Explique por qué su respuesta es mucho menor que  $1.2 \times 10^{-8}$  m.

**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.** Una ruidosa máquina de una fábrica produce un sonido que tiene una amplitud de desplazamiento de  $1.00 \mu\text{m}$ , pero la frecuencia de este sonido puede ajustarse. Para evitar el daño auditivo en los trabajadores, se limita la amplitud de presión máxima de las ondas sonoras a 10.0 Pa. En las condiciones de esta fábrica, el módulo de volumen del aire es  $1.42 \times 10^5$  Pa. ¿Cuál es el sonido de frecuencia más alta al que esta máquina puede ajustarse sin exceder el límite prescrito? ¿Dicha frecuencia es audible para los trabajadores?

### Sección 16.2 Rapidez de las ondas sonoras

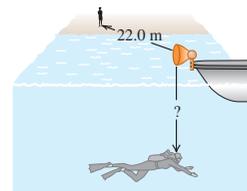
**16.5.** *a)* En un líquido con densidad de  $1300 \text{ kg/m}^3$ , se determina que ondas longitudinales con frecuencia de 400 Hz tienen una longitud de onda de 8.00 m. Calcule el módulo de volumen del líquido. *b)* Una barra metálica de 1.50 m de longitud tiene una densidad de  $6400 \text{ kg/m}^3$ . Las ondas sonoras longitudinales tardan  $3.90 \times 10^{-4}$  s en llegar de un extremo de la barra al 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, 0h 4m 15s el 18 de octubre de 1989). Sus ondas sísmicas primarias (ondas  $P$ ) son ondas longitudinales que viajan por la corteza terrestre. Estas ondas se detectaron en Caracas, Venezuela, a las 0h 13m 54s UTC; en Kevo, Finlandia, a las 0h 15m 35s UTC; y en Viena, Austria, a las 0h 17m 02s 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 aproximadamente  $3.3 \text{ g/cm}^3$ . 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, un amigo parado en tierra firme a 22.0 m del bote también lo escucha (figura 16.39). La sirena está 1.20 m sobre la superficie del agua. ¿A qué distancia (la marcada con “?” en la figura 16.39) de la sirena está el buzo? Tanto el aire como el agua están a  $20^\circ\text{C}$ .

Figura 16.39 Ejercicio 16.7.



**16.8.** A  $27.0^\circ\text{C}$ , ¿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  $\gamma$  de la tabla 19.1. *d)* Compare sus respuestas para los incisos *a)*, *b)* y *c)* con la rapidez en aire a la misma temperatura.

**16.9.** Un oscilador vibra a 1250 Hz y produce una onda sonora que viaja a través de un gas ideal a 325 m/s, cuando la temperatura del gas es de  $22.0^\circ\text{C}$ . Para cierto experimento, usted necesita que el oscilador produzca un sonido con longitud de onda de 28.5 cm en ese gas. ¿Cuál debería ser la temperatura del gas para permitir que se alcance esa longitud de onda?

**16.10.** *a)* Demuestre que el cambio fraccional en la rapidez del sonido ( $dv/v$ ) debido a un cambio muy pequeño en la temperatura  $dT$  está dado por  $dv/v = \frac{1}{2} dT/T$ . (Sugerencia: comience con la ecuación 16.10.) *b)* La rapidez del sonido en el aire a  $20^\circ\text{C}$  es de 344 m/s. Utilice el resultado en el inciso *a)* para determinar el cambio en la rapidez del sonido que corresponde a un cambio de  $1.0^\circ\text{C}$  en la temperatura del aire.

**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  $27.0^\circ\text{C}$  y a  $-13.0^\circ\text{C}$ ?

**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?

### Sección 16.3 Intensidad de sonido

**16.14.** Con base en la información de la tabla 16.2, responda las siguientes preguntas acerca del sonido en el aire. A  $20^\circ\text{C}$  el módulo de volumen para el aire es  $1.42 \times 10^5 \text{ Pa}$  y su densidad es de  $1.20 \text{ kg/m}^3$ . A esta temperatura, ¿cuál es la amplitud de presión (en Pa y atm) y la amplitud de desplazamiento (en m y nm) *a*) para el sonido más suave que puede escuchar normalmente una persona a  $1000 \text{ Hz}$  y *b*) para el sonido de una remachadora a la misma frecuencia? *c*) ¿Cuánta energía por segundo entrega cada onda a un cuadrado que mide  $5.00 \text{ mm}$  por lado?

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

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

**16.17.** Una onda sonora en aire a  $20^\circ\text{C}$  tiene frecuencia de  $150 \text{ Hz}$  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  $\text{W/m}^2$ ); *c*) el nivel de intensidad del sonido (en dB).

**16.18.** *a*) Determine el nivel de intensidad de sonido en un automóvil cuando la intensidad del sonido es de  $0.500 \mu\text{W/m}^2$ . *b*) Calcule el nivel de intensidad de sonido en el aire cerca de un martillo neumático cuando la amplitud de presión del sonido es de  $0.150 \text{ Pa}$  y la temperatura es de  $20.0^\circ\text{C}$ .

**16.19.** El sonido más tenue que un ser humano con oído normal puede detectar a una frecuencia de  $400 \text{ Hz}$  tiene una amplitud de presión aproximada de  $6.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ . Calcule *a*) la intensidad correspondiente; *b*) el nivel de intensidad; *c*) la amplitud de desplazamiento de esta onda sonora a  $20^\circ\text{C}$ .

**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  $30 \text{ cm}$  de la oreja del padre y a  $1.50 \text{ m}$  de la de la madre. ¿Qué diferencia hay entre los niveles de intensidad de sonido que escuchan ambos?

**16.22.** El ayuntamiento de Sacramento adoptó hace poco una ley que reduce el nivel permitido de intensidad sonora de los odiados recogedores de hojas, de  $95 \text{ dB}$  a  $70 \text{ dB}$ . 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  $13.0 \text{ dB}$  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  $594 \text{ Hz}$ . *a*) ¿Qué longitud tiene este tubo? Si se tapa uno de los extremos del tubo, calcule *b*) la longitud de onda y *c*) la frecuencia de la nueva fundamental.

**16.25.** Se producen ondas sonoras estacionarias en un tubo de  $1.20 \text{ m}$  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, y *b*) el tubo está cerrado en el extremo izquierdo y abierto en el derecho?

**16.26.** Encuentre la frecuencia fundamental y la frecuencia de los tres primeros sobretonos de un tubo de  $45.0 \text{ cm}$  de longitud *a*) si está abierto en ambos extremos, y *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 que puede oír frecuencias de  $20$  a  $20,000 \text{ Hz}$ , para cada uno de los casos anteriores.

**16.27. La voz humana.** El tracto vocal humano es un tubo que se extiende unos  $17 \text{ cm}$  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 un estimado, ya que las posiciones de los labios y la lengua afectan el movimiento del aire dentro del tracto.)

**16.28. Oído humano.** El canal auditivo (véase la figura 16.4) está lleno de aire. Un extremo está abierto y el otro está cerrado por el tímpano. El canal auditivo de cierta persona mide  $2.40 \text{ cm}$  de largo y puede modelarse como un tubo. *a*) ¿Cuál es la frecuencia fundamental y la longitud de onda del canal auditivo de esta persona? ¿Es audible este sonido? *b*) Determine la frecuencia del armónico más alto audible del canal de esta persona. ¿Qué armónico es éste?

**16.29.** Cierta tubo produce una frecuencia fundamental de  $262 \text{ Hz}$  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  $28.8 \text{ g/mol}$ , y la del helio, de  $4.00 \text{ g/mol}$ .) *b*) ¿Su respuesta al inciso *a*) depende de si el tubo está abierto o cerrado? ¿Por qué?

**16.30. Cantando bajo la ducha.** Un tubo cerrado por ambos extremos puede tener ondas estacionarias en su interior, pero normalmente no las escuchamos porque sólo una pequeña parte del sonido puede salir. Sin embargo, usted puede oír las si se encuentra dentro del tubo, como cuando alguien canta bajo la ducha. *a*) Demuestre que las longitudes de onda de las ondas estacionarias en un tubo de longitud  $L$ , cerrado por ambos extremos, son  $\lambda_n = 2L/n$  y que las frecuencias están dadas por  $f_n = nv/2L = nf_1$ , donde  $n = 1, 2, 3, \dots$  *b*) Considerando un modelo de tubo, determine la frecuencia de la fundamental y de los primeros dos sobretonos para una ducha de  $2.50 \text{ m}$  de alto. ¿Son audibles esas frecuencias?

### Sección 16.5 Resonancia

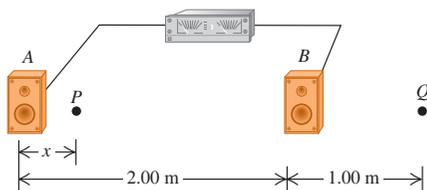
**16.31.** Usted sopla al ras de la boca de un tubo de ensayo vacío y produce la onda estacionaria fundamental de la columna de aire de su interior. La rapidez del sonido en aire es de  $344 \text{ m/s}$  y el tubo actúa como tubo cerrado. *a*) Si la longitud de la columna de aire es de  $14.0 \text{ cm}$ , ¿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.

**16.32.** Un tubo cerrado por un extremo de longitud ajustable se encuentra cerca de un alambre de  $85.0 \text{ cm}$  y  $7.25 \text{ g}$ , que está sometido a una tensión de  $4110 \text{ N}$ . Usted desea ajustar la longitud del tubo de manera que, cuando produzca sonido a su frecuencia fundamental, este sonido haga que el alambre vibre en su segundo sobretono con una amplitud muy grande. ¿De qué longitud debe ser el tubo?

### Sección 16.6 Interferencia de ondas

**16.33.** Dos altavoces, *A* y *B* (figura 16.40), son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales en fase. *B* está  $2.00 \text{ m}$  a la derecha de *A*. Considere el punto *Q* a lo largo de la extensión de la línea que une los altavoces,  $1.00 \text{ m}$  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 16.40 Ejercicios 16.33 y 16.34.



**16.34.** Dos altavoces, *A* y *B* (figura 16.40), 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 los incisos *a*) y *b*) casi nunca son un factor al escuchar los equipos estéreo caseros. ¿Por qué no?

**16.35.** 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?

**16.36.** 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?

**16.37.** 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 Pulsos

**16.38.** Dos guitarristas intentan tocar la misma nota con longitud de onda de 6.50 cm al mismo tiempo, pero uno de los instrumentos está ligeramente desafinado y, en vez de ello, toca una nota cuya longitud de onda es de 6.52 cm. ¿Cuál es la frecuencia del pulso que estos músicos escuchan cuando tocan juntos?

**16.39.** Dos tubos de órgano, abiertos por un lado pero cerrados por el otro, miden, cada uno 1.14 m de largo. Uno se alargó por 2.00 cm. Determine la frecuencia del pulso que producen cuando tocan juntos en su frecuencia fundamental.

**16.40.** Dos cuerdas tensas e idénticas, sometidas a la misma tensión *F*, producen una nota de la misma frecuencia fundamental  $f_0$ . La tensión en una de ellas se incrementa ahora en una cantidad muy pequeña  $\Delta F$ . *a*) Si se tocan juntas en su fundamental, demuestre que la frecuencia del pulso producida es  $f_{\text{pulso}} = f_0 (\Delta F/2F)$ . *b*) Dos cuerdas de violín idénticas, cuando están afinadas y estiradas con el mismo grado de tensión, tienen una frecuencia fundamental de 440.0 Hz. Una de las cuerdas se vuelve a afinar aumentando la tensión. Cuando se hace esto, se escuchan 1.5 pulsos por segundo cuando se pulsan ambas cuerdas simultáneamente a la altura de sus centros. ¿En qué porcentaje se modificó la tensión de la cuerda?

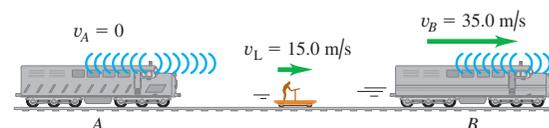
### Sección 16.8 El efecto Doppler

**16.41.** En el planeta Arrakis, un ornitotido 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.

**16.42.** En el ejemplo 16.19 (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?

**16.43.** 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 (figura 16.41). No sopla el viento. Según el receptor, *a*) ¿qué frecuencia tiene *A*? *b*) ¿Y *B*? *c*) ¿Qué frecuencia del pulso detecta el receptor?

Figura 16.41 Ejercicio 16.43.



**16.44.** 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, y *d*) detrás de la locomotora.

**16.45.** 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 donde 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?

**16.46. 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 del inciso *a*) y explique la diferencia con base en principios de la física.

**16.47.** Una alarma de automóvil emite 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?

**16.48.** 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? y *b*) se aleja de él?

**16.49. Radar Doppler.** Una gran tormenta eléctrica se aproxima hacia una estación meteorológica a 45.0 mi/h (20.1 m/s). Si la estación envía un haz de radar con frecuencia de 200.0 MHz hacia la tormenta, ¿cuál será la diferencia de frecuencia, entre el haz emitido y el haz reflejado en la tormenta que regresa a la estación? ¡Tenga cuidado de utilizar suficientes cifras significativas! (Sugerencia: considere que la tormenta refleja la misma frecuencia que la que recibe.)

**16.50. Planetas extrasolares (exoplanetas).** En un futuro no muy distante, sería posible detectar la presencia de planetas que giran alrededor de otras estrellas, midiendo el efecto Doppler en la luz infrarroja que emiten. Si un planeta gira alrededor de su estrella a 50.00 km/s, mientras emite luz infrarroja cuya frecuencia es de  $3.330 \times 10^{14}$  Hz, ¿qué frecuencia de luz recibiremos de este planeta, cuando se está alejando directamente de nosotros? (Nota: la luz infrarroja es luz con longitudes de onda mayores que las de la luz visible.)

**16.51.** ¿Qué tan rápido (como un porcentaje de la rapidez de la luz) tendría que desplazarse una estrella para que la frecuencia de la luz que recibimos de ella sea un 10.0% mayor, que la frecuencia de la luz que emite? ¿Se estaría alejando de nosotros o se estaría acercando? (Suponga que se está alejando directamente de nosotros, o bien, que se está acercando directamente hacia nosotros.)

**\*Sección 16.9 Ondas de choque**

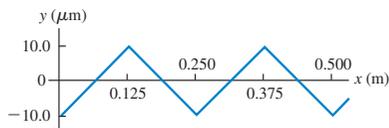
**\*16.52.** El cono de ondas de choque que genera el transbordador espacial, en un instante durante su reingreso a la atmósfera, forma un ángulo de  $58.0^\circ$  con la dirección de su movimiento. La rapidez del sonido a esa altitud es de 331 m/s. *a)* ¿Cuál es el número Mach del transbordador en ese instante, y *b)* ¿cuál es su rapidez relativa (en m/s y mi/h) a la atmósfera? *c)* ¿Cuál sería su número Mach y el ángulo del cono de las ondas de choque, si volara con la misma rapidez pero a menor altitud, donde la rapidez del sonido es de 344 m/s?

**\*16.53.** Un jet pasa volando a Mach 1.70 y altitud constante de 950 m. *a)* ¿Qué ángulo  $\alpha$  tiene el cono de la onda de choque? *b)* ¿Cuánto tiempo después de pasar el avión directamente arriba oímos el estampido sónico? Desprecie la variación de la rapidez del sonido con la altitud.

**Problemas**

**16.54.** *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  $\lambda = 0.250$  m, grafique el desplazamiento  $y$  y la fluctuación de presión  $p$  en función de  $x$  en  $t = 0$ . Muestre al menos dos longitudes de onda en sus gráficas. *c)* El desplazamiento y en una onda sonora no senoidal se muestra en la figura 16.42 como función de  $x$  en  $t = 0$ . Dibuje una gráfica que muestre la fluctuación de presión  $p$  en esta onda en función de  $x$  en  $t = 0$ . Esta onda sonora tiene la misma amplitud de  $10.0 \mu\text{m}$  que la onda del inciso *b)*. ¿Tiene la misma amplitud de presión? ¿Por qué? *d)* ¿Se cumple necesariamente la afirmación del inciso *a)*, si la onda no es senoidal? Explique su razonamiento.

Figura 16.42 Problema 16.54.



**16.55.** Una soprano y un bajo están cantando a dueto. Mientras la soprano canta un *la* sostenido a 932 Hz, el bajo canta un *la* sostenido, pero tres octavas más abajo. En esta sala de conciertos, la densidad del aire es de  $1.20 \text{ kg/m}^3$  y su módulo de volumen es de  $1.42 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Para que sus notas tengan el mismo nivel de intensidad de sonido,

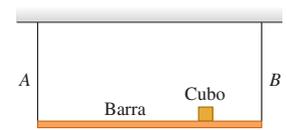
¿cuál debe ser *a)* la razón entre las amplitudes de presión del bajo y de la soprano, y *b)* la razón entre las amplitudes de desplazamiento del bajo y de la soprano? *c)* ¿Qué amplitud de desplazamiento (en m y nm) produce la soprano para cantar su *la* sostenido a 72.0 dB?

**16.56.** El sonido de una trompeta radia uniformemente en todas direcciones en aire a  $20^\circ\text{C}$ . 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 el nivel de intensidad del sonido es de 30.0 dB?

**16.57. Un termómetro.** Suponga que un tubo con longitud  $L$  contiene un gas y que usted desea tomar la temperatura de ese gas, pero sin introducirse en el tubo. Un extremo está cerrado y el otro está abierto, y un pequeño altavoz que produce sonido de frecuencia variable se encuentra en el extremo abierto. Usted aumenta gradualmente la frecuencia del altavoz hasta que el sonido del tubo se vuelve muy intenso. Con un aumento posterior de la frecuencia, la intensidad disminuye, pero el sonido vuelve a ser muy intenso otra vez a frecuencias todavía más altas. Sea  $f_0$  la frecuencia más baja a la que el sonido es muy intenso. *a)* Demuestre que la temperatura absoluta de este gas está dada por  $T = 16ML^2f_0^2/\gamma R$ , donde  $M$  es la masa molar del gas,  $\gamma$  es la razón de sus capacidades caloríficas, y  $R$  es la constante de gas ideal. *b)* ¿A qué frecuencia por arriba de  $f_0$  el sonido del tubo alcanzará su volumen máximo? *c)* ¿Cómo podría determinarse la rapidez del sonido en este tubo a temperatura  $T$ ?

**16.58.** Una barra uniforme de 165 N está sostenida horizontalmente por dos alambres idénticos A y B (figura 16.43). Un pequeño cubo de plomo de 185 N está colocado a  $\frac{3}{4}$  del camino de A a B. Cada uno de los alambres mide 75.0 cm de largo y tiene una masa de 5.50 g. Si ambos son pulsados simultáneamente en el centro, ¿cuál es la frecuencia de los pulsos que se producirán cuando cada uno de los alambres vibre en su frecuencia fundamental?

Figura 16.43 Problema 16.58.



**16.59.** 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?

**16.60. 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  $\mu$  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 las 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 el inciso *a)*? *c)* Para la tensión calculada en el inciso *a)*, ¿qué otros armónicos de la cuerda, si acaso, están en resonancia con ondas estacionarias en la columna de aire?

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

**16.62. 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 en vez de 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 donde puede sostenerse la varilla para obtener la fundamental. *c*) Calcule la frecuencia fundamental de una varilla de acero con 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?

**16.63.** *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 del inciso *a*) para estimar las frecuencias de modo normal de una 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.

**16.64.** Un tipo de acero tiene densidad de  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  y resistencia a la rotura 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?

**16.65.** Un tubo largo contiene aire a una presión de 1.00 atm y temperatura de  $77.0^\circ\text{C}$ . El tubo está abierto en un extremo y cerrado en el otro por un pistón móvil. Un diapasón 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  $77.0^\circ\text{C}$ . *b*) Con el resultado del inciso *a*), calcule el valor de  $\gamma$ . *c*) Estos datos muestran que hay un antinodo de desplazamiento un poco afuera del extremo abierto del tubo. ¿Qué tan afuera está?

**16.66. Oído humano.** El canal auditivo del oído humano (figura 16.4) 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. Use  $v = 344 \text{ m/s}$ . *b*) ¿Esperaría que el oído fuera especialmente sensible a frecuencias cercanas a 7000 Hz? ¿A 10,500 Hz? ¿Por qué?

**16.67.** Un alambre de platino (densidad de  $21.4 \text{ g/cm}^3$ ) 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 diapasón que vibra con cierta frecuencia exacta se acerca al alambre, éste también comienza a vibrar. *a*) ¿Qué frecuencias del diapasón 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 el inciso *a*).

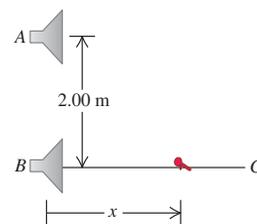
**16.68.** La frecuencia de la nota fa es de 349 Hz. *a*) Si un tubo de órgano está abierto en un extremo y cerrado en el otro, ¿qué longitud deberá tener para que su modo fundamental produzca esta nota a  $20.0^\circ\text{C}$ ? *b*) ¿Con qué temperatura del aire será la frecuencia de 370 Hz, correspondiente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

**16.69.** Una onda estacionaria con frecuencia de 1100 Hz en una columna de metano ( $\text{CH}_4$ ) a  $20.0^\circ\text{C}$  produce nodos separados por 0.200 m. ¿Qué valor tiene  $\gamma$  para el metano? (La masa molar del metano es de  $16.0 \text{ g/mol}$ .)

**16.70.** 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 figura 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 16.70.



**16.71. Ópera wagneriana.** Un hombre se casa con una gran soprano wagneriana; no obstante, para su desgracia después descubre 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 ladrillo. Sin embargo, la soprano no es tonta, y además estudió física cuando estudiaba 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 oír la soprano reflejada de la pared justo antes de que se desmorone?

**16.72.** 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 del pulso de 10.0 Hz?

**16.73.** 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  $\rho$  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.

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

**16.75.** 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  $20^\circ\text{C}$ ) 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.

**16.76.** Una sirena policíaca con frecuencia  $f_{\text{sirena}}$  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 usted 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 su respuesta.

**16.77.** Los murciélagos de herradura (género *Rhinolophus*) emiten sonidos por las fosas nasales y luego escuchan la frecuencia del soni-

do 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  $f_{\text{refl}}$ . a) Demuestre que la rapidez del insecto es

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

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.

**16.78.** a) Demuestre que la ecuación (16.30) puede escribirse así:

$$f_R = f_S \left( 1 - \frac{v}{c} \right)^{1/2} \left( 1 + \frac{v}{c} \right)^{-1/2}$$

b) Use el teorema binomial para demostrar que, si  $v \ll c$ , esto es aproximadamente igual a

$$f_R = f_S \left( 1 - \frac{v}{c} \right)$$

c) Un avión de reconocimiento sin piloto emite una señal de radio cuya frecuencia es de 243 MHz. Está volando directamente hacia un ingeniero de pruebas que está en tierra. El ingeniero detecta pulsos entre la señal recibida y una señal local que también tiene una frecuencia de 243 MHz. La frecuencia del pulso es de 46.0 Hz. Calcule la rapidez del avión. (Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz,  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ .)

**16.79. ¡Supernova!** La nube de gas llamada Nebulosa del Cangrejo puede verse incluso con un telescopio pequeño; es lo que queda de una *supernova*, es decir, una explosión cataclísmica de una estrella. La explosión se vio en la Tierra el 4 de julio de 1054 d.c. Las serpentinillas brillan con el color rojo característico de hidrógeno gaseoso caliente. En un laboratorio en la Tierra, el hidrógeno calentado produce luz roja con frecuencia de  $4.568 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ; la luz roja recibida de las extensiones de la nebulosa del Cangrejo que apuntan hacia la Tierra tienen una frecuencia de  $4.586 \times 10^{14} \text{ Hz}$ . a) Estime la rapidez con que estos bordes exteriores de la Nebulosa se están expandiendo. Suponga que la rapidez del centro de la nebulosa relativa a la Tierra es despreciable. (Puede usar las fórmulas deducidas en el problema 16.78. La rapidez de la luz es de  $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ .) b) Suponiendo que la rapidez de expansión ha sido constante desde la explosión de la supernova, estime el diámetro de la Nebulosa en metros y en años luz. c) El diámetro angular de la Nebulosa del Cangrejo vista desde la Tierra es de unos 5 minutos de arco (1 minuto de arco =  $\frac{1}{60}$  de grado). Estime la distancia en años luz a la Nebulosa, y estime el año en que tuvo lugar la explosión.

**16.80. Pronóstico del clima.** Una instalación de radar empleada para vigilar tormentas emite ondas de radio a 2800 MHz. Una línea de tormentas se acerca a la instalación a 42.0 km/h. a) En el marco de referencia de las tormentas, ¿la frecuencia de las ondas de radio es mayor o menor que 2800 MHz? ¿Por qué? ¿Qué tanto difiere la frecuencia de 2800 MHz? (Puede usar las fórmulas deducidas en el problema 16.78. Las ondas de radio viajan con la rapidez de la luz,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .) b) Las gotas de agua de la tormenta reflejan las ondas de radio, y las ondas reflejadas son detectadas por la instalación. La frecuencia de estas ondas reflejadas, medida por el receptor en la instalación, ¿es mayor o menor que 2800 Hz? ¿Por qué? ¿Qué tanto difiere la frecuencia reflejada de 2800 MHz?

**16.81.** Una mujer está parada frente a una pared grande y lisa y sostiene un diapasón vibrante con frecuencia  $f_0$  entre ella y la pared. a) Aho-

ra ella corre hacia la pared con rapidez  $v_w$  y detecta pulsos debidos a la interferencia entre las ondas sonoras que le llegan directamente del diapasón y las que le llegan después de reflejarse en la pared. ¿Cuántos pulsos por segundo detecta ella? (Nota: si la frecuencia del pulsón es demasiado grande, la mujer quizá tendrá que usar otra instrumentación distinta de sus oídos, para detectar y contar los pulsos.) b) Si ahora la mujer corre alejándose de la pared sosteniendo el diapasón a su espalda, de modo que esté entre ella y la pared, ¿cuántos pulsos por segundo detectará?

**\*16.82.** Imagine que, un día despejado, ve pasar un jet. Con base en el tamaño aparente del avión, usted determina que está volando a una altitud constante  $h$ . Escucha el estampido sónico un tiempo  $T$  después de que el avión pasó directamente arriba. Demuestre que, si la rapidez del sonido  $v$  es la misma a cualquier altitud, la rapidez del avión es

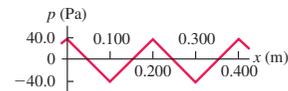
$$v_s = \frac{hv}{\sqrt{h^2 - v^2 T^2}}$$

(Sugerencia: le serán útiles las identidades trigonométricas.)

### Problemas de desafío

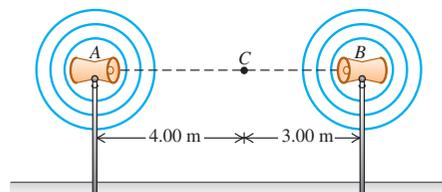
**16.83.** La figura 16.45 muestra la fluctuación de presión  $p$  de una onda sonora no senoidal en función de  $x$  para  $t = 0$ . La onda viaja en la dirección  $+x$ . a) Dibuje una gráfica que muestre la fluctuación de presión  $p$  como función de  $t$  para  $x = 0$ . Muestre al menos dos ciclos de oscilación. b) Dibuje una gráfica que muestre el desplazamiento  $y$  en esta onda en función de  $x$  en  $t = 0$ . En  $x = 0$ , el desplazamiento en  $t = 0$  es cero. Muestre al menos dos longitudes de onda. c) Dibuje una gráfica que muestre el desplazamiento  $y$  en función de  $t$  para  $x = 0$ . Muestre al menos dos ciclos de oscilación. d) Calcule la velocidad y aceleración máximas de un elemento del aire por el que viaja esta onda sonora. e) Describa cómo debe moverse el cono de un altavoz en función de  $t$  para producir la onda sonora de este problema.

Figura 16.45 Problema de desafío 16.83.



**16.84.** Dos altavoces, A y B, radian sonido uniformemente en todas direcciones en aire a 20 °C. La salida de potencia acústica de A es de  $8.00 \times 10^{-4} \text{ W}$ , y la de B,  $6.00 \times 10^{-5} \text{ W}$ . Ambos altavoces vibran en fase a una frecuencia de 172 Hz. a) Determine la diferencia de fase de las dos señales en un punto C sobre la línea que une A a B, a 3.00 m de B y 4.00 m de A (figura 16.46). b) Determine la intensidad y el nivel de intensidad de sonido en C debidos al altavoz A si B se apaga, y haga lo mismo para el altavoz B si A se apaga. c) Con ambos altavoces encendidos, determine la intensidad y el nivel de intensidad de sonido en C.

Figura 16.46 Problema de desafío 16.84.



# APÉNDICE A

## EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

El Système International d'Unités, SI, es el sistema desarrollado por la Conferencia General de Pesos y Medidas y adoptado por casi todas las naciones industriales del mundo. El siguiente material es una adaptación de B. N. Taylor, ed., National Institute of Standards and Technology Spec. Pub. 911 (U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC, 1995). Véase también <http://physics.nist.gov/cuu>

Cantidad	Nombre de la unidad	Símbolo	
<b>Unidades básicas del SI</b>			
longitud	metro	m	
masa	kilogramo	kg	
tiempo	segundo	s	
corriente eléctrica	ampere	A	
temperatura termodinámica	kelvin	K	
cantidad de sustancia	mol	mol	
intensidad luminosa	candela	cd	
<b>Unidades derivadas del SI</b>			
			<b>Unidades equivalentes</b>
área	metro cuadrado	m <sup>2</sup>	
volumen	metro cúbico	m <sup>3</sup>	
frecuencia	hertz	Hz	s <sup>-1</sup>
densidad de masa (densidad)	kilogramo por metro cúbico	kg/m <sup>3</sup>	
rapidez, velocidad	metro por segundo	m/s	
velocidad angular	radián por segundo	rad/s	
aceleración	metro por segundo cuadrado	m/s <sup>2</sup>	
aceleración angular	radián por segundo cuadrado	rad/s <sup>2</sup>	
fuerza	newton	N	kg · m/s <sup>2</sup>
presión (esfuerzo mecánico)	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>
viscosidad cinemática	metro cuadrado por segundo	m <sup>2</sup> /s	
viscosidad dinámica	newton-segundo por metro cuadrado	N · s/m <sup>2</sup>	
trabajo, energía, cantidad de calor	joule	J	N · m
potencia	watt	W	J/s
cantidad de electricidad	coulomb	C	A · s
diferencia de potencial, fuerza electromotriz	volt	V	J/C, W/A
intensidad de campo eléctrico	volt por metro	V/m	N/C
resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
capacitancia	farad	F	A · s/V
flujo magnético	weber	Wb	V · s
inductancia	henry	H	V · s/A
densidad de flujo magnético	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>
intensidad de campo magnético	ampere por metro	A/m	
fuerza magnetomotriz	ampere	A	
flujo luminoso	lumen	lm	cd · sr
luminancia	candela por metro cuadrado	cd/m <sup>2</sup>	
iluminancia	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>
número de onda	1 por metro	m <sup>-1</sup>	
entropía	joule por kelvin	J/K	
capacidad de calor específico	joule por kilogramo kelvin	J/kg · K	
conductividad térmica	watt por metro kelvin	W/m · K	

Cantidad	Nombre de la unidad	Símbolo	Unidades equivalentes
intensidad radiante	watt por esterradián	W/sr	
actividad (de una fuente radiactiva)	becquerel	Bq	s <sup>-1</sup>
dosis de radiación	gray	Gy	J/kg
dosis de radiación equivalente	sievert	Sv	J/kg
<b>Unidades complementarias del SI</b>			
ángulo plano	radián	rad	
ángulo sólido	esterradián	sr	

## Definiciones de las unidades del SI

**metro (m)** El *metro* es la longitud igual a la distancia recorrida por la luz, en el vacío, en un tiempo de 1/299,792,458 segundos.

**kilogramo (kg)** El *kilogramo* es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo (que es un cilindro particular de una aleación de platino-iridio que la Oficina Internacional de Pesas y Medidas conserva en una bóveda de seguridad en Sèvres, Francia).

**segundo (s)** El *segundo* es la duración de 9,192,631,770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

**ampere (A)** El *ampere* es la corriente constante que, si se mantiene en dos conductores rectos y paralelos de longitud infinita, de sección transversal circular despreciable y separados por una distancia de 1 metro en el vacío, produciría entre ellos una fuerza igual a  $2 \times 10^{-7}$  newtons por metro de longitud.

**kelvin (K)** El *kelvin*, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción 1/273.16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

**ohm ( $\Omega$ )** El *ohm* es la resistencia eléctrica entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia constante de potencial de 1 volt aplicada entre ellos, produce en el conductor una corriente de 1 ampere, sin que el conductor sea fuente de ninguna fuerza electromotriz.

**coulomb (C)** El *coulomb* es la cantidad de electricidad transportada en 1 segundo por una corriente de 1 ampere.

**candela (cd)** La *candela* es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  herztz y que tiene una intensidad radiante en esa dirección de 1/683 watts por esterradián.

**mole (mol)** El *mole* es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos de carbono hay en 0.012 kg de carbono 12. Las entidades elementales deben estar especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas, o grupos especificados de esas partículas.

**newton (N)** El *newton* es la fuerza que da a una masa de 1 kilogramo una aceleración de 1 metro por segundo por segundo.

**joule (J)** El *joule* es el trabajo realizado cuando el punto de aplicación de una fuerza constante de 1 newton se desplaza una distancia de 1 metro en la dirección de esa fuerza.

**watt (W)** El *watt* es la potencia que da lugar a la generación de energía a razón de 1 joule por segundo.

**volt (V)** El *volt* es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un alambre conductor que transporta una corriente constante de 1 ampere, cuando la potencia disipada entre tales puntos es igual a 1 watt.

**weber (Wb)** El *weber* es el flujo magnético que, al cerrar un circuito de una vuelta, produce en éste una fuerza electromotriz de 1 volt conforme se reduce a cero a una tasa uniforme de 1 segundo.

**lumen (lm)** El *lumen* es el flujo luminoso emitido en un ángulo sólido de 1 esterradián por una fuente puntual uniforme que tiene una intensidad de 1 candela.

**farad (F)** El *farad* es la capacitancia de un capacitor entre cuyas placas hay una diferencia de potencial de 1 volt cuando tiene una carga de electricidad igual a 1 coulomb.

**henry (H)** El *henry* es la inductancia de un circuito cerrado en el que se produce una fuerza electromotriz de 1 volt cuando la corriente eléctrica en el circuito varía de manera uniforme a razón de 1 ampere por segundo.

**radian (rad)** El *radián* es el ángulo plano entre dos radios de un círculo que recorre en la circunferencia un arco igual a la longitud del radio.

**esterradián (sr)** El *esterradián* es el ángulo sólido que, cuando tiene su vértice en el centro de una esfera, recorre un área de la superficie de la esfera igual a la de un cuadrado cuyos lados tengan una longitud igual al radio de la esfera.

**prefijos del SI** Los nombres de los múltiplos y submúltiplos de unidades del SI se forman con la aplicación de los prefijos listados en el Apéndice F.

# APÉNDICE B

## RELACIONES MATEMÁTICAS ÚTILES

### Álgebra

$$a^{-x} = \frac{1}{a^x} \quad a^{(x+y)} = a^x a^y \quad a^{(x-y)} = \frac{a^x}{a^y}$$

**Logaritmos:** Si  $\log a = x$ , entonces  $a = 10^x$ .  $\log a + \log b = \log(ab)$   $\log a - \log b = \log(a/b)$   $\log(a^n) = n \log a$   
Si  $\ln a = x$ , entonces  $a = e^x$ .  $\ln a + \ln b = \ln(ab)$   $\ln a - \ln b = \ln(a/b)$   $\ln(a^n) = n \ln a$

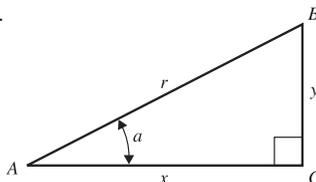
**Fórmula cuadrática:** If  $ax^2 + bx + c = 0$ ,  $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ .

### Teorema del binomio

$$(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)a^{n-2}b^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)a^{n-3}b^3}{3!} + \dots$$

### Trigonometría

En el triángulo rectángulo  $ABC$ ,  $x^2 + y^2 = r^2$ .



**Definiciones de las funciones trigonométricas:**  $\text{sen } a = y/r$   $\text{cos } a = x/r$   $\text{tan } a = y/x$

**Identidades:**  $\text{sen}^2 a + \text{cos}^2 a = 1$

$$\text{tan } a = \frac{\text{sen } a}{\text{cos } a}$$

$$\text{sen } 2a = 2 \text{sen } a \text{cos } a$$

$$\text{cos } 2a = \text{cos}^2 a - \text{sen}^2 a = 2 \text{cos}^2 a - 1 = 1 - 2 \text{sen}^2 a$$

$$\text{sen} \frac{1}{2} a = \sqrt{\frac{1 - \text{cos } a}{2}}$$

$$\text{cos} \frac{1}{2} a = \sqrt{\frac{1 + \text{cos } a}{2}}$$

$$\text{sen}(-a) = -\text{sen } a$$

$$\text{sen}(a \pm b) = \text{sen } a \text{cos } b \pm \text{cos } a \text{sen } b$$

$$\text{cos}(-a) = \text{cos } a$$

$$\text{cos}(a \pm b) = \text{cos } a \text{cos } b \mp \text{sen } a \text{sen } b$$

$$\text{sen}(a \pm \pi/2) = \pm \text{cos } a$$

$$\text{sen } a + \text{sen } b = 2 \text{sen} \frac{1}{2}(a + b) \text{cos} \frac{1}{2}(a - b)$$

$$\text{cos}(a \pm \pi/2) = \mp \text{sen } a$$

$$\text{cos } a + \text{cos } b = 2 \text{cos} \frac{1}{2}(a + b) \text{cos} \frac{1}{2}(a - b)$$

### Geometría

Circunferencia de un círculo de radio  $r$ :

$$C = 2\pi r$$

Área de un círculo de radio  $r$ :

$$A = \pi r^2$$

Volumen de una esfera de radio  $r$ :

$$V = 4\pi r^3/3$$

Área de la superficie de una esfera de radio  $r$ :

$$A = 4\pi r^2$$

Volumen de un cilindro de radio  $r$  y altura  $h$ :

$$V = \pi r^2 h$$

## Cálculo

### Derivadas:

$$\frac{d}{dx}x^n = nx^{n-1}$$

$$\frac{d}{dx}\text{sen } ax = a \text{sen } ax$$

$$\frac{d}{dx}\text{cos } ax = -a \text{sen } ax$$

$$\frac{d}{dx}e^{ax} = ae^{ax}$$

$$\frac{d}{dx}\ln ax = \frac{1}{x}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsen \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \ln(x + \sqrt{x^2 + a^2})$$

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{1}{a^2} \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

$$\int \frac{x dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

**Series de potencias** (convergentes para el intervalo de  $x$  que se indica):

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}x^3 + \dots \quad (|x| < 1)$$

### Integrales:

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad (n \neq -1)$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x$$

$$\int \text{sen } ax dx = -\frac{1}{a} \text{cos } ax$$

$$\int \text{cos } ax dx = \frac{1}{a}$$

$$\int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax}$$

$$\text{sen } x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots \quad (\text{para toda } x)$$

$$\text{cos } x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots \quad (\text{para toda } x)$$

$$\tan x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \frac{17x^7}{315} + \dots \quad (|x| < \pi/2)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (\text{para toda } x)$$

$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots \quad (|x| < 1)$$

# APÉNDICE C

## EL ALFABETO GRIEGO

Nombre	Mayúscula	Minúscula	Nombre	Mayúscula	Minúscula
Alfa	A	$\alpha$	Ny	N	$\nu$
Beta	B	$\beta$	Xi	$\Xi$	$\xi$
Gamma	$\Gamma$	$\gamma$	Ómicron	O	$o$
Delta	$\Delta$	$\delta$	Pi	$\Pi$	$\pi$
Épsilon	E	$\epsilon$	Rho	P	$\rho$
Dzeta	Z	$\zeta$	Sigma	$\Sigma$	$\sigma$
Eta	H	$\eta$	Tau	T	$\tau$
Theta	$\Theta$	$\theta$	Ypsilon	Y	$\upsilon$
Iota	I	$\iota$	Fi	$\Phi$	$\phi$
Kappa	K	$\kappa$	Ji	X	$\chi$
Lambda	$\Lambda$	$\lambda$	Psi	$\Psi$	$\psi$
My	M	$\mu$	Omega	$\Omega$	$\omega$

# APÉNDICE D

## TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

Grupo 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18  
Periodo

1																	2	
1	<b>H</b> 1.008																	<b>He</b> 4.003
2	<b>Li</b> 6.941	<b>Be</b> 9.012											<b>B</b> 10.811	<b>C</b> 12.011	<b>N</b> 14.007	<b>O</b> 15.999	<b>F</b> 18.998	<b>Ne</b> 20.180
3	<b>Na</b> 22.990	<b>Mg</b> 24.305											<b>Al</b> 26.982	<b>Si</b> 28.086	<b>P</b> 30.974	<b>S</b> 32.065	<b>Cl</b> 35.453	<b>Ar</b> 39.948
4	<b>K</b> 39.098	<b>Ca</b> 40.078	<b>Sc</b> 44.956	<b>Ti</b> 47.867	<b>V</b> 50.942	<b>Cr</b> 51.996	<b>Mn</b> 54.938	<b>Fe</b> 55.845	<b>Co</b> 58.933	<b>Ni</b> 58.693	<b>Cu</b> 63.546	<b>Zn</b> 65.409	<b>Ga</b> 69.723	<b>Ge</b> 72.64	<b>As</b> 74.922	<b>Se</b> 78.96	<b>Br</b> 79.904	<b>Kr</b> 83.798
5	<b>Rb</b> 85.468	<b>Sr</b> 87.62	<b>Y</b> 88.906	<b>Zr</b> 91.224	<b>Nb</b> 92.906	<b>Mo</b> 95.94	<b>Tc</b> (98)	<b>Ru</b> 101.07	<b>Rh</b> 102.906	<b>Pd</b> 106.42	<b>Ag</b> 107.868	<b>Cd</b> 112.411	<b>In</b> 114.818	<b>Sn</b> 118.710	<b>Sb</b> 121.760	<b>Te</b> 127.60	<b>I</b> 126.904	<b>Xe</b> 131.293
6	<b>Cs</b> 132.905	<b>Ba</b> 137.327	<b>Lu</b> 174.967	<b>Hf</b> 178.49	<b>Ta</b> 180.948	<b>W</b> 183.84	<b>Re</b> 186.207	<b>Os</b> 190.23	<b>Ir</b> 192.217	<b>Pt</b> 195.078	<b>Au</b> 196.967	<b>Hg</b> 200.59	<b>Tl</b> 204.383	<b>Pb</b> 207.2	<b>Bi</b> 208.980	<b>Po</b> (209)	<b>At</b> (210)	<b>Rn</b> (222)
7	<b>Fr</b> (223)	<b>Ra</b> (226)	<b>Lr</b> (262)	<b>Rf</b> (261)	<b>Db</b> (262)	<b>Sg</b> (266)	<b>Bh</b> (264)	<b>Hs</b> (269)	<b>Mt</b> (268)	<b>Ds</b> (271)	<b>Rg</b> (272)	<b>Uub</b> (285)	<b>Uut</b> (284)	<b>Uuq</b> (289)	<b>Uup</b> (288)	<b>Uuh</b> (292)	<b>Uus</b> (291)	<b>Uuo</b> (293)

Lantánidos	57 <b>La</b> 138.905	58 <b>Ce</b> 140.116	59 <b>Pr</b> 140.908	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (145)	62 <b>Sm</b> 150.36	63 <b>Eu</b> 151.964	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.925	66 <b>Dy</b> 162.500	67 <b>Ho</b> 164.930	68 <b>Er</b> 167.259	69 <b>Tm</b> 168.934	70 <b>Yb</b> 173.04
Actínidos	89 <b>Ac</b> (227)	90 <b>Th</b> (232)	91 <b>Pa</b> (231)	92 <b>U</b> (238)	93 <b>Np</b> (237)	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (257)	101 <b>Md</b> (258)	102 <b>No</b> (259)

Para cada elemento, se indica la masa atómica de la mezcla de isótopos que ocurre en la naturaleza. Para los elementos que no tienen isótopo estable, la masa atómica aproximada del isótopo de vida más larga se indica entre paréntesis. Para los elementos cuya existencia se ha predicho pero aún no han sido detectados, no se da la masa atómica. Todas las masas atómicas están expresadas en unidades de masa atómica ( $1 \text{ u} = 1.66053886(28) \times 10^{-27} \text{ kg}$ ), equivalente a gramos por mol (g/mol).

# APÉNDICE E

## FACTORES DE CONVERSIÓN DE UNIDADES

### Longitud

1 m = 100 cm = 1000 mm =  $10^6 \mu\text{m}$  =  $10^9 \text{nm}$   
1 km = 1000 m = 0.6214 mi  
1 m = 3.281 ft = 39.37 in  
1 cm = 0.3937 in  
1 in. = 2.540 cm  
1 ft = 30.48 cm  
1 yd = 91.44 cm  
1 mi = 5280 ft = 1.609 km  
1 Å =  $10^{-10} \text{m}$  =  $10^{-8} \text{cm}$  =  $10^{-1} \text{nm}$   
1 milla náutica = 6080 ft  
1 año luz =  $9.461 \times 10^{15} \text{m}$

### Área

1 cm<sup>2</sup> = 0.155 in<sup>2</sup>  
1 m<sup>2</sup> =  $10^4 \text{cm}^2$  = 10.76 ft<sup>2</sup>  
1 in<sup>2</sup> = 6.452 cm<sup>2</sup>  
1 ft = 144 in<sup>2</sup> = 0.0929 m<sup>2</sup>

### Volumen

1 litro = 1000 cm<sup>3</sup> =  $10^{-3} \text{m}^3$  = 0.03531 ft<sup>3</sup> = 61.02 in<sup>3</sup>  
1 ft<sup>3</sup> = 0.02832 m<sup>3</sup> = 28.32 litros = 7.477 galones  
1 galón = 3.788 litros

### Tiempo

1 min = 60 s  
1 h = 3600 s  
1 día = 86,400 s  
1 año = 365.24 d =  $3.156 \times 10^7 \text{s}$

### Ángulo

1 rad =  $57.30^\circ$  =  $180^\circ/\pi$   
1° = 0.01745 rad =  $\pi/180$  rad  
1 revolución =  $360^\circ$  =  $2\pi$  rad  
1 rev/min (rpm) = 0.1047 rad/s

### Rapidez

1 m/s = 3.281 ft/s  
1 ft/s = 0.3048 m/s  
1 mi/min = 60 mi/h = 88 ft/s  
1 km/h = 0.2778 m/s = 0.6214 mi/h  
1 mi/h = 1.466 ft/s = 0.4470 m/s = 1.609 km/h  
1 furlong/14 días =  $1.662 \times 10^{-4} \text{m/s}$

### Aceleración

1 m/s<sup>2</sup> = 100 cm/s<sup>2</sup> = 3.281 ft/s<sup>2</sup>  
1 cm/s<sup>2</sup> = 0.01 m/s<sup>2</sup> = 0.03281 ft/s<sup>2</sup>  
1 ft/s<sup>2</sup> = 0.3048 m/s<sup>2</sup> = 30.48 cm/s<sup>2</sup>  
1 mi/h · s = 1.467 ft/s<sup>2</sup>

### Masa

1 kg =  $10^3 \text{g}$  = 0.0685 slug  
1 g =  $6.85 \times 10^{-5} \text{slug}$   
1 slug = 14.59 kg  
1 u =  $1.661 \times 10^{-27} \text{kg}$   
1 kg tiene un peso de 2.205 lb cuando  $g = 9.80 \text{m/s}^2$

### Fuerza

1 N =  $10^5 \text{dinas}$  = 0.2248 lb  
1 lb = 4.448 N =  $4.448 \times 10^5 \text{dinas}$

### Presión

1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup> =  $1.450 \times 10^{-4} \text{lb/in}^2$  = 0.209 lb/ft<sup>2</sup>  
1 bar =  $10^5 \text{Pa}$   
1 lb/in<sup>2</sup> = 6895 Pa  
1 lb/ft<sup>2</sup> = 47.88 Pa  
1 atm =  $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$  = 1.013 bar  
=  $14.7 \text{lb/in}^2$  = 2117 lb/ft<sup>2</sup>  
1 mm Hg = 1 torr = 133.3 Pa

### Energía

1 J =  $10^7 \text{ergs}$  = 0.239 cal  
1 cal = 4.186 J (basada en caloría de 15°)  
1 ft · lb = 1.356 J  
1 Btu = 1055 J = 252 cal = 778 ft · lb  
1 eV =  $1.602 \times 10^{-19} \text{J}$   
1 kWh =  $3.600 \times 10^6 \text{J}$

### Equivalencia masa-energía

1 kg ↔  $8.988 \times 10^{16} \text{J}$   
1 u ↔ 931.5 MeV  
1 eV ↔  $1.074 \times 10^{-9} \text{u}$

### Potencia

1 W = 1 J/s  
1 hp = 746 W = 550 ft · lb/s  
1 Btu/h = 0.293 W

# APÉNDICE F

## CONSTANTES NUMÉRICAS

### Constantes físicas fundamentales\*

Nombre	Símbolo	Valor
Rapidez de la luz	$c$	$2.99792458 \times 10^8$ m/s
Magnitud de la carga eléctrica de un electrón	$e$	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ C
Constante gravitacional	$G$	$6.6742(10) \times 10^{-11}$ N · m <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup>
Constante de Planck	$h$	$6.6260693(11) \times 10^{-34}$ J · s
Constante de Boltzmann	$k$	$1.3806505(24) \times 10^{-23}$ J/K
Número de Avogadro	$N_A$	$6.0221415(10) \times 10^{23}$ moléculas/mol
Constante de los gases	$R$	8.314472(15) J/mol · K
Masa del electrón	$m_e$	$9.1093826(16) \times 10^{-31}$ kg
Masa del protón	$m_p$	$1.67262171(29) \times 10^{-27}$ kg
Masa del neutrón	$m_n$	$1.67492728(29) \times 10^{-27}$ kg
Permeabilidad del espacio libre	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A · m
Permitividad del espacio libre	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	$8.854187817 \dots \times 10^{-12}$ C <sup>2</sup> /N · m <sup>2</sup>
	$1/4\pi\epsilon_0$	$8.987551787 \dots \times 10^9$ N · m <sup>2</sup> /C <sup>2</sup>

### Otras constantes útiles\*

Equivalente mecánico del calor		4.186 J/cal (caloría 15°)
Presión atmosférica estándar	1 atm	$1.01325 \times 10^5$ Pa
Cero absoluto	0 K	-273.15°C
Electrón volt	1 eV	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ J
Unidad de masa atómica	1 u	$1.66053886(28) \times 10^{-27}$ kg
Energía del electrón en reposo	$m_e c^2$	0.510998918(44) MeV
Volumen del gas ideal (0 °C y 1 atm)		22.413996(39) litro/mol
Aceleración debida a la gravedad (estándar)	$g$	9.80665 m/s <sup>2</sup>

\*Fuente: National Institute of Standards and Technology (<http://physics.nist.gov/cuu>). Los números entre paréntesis indican la incertidumbre en los dígitos finales del número principal; por ejemplo, el número 1.6454(21) significa  $1.6454 \pm 0.0021$ . Los valores sin incertidumbre son exactos.

## Datos astronómicos†

Cuerpo	Masa (kg)	Radio (m)	Radio de la órbita (m)	Periodo de la órbita
Sol	$1.99 \times 10^{30}$	$6.96 \times 10^8$	—	—
Luna	$7.35 \times 10^{22}$	$1.74 \times 10^6$	$3.84 \times 10^8$	27.3 d
Mercurio	$3.30 \times 10^{23}$	$2.44 \times 10^6$	$5.79 \times 10^{10}$	88.0 d
Venus	$4.87 \times 10^{24}$	$6.05 \times 10^6$	$1.08 \times 10^{11}$	224.7 d
Tierra	$5.97 \times 10^{24}$	$6.38 \times 10^6$	$1.50 \times 10^{11}$	365.3 d
Marte	$6.42 \times 10^{23}$	$3.40 \times 10^6$	$2.28 \times 10^{11}$	687.0 d
Júpiter	$1.90 \times 10^{27}$	$6.91 \times 10^7$	$7.78 \times 10^{11}$	11.86 y
Saturno	$5.68 \times 10^{26}$	$6.03 \times 10^7$	$1.43 \times 10^{12}$	29.45 y
Urano	$8.68 \times 10^{25}$	$2.56 \times 10^7$	$2.87 \times 10^{12}$	84.02 y
Neptuno	$1.02 \times 10^{26}$	$2.48 \times 10^7$	$4.50 \times 10^{12}$	164.8 y
Plutón‡	$1.31 \times 10^{22}$	$1.15 \times 10^6$	$5.91 \times 10^{12}$	247.9 y

†Fuente: NASA Jet Propulsion Laboratory Solar System Dynamics Group (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) y P. Kenneth Seidelmann, ed., *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (University Science Books, Mill Valley, CA, 1992), pp. 704-706. Para cada cuerpo, el “radio es el radio en su ecuador, y el “radio de la órbita” es su distancia promedio desde el Sol (para los planetas) o desde la Tierra (para la Luna).

‡En agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional reclasificó a Plutón y otros objetos pequeños que giran en órbita alrededor del Sol como “planetas enanos”.

## Prefijos para potencias de 10

Potencia de 10	Prefijo	Abreviatura
$10^{-24}$	yocto-	y
$10^{-21}$	zepto-	z
$10^{-18}$	atto-	a
$10^{-15}$	femto-	f
$10^{-12}$	pico-	p
$10^{-9}$	nano-	n
$10^{-6}$	micro-	$\mu$
$10^{-3}$	mili-	m
$10^{-2}$	centi-	c
$10^3$	kilo-	k
$10^6$	mega-	M
$10^9$	giga-	G
$10^{12}$	tera-	T
$10^{15}$	peta-	P
$10^{18}$	exa-	E
$10^{21}$	zetta-	Z
$10^{24}$	yotta-	Y

### Ejemplos:

1 femtómetro = 1 fm =  $10^{-15}$  m

1 picosegundo = 1 ps =  $10^{-12}$  s

1 nanocoulomb = 1 nC =  $10^{-9}$  C

1 microkelvin = 1  $\mu$ K =  $10^{-6}$  K

1 millivolt = 1 mV =  $10^{-3}$  V

1 kilopascal = 1 kPa =  $10^3$  Pa

1 megawatt = 1 MW =  $10^6$  W

1 gigahertz = 1 GHz =  $10^9$  Hz

# RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

## Capítulo 1

- 1.1 a) 1.61 km b)  $3.28 \times 10^3$  ft  
 1.3 1.02 ns  
 1.5 5.36 L  
 1.7 31.7 y  
 1.9 a) 23.4 km/L b) 1.42 tanques  
 1.11 9.0 cm  
 1.13 a)  $1.1 \times 10^{-3}\%$  b) no  
 1.15 a) 0.1% b) 0.008% c) 0.03%  
 1.17 a)  $2.8 \pm 0.3 \text{ cm}^3$  b)  $170 \pm 20$   
 1.19 a) no b) no c) no d) no e) no  
 1.21  $10^6$   
 1.23  $10^9$   
 1.25 \$70 millones  
 1.29  $59 \times 10^{10}$ ; aproximadamente  $53 \times 10^6$   
 1.31 7.8 km,  $38^\circ$  al norte del este  
 1.33 144 m,  $41^\circ$  al sur del oeste  
 1.35  $A_x = 0$ ,  $A_y = -8.00$  m;  $B_x = 7.50$  m,  $B_y = 13.0$  m;  $C_x = -10.9$  m,  $C_y = -5.07$  m;  $D_x = -7.99$  m,  $D_y = 6.02$  m  
 1.37 1190 N;  $13.4^\circ$  en dirección arriba y adelante  
 1.39 a) 9.01 m,  $33.7^\circ$  b) 9.01 m,  $33.7^\circ$   
 c) 22.3 m,  $250.3^\circ$  d) 22.3 m,  $70.3^\circ$   
 1.41 5.06 km,  $20.2^\circ$  al norte del oeste  
 1.43 a) 2.48 cm,  $18.3^\circ$  b) 4.10 cm,  $83.7^\circ$   
 c) 4.10 cm,  $263.7^\circ$   
 1.45  $781 \text{ N}$ ,  $166^\circ$   
 1.47  $\vec{A} = -(8.00 \text{ m})\hat{j}$ ;  $\vec{B} = (7.50 \text{ m})\hat{i} + (13.0 \text{ m})\hat{j}$ ;  
 $\vec{C} = -(10.9 \text{ m})\hat{i} + (-5.07 \text{ m})\hat{j}$ ;  
 $\vec{D} = (-7.99 \text{ m})\hat{i} + (6.02 \text{ m})\hat{j}$   
 1.49 a)  $\vec{A} = (1.23 \text{ m})\hat{i} + (3.38 \text{ m})\hat{j}$ ;  
 $\vec{B} = (-2.08 \text{ m})\hat{i} + (-1.20 \text{ m})\hat{j}$   
 b)  $\vec{C} = (12.01 \text{ m})\hat{i} + (14.94 \text{ m})\hat{j}$   
 c) 19.17 m;  $51.2^\circ$   
 1.51 a) no b) no; sí c)  $\pm 0.20$   
 1.53 a)  $-104 \text{ m}^2$  b)  $-148 \text{ m}^2$  c)  $40.6 \text{ m}^2$   
 1.55 a)  $165^\circ$  b)  $28^\circ$  c)  $90^\circ$   
 1.57 a)  $63.9 \text{ m}^2$ ;  $-\hat{k}$  b)  $63.9 \text{ m}^2$ ;  $+\hat{k}$   
 1.59 a)  $4.61 \text{ cm}^2$ ;  $-z$  b)  $4.61 \text{ cm}^2$ ;  $+z$   
 1.61 a)  $1.65 \times 10^4 \text{ km}^2$  b) 2.6 radios terrestres  
 1.63  $10^{28}$   
 1.65 a) 2.94 cm b) 1.82 cm  
 1.67 a)  $10^{50}$  b)  $10^{57}$  c)  $10^{79}$   
 1.69 149 N;  $32.2^\circ$  al norte del este  
 1.71 a)  $A_x = 3.03$  cm,  $A_y = 8.10$  cm c) 8.65 cm;  
 a  $69.5^\circ$  del eje  $+x$  hacia el eje  $+y$   
 1.73 144 m,  $41^\circ$  al sur del oeste  
 1.75 a) 46 N,  $139^\circ$   
 1.77 a) (87, 258) b) 136 pixeles,  $25^\circ$  abajo en línea recta hacia la izquierda  
 1.79 380 km,  $28.8^\circ$  al sur del este  
 1.81 160 N,  $13^\circ$  abajo de la horizontal  
 1.83 a) 911 m;  $8.9^\circ$  al oeste del sur  
 1.87 b)  $90^\circ$   
 1.89 a)  $A = 5.39$ ,  $B = 4.36$   
 b)  $-5.00\hat{i} + 2.00\hat{j} + 7.00\hat{k}$  c) 8.83; sí  
 1.93 a)  $54.7^\circ$  b)  $35.3^\circ$   
 1.95  $C_x = 8.0$ ,  $C_y = 6.1$   
 1.97 b) 72.2  
 1.99 38.5 yd,  $24.6^\circ$  a la derecha del campo  
 1.101 a) 76 ly b)  $129^\circ$

## Capítulo 2

- 2.1 a) 197 m/s b) 169 m/s  
 2.3 1 h 10 min  
 2.5 a) 17.1 s b) más rápido: 106 m; más lento: 94 m  
 2.7 250 km  
 2.9 a) 12.0 m/s b) 0 m/s, 15.0 m/s, 12.0 m/s  
 c) 13.3 s  
 2.11 a) 2.3 m/s, 2.3 m/s b) 2.3 m/s, 0.33 m/s  
 2.13 a) no b) (i) 12.8 m/s<sup>2</sup> (ii) 3.5 m/s<sup>2</sup>  
 (iii) 0.72 m/s<sup>2</sup>; sí  
 2.15 a) 2.00 cm/s, 50.0 cm,  $-0.125 \text{ cm/s}^2$   
 b) 16.0 s c) 32.0 s d) 6.20 s, 1.22 cm/s;  
 25.8 s,  $-1.22 \text{ cm/s}$ ; 36.4 s,  $-2.55 \text{ cm/s}$

- 2.17 a) 3 m/s<sup>2</sup> b) 10 m/s<sup>2</sup> c) depende de la dirección de la coordenada positiva  
 2.21 a) 5.0 m/s b) 1.43 m/s<sup>2</sup>  
 2.23 a) 675 m/s<sup>2</sup> b) 0.067 s  
 2.25 1.70 m  
 2.27 a) (i) 5.59 m/s<sup>2</sup> (ii) 7.74 m/s<sup>2</sup>  
 b) (i) 179 m (ii) 12,800 m  
 2.29 a)  $+2.7 \text{ cm/s}$ ,  $-1.3 \text{ cm/s}$  b)  $-1.3 \text{ cm/s}^2$   
 c) 22.5 cm; 25.5 cm  
 2.31 a) 0, 6.3 m/s<sup>2</sup>,  $-11.2 \text{ m/s}^2$   
 b) 100 m, 230 m, 320 m  
 2.33 a)  $1.80 \times 10^3 \text{ m/s}$  b) 0.957  
 c) 6 h 11 min  
 2.35 b) 1 s, 3 s d) 2 s e) 3 s f) 1 s  
 2.37 a) A: 20.5 m/s<sup>2</sup>; B: 3.8 m/s<sup>2</sup>; C: 53 m/s<sup>2</sup>  
 b) 721 km  
 2.39 a) 2.94 m/s b) 0.599 s  
 2.41 a)  $t = \sqrt{2d/g}$  b) 0.190 s  
 2.43 a) 646 m b) 16.4 s, 112 m/s  
 2.45 a) 25.6 m/s b) 31.6 m c) 15.2 m/s  
 2.47 a) 249 m/s<sup>2</sup> b) 25.4 c) 101 m d) no  
 2.49 0.0868 m/s<sup>2</sup>  
 2.51 a)  $x(t) = (0.250 \text{ m/s}^3)t^3 - (0.0100 \text{ m/s}^4)t^4$ ;  
 $v_x(t) = (0.750 \text{ m/s}^3)t^2 - (0.0400 \text{ m/s}^4)t^3$   
 b) 39.1 m/s  
 2.53 a) 30.0 cm/s  
 2.55 b) 0.627 s, 1.60 s c) negativa en 0.627 s,  
 positiva en 1.60 s d) 1.11 s e) 2.45 m  
 f) 2.00 s, 0 s  
 2.57 a) 82 km/h b) 31 km/h  
 2.59 a) 3.5 m/s<sup>2</sup> b) 0 c) 1.5 m/s<sup>2</sup>  
 2.61 a) 92.0 m b) 92.0 m  
 2.63 a) 464 m/s b)  $2.99 \times 10^4 \text{ m/s}$  c) 7.48  
 2.65 50.0 m  
 2.67 4.6 m/s<sup>2</sup>  
 2.69 a) 6.17 s b) 24.8 m  
 c)  $v_{\text{carril}} = 13.0 \text{ m/s}$ ,  $v_{\text{auto}} = 21.0 \text{ m/s}$   
 2.71 a) 7.85 cm/s b) 5.00 cm/s, horizontal de la posición inicial a la posición final  
 2.73 a) 15.9 s b) 393 m c) 29.5 m/s  
 2.75 a)  $-4.00 \text{ m/s}$  b) 12.0 m/s  
 2.77 a) 2.64H b) 2.64T  
 2.79 a) no b) sí; 14.4 m/s; no es físicamente alcanzable  
 2.81 a)  $6.79 \times 10^4 \text{ g}$  b) 1.45 m/s c) H/4  
 2.83 a) 7.59 m/s b) 5.14 m c) 1.60 s  
 2.85 a) 7.7 m/s b) 0.78 s c) 0.59 s d) 1.3 m  
 2.87 270 m  
 2.89 a) 20.5 m/s b) sí  
 2.91 a) 947 m b) 393 m  
 2.93 a) A b) 2.27 s, 5.73 s c) 1.00 s, 4.33 s  
 d) 2.67 s  
 2.95 a) 9.55 s, 47.8 m b) 1.62 m/s d) 8.38 m/s  
 e) no f) 3.69 m/s, 21.7 s, 80.0 m  
 2.97 a) 8.18 m/s b) (i) 0.411 m (ii) 1.15 km  
 c) 9.80 m/s d) 4.90 m/s

## Capítulo 3

- 3.1 a)  $v_{\text{med-x}} = 1.4 \text{ m/s}$ ,  $v_{\text{med-y}} = -1.3 \text{ m/s}$   
 b) 1.9 m/s,  $-43^\circ$   
 3.3 a) 7.1 cm/s,  $45^\circ$  b) 5.0 cm/s,  $90^\circ$ ; 7.1 cm/s;  
 $45^\circ$ ; 11 cm/s,  $27^\circ$   
 3.5 b)  $a_{\text{med-x}} = -8.67 \text{ m/s}^2$ ,  $a_{\text{med-y}} = -2.33 \text{ m/s}^2$   
 c) 8.98 m/s<sup>2</sup>,  $195^\circ$   
 3.7  $\vec{v} = a\hat{i} + (-2t)\hat{j}$ ;  $\vec{a} = -2\hat{j}$   
 c)  $v = 5.4 \text{ m/s}$ ,  $-63^\circ$ ;  $a = 2.4 \text{ m/s}^2$ ,  $-90^\circ$   
 d) acelerando y dando vuelta a la derecha  
 3.9 a) 0.600 m b) 0.385 m c)  $v_x = 1.10 \text{ m/s}$ ,  
 $v_y = -3.43 \text{ m/s}$ ;  $v = 3.60 \text{ m/s}$ ,  $72.2^\circ$  debajo  
 de la horizontal  
 3.11 3.32 m  
 3.13 a) 30.6 m/s b) 36.3 m/s  
 3.15 1.29 m/s<sup>2</sup>  
 3.17 a) 40.0 m/s, 69.3 m/s b) 7.07 s c) 245 m  
 d) 565 m e)  $a_x = 0$ ,  $a_y = -9.80 \text{ m/s}^2$ ;  
 $v_x = 40.0 \text{ m/s}$ ,  $v_y = 0$

- 3.19 a) 0.682 s, 2.99 s b) 24.0 m/s, 11.3 m/s;  
 24.0 m/s,  $-11.3 \text{ m/s}$  c) 30.0 m/s,  $-36.9^\circ$   
 3.21 a) 1.5 m b)  $-0.89 \text{ m/s}$   
 3.23 a) 13.6 m b) 34.6 m/s c) 103 m  
 3.25 a) 296 m b) 176 m c) 198 m  
 (i) horizontal: 15 m/s; vertical: 58.8 m/s  
 (ii) horizontal: 15 m/s; vertical: 78.8 m/s  
 3.27 795 m  
 3.29 a) 0.034 m/s<sup>2</sup>, 0.0034g b) 1.4 h  
 3.31 a) 3.07 s b) 1.68 s  
 3.33 a) 3.50 m/s<sup>2</sup>, hacia arriba b) 3.50 m/s<sup>2</sup>, hacia  
 abajo c) 12.6 s  
 3.35 a) 32.9 m/s b) 27.7 m/s<sup>2</sup> c) 35.5 rpm  
 3.37 a) 14 s b) 70 s  
 3.39 0.36 m/s,  $38^\circ$  al oeste del sur  
 3.41 a) 4.7 m/s,  $25^\circ$  al sur del este b) 190 s  
 c) 380 m  
 3.43 b)  $-7.1 \text{ m/s}$ ,  $-42 \text{ m/s}$  c) 43 m/s,  $9.5^\circ$  al  
 oeste del sur  
 3.45 a)  $A = 0$ ,  $B = 2.00 \text{ m/s}^2$ ,  $C = 50.0 \text{ m}$ ,  
 $D = 0.50 \text{ m/s}^3$  b)  $\vec{a} = (4.00 \text{ m/s}^2)\hat{i}$ ,  $v = 0$   
 c)  $v_x = 40.0 \text{ m/s}$ ,  $v_y = 150 \text{ m/s}$ ,  $v = 155 \text{ m/s}$   
 d)  $\vec{F} = (200 \text{ m})\hat{i} + (550 \text{ m})\hat{j}$   
 3.47 a) 124 m b) 280 m  
 3.49 22 m/s  
 3.51 40 m/s  
 3.53 274 m  
 3.55 a) 42.8 m/s b) 42.0 m  
 3.57 a)  $\sqrt{2gh}$  b)  $30.0^\circ$  c) 6.93h  
 3.59 c) menor de  $45^\circ$   
 3.61 b)  $15^\circ$ ,  $75^\circ$   
 3.63 a) 17.8 m/s b) en el río, a 28.4 m de la ribera  
 cercana  
 3.65 a) 81.6 m b) en el carro c) 245 m d)  $53.1^\circ$   
 3.67 a) 49 m/s b) 50 m  
 3.69 a) 2000 m b) 2180 m  
 3.71 a) 38.5 m/s b) (i) 25.0 m/s, 0  
 (ii) 25.0 m/s, 38.5 m/s c) (i)  $0^\circ$   
 (ii)  $57.0^\circ$  d) 499 m  
 3.73  $\pm 25.4^\circ$   
 3.77 b)  $v_x = R\omega(1 - \cos\omega t)$ ,  $v_y = R\omega \sin\omega t$ ,  
 $a_x = R\omega^2 \sin\omega t$ ,  $a_y = R\omega^2 \cos\omega t$  c)  $t = 0$ ,  
 $2\pi/\omega$ ,  $4\pi/\omega$ , ...;  $x = 0$ ,  $2\pi R$ ,  $4\pi R$ , ...;  
 $y = 0$ ;  $a = R\omega^2$  en la dirección  $+y$  d) no  
 3.79 a) 2.50g b) 0.614n  
 3.81 a) 44.7 km/h,  $26.6^\circ$  al oeste del sur  
 b)  $10.5^\circ$  al norte del oeste  
 3.83 a) 0.659 s b) (i) 9.10 m/s (ii) 6.46 m/s  
 c) 3.00 m, 2.13 m  
 3.85 7.39 m/s,  $12.4^\circ$  al norte del este  
 3.87 a) 80 m b)  $1.6 \times 10^{-3}$  c) el efecto general  
 es reducir el radio  
 3.89 a)  $\left(\frac{2v_0^2}{g}\right) [\tan(\theta + \phi) - \tan\theta] \frac{\cos^2(\theta + \phi)}{\cos\theta}$   
 b)  $\frac{\pi - \theta}{4} - \frac{\theta}{2}$   
 3.91  $\Delta t = 0.5$  s; 9.589 m/s<sup>2</sup>,  $118.6^\circ$ ;  $\Delta t = 0.1$  s;  
 9.983 m/s<sup>2</sup>,  $95.73^\circ$ ;  $\Delta t = 0.05$  s; 9.996 m/s<sup>2</sup>,  
 $92.86^\circ$   
 3.93 a) 1.5 km/h b) 3.5 km/h

## Capítulo 4

- 4.1 a)  $0^\circ$  b)  $90^\circ$  c)  $180^\circ$   
 4.3 7.1 N a la derecha, 7.1 N hacia abajo  
 4.5 494 N,  $31.7^\circ$   
 4.7 2.2 m/s<sup>2</sup>  
 4.9 16.0 kg  
 4.11 a) 3.13 m, 3.13 m/s b) 21.9 m, 6.25 m/s  
 4.13 a) 45.0 N;  $t = 2$  s a 4 s b) 2 s a 4 s  
 c) 0, 6 s  
 4.15 a)  $A = 100 \text{ N}$ ,  $B = 12.5 \text{ N/s}^2$  b) (i) 21.6 N,  
 2.70 m/s<sup>2</sup> (ii) 134 N, 16.8 m/s<sup>2</sup>  
 c) 26.6 m/s<sup>2</sup>  
 4.17  $2.94 \times 10^3 \text{ N}$   
 4.19 a) 4.49 kg b) 4.49 kg, 8.13 N  
 4.21 825 N, los bloques

A-10 Respuestas a los problemas con número impar

- 4.23 a) la gravedad que ejerce la Tierra sobre la botella; la fuerza del aire sobre la botella  
 b) la gravedad que ejerce la botella sobre la Tierra; la fuerza de la botella sobre el aire  
 4.25  $7.4 \times 10^{-23} \text{ m/s}^2$   
 4.27 b) sí  
 4.29 sí, en el inciso a)  
 4.31 b) 142 N  
 4.33 c) la fuerza que ejerce la tierra sobre el camión  
 4.35 1840 N,  $135^\circ$   
 4.37 a)  $17 \text{ N}$ ,  $90^\circ$  en sentido horario a partir de la dirección  $+x$  b) 840 N  
 4.39 a)  $4.8 \text{ m/s}$  b)  $16 \text{ m/s}^2$  c) 2360 N  
 4.41 b)  $5.83 \text{ m/s}^2$   
 4.43 a)  $2.50 \text{ m/s}^2$  b)  $10.0 \text{ N}$  c) a la derecha;  $F$   
 d)  $25.0 \text{ N}$   
 4.45 a)  $2.93 \text{ m/s}^2$  b)  $11.1 \text{ m/s}^2$   
 4.47 b)  $79.6 \text{ N}$   
 4.49 a)  $mg$  b)  $mg$  c)  $m(g + |\vec{a}|)$   
 d)  $m(g - |\vec{a}|)$   
 4.51 a)  $7.80 \text{ m/s}$  b)  $50.6 \text{ m/s}^2$   
 c)  $4532 \text{ N}$ ,  $6.16 \text{ mg}$   
 4.53 a)  $w$  b)  $0$  c)  $w/2$   
 4.55 b)  $1390 \text{ N}$   
 4.57 b) (i)  $3.5 \text{ m/s}^2$  (ii)  $8.0 \text{ N}$   
 4.59  $-6mBt$

Capítulo 5

- 5.1 a)  $25.0 \text{ N}$  b)  $50.0 \text{ N}$   
 5.3 a)  $990 \text{ N}$ ,  $735 \text{ N}$  b)  $926 \text{ N}$   
 5.5  $48^\circ$   
 5.7  $4.10 \times 10^3 \text{ N}$   
 5.9 a)  $A: 0.732w$ ;  $B: 0.897w$ ;  $C: w$  b)  $A: 2.73w$ ;  
 $B: 3.35w$ ;  $C: w$   
 5.11 a)  $337 \text{ N}$  b)  $343 \text{ N}$   
 5.13 a)  $470 \text{ N}$  b)  $163 \text{ N}$   
 5.15 b)  $1.22 \text{ mg}$  c)  $0.70 \text{ mg}$   
 5.17 a)  $4610 \text{ m/s}^2$ ,  $470 \text{ g}$  b)  $9.70 \times 10^5 \text{ N}$ ,  $471 \text{ w}$   
 c)  $18.7 \text{ ms}$   
 5.19 b)  $2.96 \text{ m/s}^2$  c)  $191 \text{ N}$ ; más que los ladrillos; menos que el contrapeso  
 5.21 b)  $2.50 \text{ m/s}^2$  c)  $30.8 \text{ N}$  d)  $T = 0.745w$   
 5.23 a)  $0.832 \text{ m/s}^2$  b)  $17.3 \text{ s}$   
 5.25  $1.38^\circ$   
 5.29 a)  $22 \text{ N}$  b)  $3.1 \text{ m}$   
 5.31 a)  $0.710$ ,  $0.472$  b)  $258 \text{ N}$  c) (i)  $51.8 \text{ N}$   
 (ii)  $4.97 \text{ m/s}^2$   
 5.33 a)  $57.1 \text{ N}$  b)  $146 \text{ N}$ , hacia arriba de la rampa  
 5.35 11 veces más lejos  
 5.37 a)  $\mu_k(m_A + m_B)g$  b)  $\mu_k m_A g$   
 5.39  $3.82 \text{ m/s}^2$   
 5.41 a)  $0.218 \text{ m/s}$  b)  $11.7 \text{ N}$   
 5.43 a)  $\mu_k mg / (\cos\theta - \mu_k \sin\theta)$  b)  $1/\tan\theta = \mu_k$   
 5.45 b)  $8.75 \text{ N}$  c)  $30.8 \text{ N}$  d)  $1.54 \text{ m/s}^2$   
 5.47 a)  $0.44 \text{ kg/m}$  b)  $42 \text{ m/s}$   
 5.49 a)  $3.61 \text{ m/s}$  b) en la parte inferior c)  $3.33 \text{ m/s}$   
 5.51 a)  $21.0^\circ$ ; no b) automóvil:  $1.18 \times 10^4 \text{ N}$ ;  
 camión:  $2.36 \times 10^4 \text{ N}$   
 5.53 el cable superior:  $1410 \text{ N}$ ; el cable horizontal:  
 $8360 \text{ N}$   
 5.55 a)  $1.49 \text{ rev/min}$  b)  $0.918 \text{ rev/min}$   
 5.57 a)  $138 \text{ km/h}$  b)  $3580 \text{ N}$   
 5.59  $2.43 \text{ m/s}$   
 5.61 a) la cuerda que forma un ángulo de  $60^\circ$   
 b)  $6400 \text{ N}$   
 5.63 a)  $Mg/(2\sin\theta)$  b)  $Mg/(2\tan\theta)$  c)  $T \rightarrow \infty$   
 5.65 a)  $m_1(\sin\alpha + \mu_k \cos\alpha)$   
 b)  $m_1(\sin\alpha - \mu_k \cos\alpha)$   
 c)  $m_1(\sin\alpha - \mu_k \cos\alpha) < m_2 <$   
 $m_1(\sin\alpha + \mu_k \cos\alpha)$   
 5.67 a)  $1.44 \text{ N}$  b)  $1.80 \text{ N}$   
 5.69 a)  $1.3 \times 10^{-4} \text{ N}$ ;  $62.5w$  b)  $2.9 \times 10^{-4} \text{ N}$  a  
 $1.2 \text{ ms}$  c)  $1.2 \text{ m/s}$   
 5.71  $1040 \text{ N}$   
 5.73 a)  $11 \text{ m/s}$  b)  $7.5 \text{ m/s}$   
 5.75  $0.40$   
 5.77 a)  $g \left( \frac{m_B + m_{\text{cuerda}} d/L}{m_A + m_B + m_{\text{cuerda}}} \right)$ ; aumenta  
 b)  $0.63 \text{ m}$   
 c) no funcionará para ningún valor de  $d$   
 5.79 a)  $66 \text{ N}$ , hacia el norte b)  $59 \text{ N}$ , hacia el sur  
 5.81 a)  $294 \text{ N}$ ,  $152 \text{ N}$ ,  $152 \text{ N}$  b)  $40.0 \text{ N}$

- 5.83  $2.52 \text{ N}$   
 5.85 a)  $12.9 \text{ kg}$  b)  $47.2 \text{ N}$  en la cuerda de la izquierda,  $101 \text{ N}$  en la cuerda de la derecha  
 5.87  $a_1 = 2m_2g/(4m_1 + m_2)$ ;  
 $a_2 = m_2g/(4m_1 + m_2)$   
 5.89  $1.46 \text{ m}$  por encima del piso  
 5.91  $g/\mu_s$   
 5.93 b)  $0.450$   
 5.95  $0.34$   
 5.97 a)  $170 \text{ m}$  b)  $18 \text{ m/s}$ ,  $41 \text{ mi/h}$   
 c)  $25 \text{ m/s}$ ,  $56 \text{ mi/h}$   
 5.99 a) se mueven hacia arriba b) permanece constante c) permanece constante d) se detienen  
 5.101 a)  $6.00 \text{ m/s}^2$  b)  $3.80 \text{ m/s}^2$  c)  $7.36 \text{ m/s}$   
 d)  $8.18 \text{ m/s}$  e)  $7.78 \text{ m}$ ,  $6.29 \text{ m/s}$ ,  $1.38 \text{ m/s}^2$   
 f)  $3.14 \text{ s}$   
 5.103  $1/3$   
 5.105 a)  $v_x(t) = v_i + (v_0 - v_i)e^{-kt/m}$   
 b)  $v_x(t) = v_i(\sin\beta - 0.015 \cos\beta)^{1/2}$   
 5.107 a)  $0.015$ ;  $0.36 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$  b)  $29 \text{ m/s}$   
 c) la razón es  $(\sin\beta - 0.015 \cos\beta)^{1/2}$   
 5.109 a)  $120 \text{ N}$  b)  $3.79 \text{ m/s}$   
 5.111 b)  $0.28$  c) no  
 5.113 a) a la derecha b)  $120 \text{ m}$   
 5.115 a)  $81.1^\circ$  b) no c) la cuenta recorrerá la parte inferior del aro ( $\beta = 0$ )  
 5.119  $T_{\text{máx}} = 2\pi \sqrt{\frac{h \tan\beta}{g} \left( \frac{\sin\beta + \mu_s \cos\beta}{\cos\beta - \mu_s \sin\beta} \right)}$ ;  
 $T_{\text{mín}} = 2\pi \sqrt{\frac{h \tan\beta}{g} \left( \frac{\sin\beta - \mu_s \cos\beta}{\cos\beta + \mu_s \sin\beta} \right)}$   
 5.121  $(M + m)g \tan\alpha$   
 5.123 a)  $F = \frac{\mu_k w}{\cos\theta + \mu_k \sin\theta}$   
 c)  $\theta = \tan^{-1}(\mu_k) = 14.0^\circ$   
 5.125 a)  $a_3 = g \left( \frac{-4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1} \right)$   
 b)  $a_B = -a_3$   
 c)  $a_1 = g \left( \frac{4m_1 m_2 - 3m_2 m_3 + m_3 m_1}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1} \right)$   
 d)  $a_2 = g \left( \frac{4m_1 m_2 + m_2 m_3 - 3m_3 m_1}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1} \right)$   
 e)  $T_A = \frac{1}{2} T_C$   
 f)  $T_C = \frac{8gm_1 m_2 m_3}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1}$   
 g)  $a_1 = a_2 = a_3 = a_B = 0$ ,  $T_C = 2m_2 g$ ,  
 $T_A = m_2 g$ ; sí  
 5.127  $\cos^2\beta$

Capítulo 6

- 6.1 a)  $3.60 \text{ J}$  b)  $-0.900 \text{ J}$  c)  $2.07 \text{ J}$   
 6.3 a)  $74 \text{ N}$  b)  $330 \text{ J}$  c)  $-330 \text{ J}$  d) cero; cero  
 e) cero  
 6.5 a)  $-1750 \text{ J}$  b) no  
 6.7 a) (i)  $9.00 \text{ J}$  (ii)  $-9.00 \text{ J}$  b) (i)  $0$   
 (ii)  $9.00 \text{ J}$  (iii)  $-9.00 \text{ J}$  (iv)  $0$   
 c) cero para cada bloque  
 6.9 a) (i) cero (ii) cero b) (i) cero  
 (ii)  $-25.1 \text{ J}$   
 6.11 a)  $1.0 \times 10^{16} \text{ J}$  b) aproximadamente 2 veces mayor  
 6.13 a)  $42.85 \text{ V}$  b)  $1836 \text{ K}$   
 6.15 a)  $43.2 \text{ m/s}$  b)  $101 \text{ m/s}$  c)  $5.80 \text{ m}$   
 d)  $3.53 \text{ m/s}$  e)  $7.35 \text{ m}$   
 6.17  $(2gh[1 + \mu_k/\tan\alpha])^{1/2}$   
 6.19 a)  $9D$  b)  $D/3$   
 6.21  $32.0 \text{ N}$   
 6.23 a)  $4.48 \text{ m/s}$  b)  $3.61 \text{ m/s}$   
 6.25 a)  $4.96 \text{ m/s}$  b)  $a = 1.43 \text{ m/s}^2$ ;  $v = 4.96 \text{ m/s}$ ;  
 igual  
 6.27 a)  $v_1^2/2\mu_k g$  b)  $1/2$  c)  $4$  d)  $2$   
 6.29 a)  $48.0 \text{ N}$ ,  $64.0 \text{ N}$  b)  $0.360 \text{ J}$ ,  $0.640 \text{ J}$   
 6.31 a)  $2.8 \text{ m/s}$  b)  $3.5 \text{ m/s}$   
 6.33  $8.5 \text{ cm}$   
 6.35 a)  $1.76$  b)  $0.67 \text{ m/s}$   
 6.37 a)  $4.0 \text{ J}$  b) cero c)  $-1.0 \text{ J}$  d)  $3.0 \text{ J}$   
 e)  $-1.0 \text{ J}$   
 6.39 a)  $2.83 \text{ m/s}$  b)  $2.40 \text{ m/s}$   
 6.41 a)  $5.65 \text{ cm}$  b) no;  $0.57 \text{ J}$

- 6.43  $3.6 \times 10^5 \text{ J}$ ;  $100 \text{ m/s}$   
 6.45  $4.0 \times 10^{13} \text{ P}$   
 6.47  $743 \text{ W}$ ,  $0.995 \text{ hp}$   
 6.49 a)  $1.4$  b)  $0.38$   
 6.51 a)  $5.4 \times 10^9 \text{ J}$  b)  $0.72 \text{ MW}$   
 6.53  $2.96 \times 10^4 \text{ W}$   
 6.55  $877 \text{ J}$   
 6.57 a)  $532 \text{ J}$  b)  $-315 \text{ J}$  c) cero d)  $-203 \text{ J}$   
 e)  $14.7 \text{ J}$  f)  $1.21 \text{ m/s}$   
 6.59 a)  $1/\sin\alpha$  b)  $W_{\text{entrada}} = W_{\text{salida}}$   
 6.61 a)  $2.59 \times 10^{12} \text{ J}$  b)  $4800 \text{ J}$   
 6.63 b)  $k_{\text{ef}} = k_1 + k_2 + \dots + k_N$   
 6.65 a)  $k \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right)$ ; negativo b)  $k \left( \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right)$ ;  
 positivo c) igual magnitud y signo opuesto, ya que el trabajo neto es cero  
 6.67 a)  $5.11 \text{ m}$  b)  $0.304$  c)  $10.3 \text{ m}$   
 6.69 a)  $0.15 \text{ N}$  b)  $9.4 \text{ N}$  c)  $0.44 \text{ J}$   
 6.71 a)  $2.56 \text{ m/s}$  b)  $5.28 \text{ N}$  c)  $19.7 \text{ J}$   
 6.73 a)  $-910 \text{ J}$  b)  $3.17 \times 10^3 \text{ J}$   
 6.75  $1.0 \times 10^5 \text{ N/m}$   
 6.77  $1.1 \text{ m}$  desde donde se libera el resorte  
 6.79 a)  $1.02 \times 10^4 \text{ N/m}$ ,  $8.16 \text{ m}$   
 6.81 a)  $0.600 \text{ m}$  b)  $1.50 \text{ m/s}$   
 6.83  $0.786$   
 6.85  $1.5 \text{ m}$   
 6.87 a)  $1.10 \times 10^5 \text{ J}$  b)  $1.30 \times 10^5 \text{ J}$   
 c)  $3.99 \text{ kW}$   
 6.89  $3.6 \text{ h}$   
 6.91  $1.30 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$   
 6.93 a)  $1.26 \times 10^5 \text{ J}$  b)  $1.46 \text{ W}$   
 6.95 a)  $2.4 \text{ MW}$  b)  $61 \text{ MW}$  c)  $6.0 \text{ MW}$   
 6.97 a)  $513 \text{ W}$  b)  $355 \text{ W}$  c)  $52.1 \text{ W}$   
 6.99 a)  $358 \text{ N}$  b)  $47.2 \text{ hp}$  c)  $4.06 \text{ hp}$   
 d)  $2.03\%$   
 6.101 a)  $\frac{1}{6} Mv^2$  b)  $6.1 \text{ m/s}$  c)  $3.9 \text{ m/s}$   
 d)  $K_{\text{proyectil}} = 0.40 J$ ,  $K_{\text{resorte}} = 0.60 J$   
 6.103 a)  $2.0 \times 10^5 \text{ J}$  b)  $2.8 \times 10^5 \text{ J}$   
 c)  $2.8 \times 10^5 \text{ J}$  d)  $5 \text{ km/h}$

Capítulo 7

- 7.1 a)  $6.6 \times 10^5 \text{ J}$  b)  $-7.7 \times 10^5 \text{ J}$   
 7.3 a)  $820 \text{ N}$  b) (i) cero (ii)  $740 \text{ J}$   
 7.5 a)  $24.0 \text{ m/s}$  b)  $24.0 \text{ m/s}$  en el inciso (b)  
 7.7  $2.5 \text{ m/s}$   
 7.9 a) (i) cero (ii)  $0.98 \text{ J}$  b)  $2.8 \text{ m/s}$   
 c) constante: gravedad; no constante: normal, fricción d)  $5.0 \text{ N}$   
 7.11  $-5400 \text{ J}$   
 7.13 a)  $880 \text{ J}$  b)  $-157 \text{ J}$  c)  $471 \text{ J}$  d)  $253 \text{ J}$   
 e)  $a = 3.16 \text{ m/s}^2$ ;  $v = 7.11 \text{ m/s}$ ;  $\Delta K = 253 \text{ J}$ ;  
 igual  
 7.15 a)  $80.0 \text{ J}$  b)  $5.00 \text{ J}$   
 7.17 a) (i)  $4U_0$  (ii)  $U_0/4$  b) (i)  $x_0\sqrt{2}$   
 (ii)  $x_0/\sqrt{2}$   
 7.19 a)  $6.32 \text{ cm}$  b)  $12 \text{ cm}$   
 7.21  $\pm 0.092 \text{ m}$   
 7.23 a)  $3.03 \text{ m/s}$ ; conforme la masa abandona el resorte b)  $95.9 \text{ m/s}^2$ ; justo después de que la masa se libera  
 7.25 a)  $4.46 \times 10^5 \text{ N/m}$  b)  $0.128 \text{ m}$   
 7.27 a)  $-308 \text{ J}$  b)  $-616 \text{ J}$  c) no conservativa  
 7.29 a)  $-3.6 \text{ J}$  b)  $-3.6 \text{ J}$  c)  $-7.2 \text{ J}$   
 d) no conservativa  
 7.31 a)  $\frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2)$  b)  $-\frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2)$ ; cero  
 c)  $-\frac{1}{2}k(x_3^2 - x_1^2)$ ;  $-\frac{1}{2}k(x_2^2 - x_3^2)$ ;  
 $-\frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2)$ ; igual  
 7.33  $2.46 \text{ N}$ , dirección  $+x$   
 7.35 c) atrae  
 7.37 a)  $F(r) = (12a/r^{13}) - (6b/r^7)$   
 b)  $(2a/b)^{1/6}$ ; estable c)  $b^2/4a$   
 d)  $a = 6.68 \times 10^{-138} \text{ J} \cdot \text{m}^{12}$ ,  
 $b = 6.41 \times 10^{-78} \text{ J} \cdot \text{m}^6$   
 7.39 a) cero,  $637 \text{ N}$  b)  $2.99 \text{ m/s}$   
 7.41 a) no b) sí,  $\$150$   
 7.43  $0.41$   
 7.45 a)  $15.9 \text{ J}$  b)  $4.0 \text{ J}$  c)  $3.0 \text{ J}$   
 7.47 a)  $20.0 \text{ m}$  de la orilla izquierda de la sección horizontal b)  $-78.4 \text{ J}$   
 7.49 a)  $22.2 \text{ m/s}$  b)  $16.4 \text{ m}$  c) no  
 7.51  $0.602 \text{ m}$   
 7.53  $15.5 \text{ m/s}$

- 7.55 4.4 m/s  
 7.57a)  $x_0\sqrt{k/m}$  b)  $kx_0/m$  c)  $x = 0, x = -x_0$   
 d)  $x_0$  e) el sistema oscila y nunca se detiene  
 7.59 a) 7.00 m/s b) 2.94 N  
 7.61 a)  $mg(1 - h/d)$  b) 440 N  
 c)  $\sqrt{2gh(1 - y/d)}$   
 7.63 48.2°  
 7.65 a) 0.392 b) -0.832 J  
 7.67 a)  $U(x) = (30.0 \text{ N/m})x^2 + (6.00 \text{ N/m}^2)x^3$   
 b) 7.85 m/s  
 7.69 7.01 m/s  
 7.71 a)  $m(g + a)^2/2gh$  b)  $2gh/(g + a)$   
 7.73 119 J  
 7.75 a) 3.87 m/s b) 0.10 m  
 7.77 a)  $F_x = -m\omega_0^2 x, F_y = -m\omega_0^2 y,$   
 b)  $\frac{1}{2}m\omega_0^2(x^2 + y^2)$  c) (i)  $\frac{1}{2}m\omega_0^2(x_0^2 + y_0^2)$   
 (ii)  $\frac{1}{2}m\omega_0^2(x_0^2 + y_0^2)$   
 7.79 a)  $4.4 \times 10^{12} \text{ J}$  b)  $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3; 0.90 \text{ mm}$   
 7.81 c) atrae  
 7.83 a) -50.6 J b) -67.5 J c) no conservativa  
 7.85 a) no b)  $x_0 = F/k$  d) no e)  $3F/k, -F/k$   
 f)  $v_{\text{máx}} = 2F/\sqrt{mk}$  a  $x = x_0 = F/k$   
 7.87 b)  $v(x) = \left[ \frac{2\alpha}{m\alpha_0^2} \left( x_0 - \frac{x_0^2}{x} \right) \right]^{1/2}$   
 c)  $x = 2x_0, v = \sqrt{\alpha/2m\alpha_0^2}$  d) cero  
 e)  $v(x) = \left[ \frac{2\alpha}{m\alpha_0^2} \left( x - \frac{x_0^2}{x} - \frac{2}{9} \right) \right]^{1/2}$   
 f) primer caso:  $x_0, \infty$ ; segundo caso:  $3x_0/2, 3x_0$

**Capítulo 8**

- 8.1 a)  $1.20 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  b) i) 60.0 m/s  
 ii) 26.8 m/s  
 8.3 b) la pelota de béisbol, 0.525 c) la mujer, 0.643  
 8.5 a) 22.5 kg · m/s, a la izquierda b) 838 J  
 8.7 562 N, no  
 8.9 a) 10.8 m/s, a la derecha b) 0.75 m/s, a la izquierda  
 8.11 a) 500 N/s<sup>2</sup> b) 5810 kg · m/s c) 2.70 m/s  
 8.13 a) 2.50 N · s b) i) +6.25 m/s, a la derecha  
 b) ii) 3.75 m/s, a la derecha  
 8.15 a) 6.79 m/s b) 55.2 J  
 8.17 a) 0.790 m/s b) -0.0023 J  
 8.19 0.866 kg · m/s  
 8.21 a) 0.0559 m/s b) 0.0313 m/s  
 8.23  $3.65 \times 10^5 \text{ m/s}$   
 8.25 a) 7.20 m/s b) -680 J  
 8.27 3.56 m/s  
 8.29 a) 0.846 m/s b) 2.10 J  
 8.31 a)  $1.4 \times 10^{-6} \text{ km/h}$ , que no es apreciable.  
 b)  $6.7 \times 10^{-8} \text{ km/h}$ , que no es apreciable.  
 8.33 5.9 m/s a 32° al este del norte  
 8.35 a) Ambos vehículos tienen el mismo cambio en momento lineal, pero el vehículo de menor tamaño tiene mayor cambio de velocidad.  
 b)  $2.5 \Delta v$  c) Los ocupantes del vehículo más pequeño  
 8.37 19.5 m/s (auto), 21.9 m/s (camión)  
 8.39 a) 2.93 cm b) 866 J c) 1.73 J  
 8.41 a) 0.333 m/s, 3.33 J b) -1.33 m/s (A), +0.67 m/s (B)  
 8.43 a) -0.100 m/s (A), 0.500 m/s (B)  
 b) 0.009 kg · m/s para ambas  
 c)  $-4.5 \times 10^{-4} \text{ J}$  (A),  $4.5 \times 10^{-4} \text{ J}$  (B), magnitudes iguales porque el choque es elástico  
 8.45 a) 1/3 b) 1/9 c) 10  
 8.47  $x_{\text{cm}} = 0.044 \text{ m}, y_{\text{cm}} = 0.056 \text{ m}$   
 8.49 2520 km desde el centro de Plutón  
 8.51 0.700 m hacia arriba y 0.700 a la derecha  
 8.53 0.47 m/s  
 8.55  $F_x = (-1.50 \text{ N/s})t, F_y = 0.25 \text{ N}, F_z = 0$   
 8.57 a) 53 g b) 5.22 N  
 8.59 2.4 km/s  
 8.61 45.1  
 8.63 a) 0.47 N · s b) 237 N  
 8.65 a)  $J_x = -1.14 \text{ N} \cdot \text{s}, J_y = 0.33 \text{ N} \cdot \text{s}$   
 b)  $v_{2x} = 0.0500 \text{ m/s}, v_{2y} = 1.78 \text{ m/s}$   
 8.67 2.67 m/s (convertible), 3.46 m/s (SUV)

- 8.69 a)  $v_{Cx} = 1.75 \text{ m/s}, v_{Cy} = 0.26 \text{ m/s}$   
 b) -0.092 J  
 8.71 15.0 m/s  
 8.73 36.4 N  
 8.75 a) 2.60 m/s b) 325 m/s  
 8.77 a) 5.28 m/s b) 5.7 m  
 8.79 68.8°  
 8.81 102 N  
 8.83 a) 0.222 b) -291 J c) 0.784 J  
 8.85 b)  $M = m$  c) cero  
 8.87 a) 9.35 m/s b) 3.29 m/s  
 8.89 b)  $\frac{1}{2}Mv_{\text{cm}}^2$   
 8.91 a) 3.56 m/s b) 5.22 m/s c) 4.67 m/s  
 8.93 0.0544%  
 8.95  $1.61 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ , a la izquierda  
 8.97 A: 13.6 m/s; B: 6.34 m/s, 65.0°  
 8.99 a)  $(L/2) \cos(\alpha/2)$ , a lo largo del eje a partir de la cúspide  
 b)  $(L/3)$ , a lo largo de la bisectriz a partir del lado inferior  
 c)  $L/\sqrt{8}$  a lo largo de la bisectriz  
 d)  $L/\sqrt{12}$  desde cada lado  
 8.101 0.400 m/s  
 8.103 a) 1.40 kg; 14.3 m/s; 0.28 kg; 71.6 m/s  
 b) 347 m  
 8.105 222 m/s,  $1.01 \times 10^3 \text{ m/s}; v_{\text{icr}} = 1.5v_{\text{na}}$   
 8.107 a) cero b) 1 d) 0.87 m f) 0.089 m  
 8.109 a) sí b) no; la energía cinética disminuye en  $4.8 \times 10^3 \text{ J}$   
 8.111 a) 1.37v<sub>ex</sub> b) 1.18v<sub>ex</sub> c) 2.38v<sub>ex</sub>  
 d) 2.94 km/s  
 8.113 b)  $2L/3$   
 8.115 a)  $F\lambda g/32$  b)  $l^2 g/32$

**Capítulo 9**

- 9.1 a) 34.4° b) 6.27 cm c) 1.05 m  
 9.3 a) A: rad/s; B: rad/s<sup>3</sup> b) (i) 0  
 (ii) 15.0 rad/s<sup>2</sup> c) 9.50 rad  
 9.5 a)  $\omega_z(t) = (0.400 \text{ rad/s}) + (0.0360 \text{ rad/s}^3)t^2$   
 b) 0.400 rad/s c)  $\omega_z = 1.30 \text{ rad/s};$   
 $\omega_{\text{med-}z} = 0.700 \text{ rad/s}$   
 9.7 a)  $a = \pi/4 \text{ rad}, b = 2.00 \text{ rad/s},$   
 $c = -0.139 \text{ rad/s}^3$  b) cero  
 c) 19.5 rad; 9.35 rad/s  
 9.9 a) 2.25 rad/s b) 4.69 rad  
 9.11 a) 24.0 s b) 68.8 rev  
 9.13 10.5 rad/s  
 9.15 a) 300 rpm b) 75.0 s; 312 rev  
 9.17 9.00 rev  
 9.19 a) 540 rad b) 12.3 s c) -8.17 rad/s<sup>2</sup>  
 9.21 a)  $1.99 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$  b)  $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$   
 c)  $2.99 \times 10^4 \text{ m/s}$  d) 464 m/s  
 e) 0.0337 m/s<sup>2</sup>; cero  
 9.23 a) 15.1 m/s<sup>2</sup> b) 15.1 m/s<sup>2</sup>  
 9.25 a) 0.180 m/s<sup>2</sup>; 0; 0.180 m/s<sup>2</sup> b) 0.180 m/s<sup>2</sup>;  
 0.377 m/s<sup>2</sup>; 0.418 m/s<sup>2</sup> c) 0.180 m/s<sup>2</sup>;  
 0.754 m/s<sup>2</sup>; 0.775 m/s<sup>2</sup>  
 9.27 10.7 cm; no  
 9.29 a) 0.831 m/s b) 109 m/s<sup>2</sup>  
 9.31 a) 2.29 b) 1.51 c) 15.7 m/s, 108g  
 9.33 2.99 cm  
 9.35 a) (i) 0.469 kg · m<sup>2</sup> (ii) 0.117 kg · m<sup>2</sup>  
 (iii) cero b) (i) 0.0433 kg · m<sup>2</sup>  
 (ii) 0.0722 kg · m<sup>2</sup> c) (i) 0.0288 kg · m<sup>2</sup>  
 (ii) 0.0144 kg · m<sup>2</sup>  
 9.37 a) 0.0640 kg · m<sup>2</sup> b) 0.0320 kg · m<sup>2</sup>  
 c) 0.0320 kg · m<sup>2</sup>  
 9.39 0.193 kg · m<sup>2</sup>  
 9.41 8.52 kg · m<sup>2</sup>  
 9.43 a)  $3.15 \times 10^{23} \text{ J}$  b) 158 y; no  
 9.45 0.600 kg · m<sup>2</sup>  
 9.47  $7.35 \times 10^4 \text{ J}$   
 9.49 a) 67.3 cm b) 45.5%  
 9.51 a)  $f^5$  b)  $6.37 \times 10^8 \text{ J}$   
 9.53 -88.2 J  
 9.55 sobre un eje paralelo al diámetro y  $(2\sqrt{15})R$  desde el centro de la esfera  
 9.57  $\frac{1}{2}M(a^2 + b^2)$   
 9.59 a)  $ML^2/12$  b)  $ML^2/12$   
 9.61  $MR^2/2$

- 9.63 a)  $\gamma L^2/2$  b)  $ML^2/2$ ; más grande c)  $ML^2/6$ ;  
 un tercio del resultado en b)  
 9.65 en 128 d  
 9.67 a) 0.600 m/s<sup>3</sup> b)  $\alpha = (2.40 \text{ rad/s}^3)t$   
 c) 3.54 s d) 17.7 rad  
 9.69 a) 0.050 rad/s<sup>2</sup> b) 0.300 rad/s  
 c) 5.40 m/s<sup>2</sup> e) 6.18 m/s<sup>2</sup>;  $7.66 \times 10^3 \text{ N}$   
 f) 60.9°  
 9.71 a) 1.70 m/s b) 84.8 rad/s  
 9.73 b) 2.00 m/s<sup>2</sup> d) 0.208 kg · m<sup>2</sup>  
 9.77 a) 7.36 m b) 327 m/s<sup>2</sup>  
 9.79 a)  $2.14 \times 10^{29} \text{ J}$  b)  $2.66 \times 10^{33} \text{ J}$   
 9.81 a)  $Mb^2/6$  b) 182 J  
 9.83 a) -0.784 J b) 5.42 rad/s c) 5.42 m/s  
 d) rapidez de la partícula = 4.43 m/s  
 9.85  $\sqrt{(2gd)(m_b - \mu_s m_a)} / (m_A + m_B + I/R^2)$   
 9.87  $\sqrt{(g/R)(1 - \cos \beta)}$   
 9.89 a)  $2.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  b) 3.40 m/s c) 4.95 m/s  
 9.91 7.23 m  
 9.93 a)  $(247/512)MR^2$  b)  $(383/512)MR^2$   
 9.95 b)  $\frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$   
 9.97 a)  $\frac{3}{2}MR^2$  b) más grande  
 9.99 b)  $5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$  c)  $0.334MR^2$   
 9.101 a)  $s = r_0\theta + \beta\theta^2/2$   
 b)  $\theta = (1/\beta)[\sqrt{r_0^2 + 2\beta v - 2\beta r_0}] - r_0$   
 $c) \omega_z = \frac{v}{\sqrt{r_0^2 + 2\beta vt}}, \alpha_z = \frac{\beta v^2}{(r_0^2 + 2\beta vt)^{3/2}}$ ;  
 no d)  $r_0 = 2.50 \text{ cm}, \beta = 0.247 \mu\text{m/rad};$   
 $2.13 \times 10^4 \text{ rev}$

**Capítulo 10**

- 10.1 a) 40.0 N · m, hacia fuera de la página  
 b) 34.6 N, hacia fuera de la página  
 c) 20.0 N · m, hacia fuera de la página  
 d) 17.3 N · m, hacia dentro de la página  
 e) cero f) cero  
 10.3 2.50 N · m, en sentido antihorario  
 10.5 b) hacia la página c)  $(-1.05 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$   
 10.7 13.1 N · m  
 10.9 a) 14.8 rad/s<sup>2</sup> b) 1.52 s  
 10.11 7.47 N  
 10.13 0.482  
 10.15 a) 7.5 N en la parte horizontal, 18.2 N en la parte colgante b) 0.0160 kg · m<sup>2</sup>  
 10.17 a) 2.65 rad/s<sup>2</sup> b) no c) 3.31 m/s<sup>2</sup>; no  
 10.19 a) 1.80 m/s b) 7.13 J c) (i) 3.60 m/s, a la derecha (ii) 0 (iii) 2.55 m/s, 45° debajo de la horizontal d) (i) 1.80 m/s, a la derecha (ii) 1.80 m/s, a la izquierda (iii) 1.80 m/s, hacia abajo  
 10.21 a) 1/3 b) 2/7 c) 2/5 d) 5/13  
 10.23 a) 0.613 b) no, requiere  $\mu_s = 0.858$   
 c) porque no hay deslizamiento  
 10.25 11.7 m  
 10.27 a) 0.309 rad/s b) 100 J c) 6.67 W  
 10.29 a) 0.38 N · m b) 160 rad c) 59 J d) 59 J  
 10.31 b) 65.6 N  
 10.33 a) 358 N · m b)  $1.79 \times 10^3 \text{ N}$  c) 83.8 m/s  
 10.35 a) 115 kg · m<sup>2</sup>/s, hacia la página  
 b) 125 kg · m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, hacia fuera de la página  
 10.37  $4.71 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$   
 10.39  $4.6 \times 10^3 \text{ rad/s}$   
 10.41 1.14 rev/s  
 10.43 a) 0.60 rev  
 10.45 a) 0.120 rad/s b)  $3.20 \times 10^{-4} \text{ J}$ ; c) trabajo realizado por el insecto  
 10.47 a) 5.88 rad/s  
 10.49 a) 1.62 N b)  $1.80 \times 10^3 \text{ rev/min}$   
 10.51 a) se reduce a la mitad b) se duplica  
 c) se reduce a la mitad d) se duplica  
 e) permanece sin cambio  
 10.53 a) 67.6 N b) 62.9 N c) 3.27 s  
 10.55 a) 840 rpm b) 75 mph c) 60 mph  
 10.57 a) 16.3 rad/s<sup>2</sup> b) no; disminuye  
 c) 5.70 rad/s  
 10.59 a) en  $x = l$  b) en  $x = l$  c) en  $x = (l/2)(1 + [2h/l]^2)$  para  $l > 2h$ ; en  $x = l$  para  $l < 2h$

A-12 Respuestas a los problemas con número impar

- 10.61 a)  $FR$  b)  $FR$ ; sí c)  $\sqrt{4F/MR}$  d)  $2F/M$   
 e)  $4F/M$   
 10.63 a) 266 N b) 4.71 rad/s<sup>2</sup>  
 10.65 a) 2.88 m/s<sup>2</sup> b) 6.13 m/s<sup>2</sup>; mayor que en el caso b)  
 10.67 239 N  
 10.69  $a = \frac{2g}{2 + (R/b)^2}$ ;  $\alpha = \frac{2g}{2b + R^2/b}$ ;  
 $T = \frac{2mg}{2(b/R)^2 + 1}$   
 10.71 en sentido horario; en sentido horario; en sentido horario  
 10.73 a) 1.41 s; 70.5 m/s b)  $t$  mayor,  $v$  menor  
 10.75 29.0 m/s  
 10.77 a) 26.0 m/s b) sin cambio  
 10.79 a)  $\sqrt{20hy/7}$  b) no c) fricción de rodamiento d)  $\sqrt{8hy/3}$   
 10.81 b)  $R =$  radio de la rueda,  
 $T =$  periodo de rotación de la rueda  
 c)  $v_x = \frac{2\pi R}{T} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right]$ ,  
 $v_y = \frac{2\pi R}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ ;  $a_x = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ ,  
 $a_y = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$   
 d)  $t = 0, T, 2T, \dots$ ;  $a_x = 0, a_y = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$   
 e)  $\frac{4\pi^2 R}{T^2}$ , independiente del tiempo  
 10.83 g/3  
 10.85 1.87 m  
 10.87 a)  $6v/19L$  b) 3/19  
 10.89 a) 5.46 rad/s b) 3.17 cm  
 c)  $1.01 \times 10^3$  m/s  
 10.91 a) 2.00 rad/s b) 6.57 rad/s  
 10.93 0.30 rad/s, en sentido horario  
 10.97  $-4.2 \times 10^{-16}$  rad/s por año; decreciente  
 10.101 a)  $a = +\mu_{kg}$ ,  $\alpha = -2\mu_{kg}/R$   
 b)  $\omega_0^2 R^2 / 18\mu_{kg}$  c)  $-M\omega_0^2 R^2 / 6$   
 10.103 a)  $mv_1^2 r_1^2 / r^3$  b)  $(mv_1^2 / 2)[(r_1/r_2)^2 - 1]$   
 c) igual

Capítulo 11

- 11.1 29.8 cm  
 11.3 20.0 kg  
 11.5 5450 N  
 11.7 a) 1000 N, 1.20 m desde el extremo donde se aplica la fuerza de 400 N b) 800 N, 1.25 m desde el extremo donde se aplica la fuerza de 400 N  
 11.9 a) 550 N b) 0.614 m desde A  
 11.11 a) 1920 N b) 1140 N  
 11.13 a)  $T = 2.60w$ ;  $F_{\text{pivote}} = 3.28w$  a 37.6°  
 b)  $T = 4.10w$ ;  $F_{\text{pivote}} = 5.38w$  a 48.8°  
 11.15 140 N para cada bisagra  
 11.17 246 N; 0.34 m detrás de las extremidades delanteras  
 11.19  $T_{\text{izquierda}} = 270$  N,  $T_{\text{derecha}} = 304$  N,  $\theta = 40^\circ$   
 11.21 a) 0.800 m b) en sentido horario  
 c) 0.800 m, en sentido horario  
 11.23 1.4 mm  
 11.25  $2.00 \times 10^{11}$  Pa  
 11.27 a) superior:  $3.1 \times 10^{-3}$ ; inferior:  $2.0 \times 10^{-3}$   
 b) superior: 1.6 mm; inferior: 0.98 mm  
 11.29  $9.1 \times 10^6$  N  
 11.31 a)  $3.33 \times 10^6$  Pa b)  $1.33 \times 10^5$  Pa  
 11.33 a)  $4.8 \times 10^9$  Pa;  $2.1 \times 10^{10}$  Pa<sup>-1</sup>  
 11.35 b)  $6.60 \times 10^2$  N c) 1.8 mm  
 11.37  $3.41 \times 10^7$  Pa  
 11.39 10.2 m/s<sup>2</sup>  
 11.41 a) 525 N b) 222 N, 328 N c) 1.48  
 fuerza del ala: 7300 N hacia arriba; fuerza de la cola: 600 N hacia abajo  
 11.45 a) 140 N b) 6 cm a la derecha  
 11.47 a) 424 N b) 170 N  
 11.49 120 N a la derecha, 160 N hacia arriba  
 11.53 b)  $(Mg/2) \sin \theta$

- 11.55 a)  $V = mg + w, H = T = (w + mg/4) \cot \theta$   
 b) 950 N c) 4.00°  
 11.57 7600 N  
 11.59 a) 2700 N b) 19  
 11.61 a) 4.90 m b) 60 N  
 11.63 a)  $\theta = \arctan(h/d)$ ;  $T = Wd/2\sqrt{h^2 + d^2}$   
 b)  $\frac{Whd}{2(h^2 + d^2)}$ ;  $W = \frac{2h^2 + d^2}{2(h^2 + d^2)}$   
 11.65 a) 1150 N b) 1940 N c) 918 N d) 0.473  
 11.67 la persona arriba: 590 N; la persona abajo: 1370 N; arriba  
 11.69 a)  $w_{\text{máx}} = T_{\text{máx}} h D / (L \sqrt{h^2 + D^2})$   
 11.71 a) 7140 N; de paredes altas b) 7900 N  
 11.73 a) 268 N b) 232 N c) 366 N  
 11.75 a) A: 0.424 N; B: 1.47 N; C: 0.424 N  
 b) 0.848 N  
 11.77 a) se vuelca a 27°, se desliza a 31°; la paca se vuelca antes de deslizarse b) se vuelca a 27°, se desliza a 22°, la paca se desliza antes de volcarse  
 11.79 a)  $F_A = 80$  N,  $F_B = 870$  N b) 1.92 m  
 11.81 a) 3.7 kN, 2.0 kN verticalmente hacia arriba  
 11.83 a) 0.012w b) menor c) 25.0°; se inclina  
 11.85 a) 5.4 mm b) 4.2 mm  
 11.87 a) 0.70 m del alambre A b) 0.45 m del alambre B  
 11.89 a) 1.63 m b) latón:  $2.00 \times 10^8$  Pa; níquel:  $4.00 \times 10^8$  Pa c) latón:  $2.2 \times 10^{-3}$ ; níquel:  $1.9 \times 10^{-3}$   
 11.91 a) 0.36 mm b) 0.045 mm c) 0.33 mm  
 11.93 a)  $(F \cos^2 \theta)/A$  b)  $(F \sin 2\theta)/2A$  c) 0  
 d) 45°  
 11.95 a) 600 N b) 13.5 kN  
 c) deslizarse:  $\mu_s w / (\sin \theta - \mu_s \cos \theta)$ ; volcarse:  $w / [(1/3) \cos \theta + 2 \sin \theta]$ ; 66°  
 11.97 en la menor de  $h^2/L + L/2$  y  $L$   
 11.99  $[(A^2 x/F) - k_0 V_0] / V_0$   
 11.101 a) 0.662 mm b)  $2.20 \times 10^{-2}$  J  
 c)  $8.33 \times 10^{-3}$  J d)  $-3.04 \times 10^{-2}$  J  
 e)  $3.04 \times 10^{-2}$  J

Capítulo 12

- 12.1 2.18  
 12.3 0.026 mm  
 12.5 a)  $2.59 \times 10^8$  m b) no  
 12.7 a)  $2.40 \times 10^{-3}$  N b)  $3.6 \times 10^{-6}$   
 12.9 a)  $6.30 \times 10^{20}$  N, hacia el Sol  
 b)  $4.77 \times 10^{20}$  N, 24.6° hacia la Tierra desde el Sol c)  $2.37 \times 10^{20}$  N, hacia el Sol  
 12.11 a) 0.366 m de la masa m b) (i) inestable (ii) estable  
 12.13  $2.1 \times 10^{-9}$  m/s<sup>2</sup>, hacia abajo  
 12.15  $1.38 \times 10^7$  m  
 12.17 a) 0.37 m/s<sup>2</sup> b) 1700 kg/m<sup>3</sup>  
 12.19 610 N; 83% de peso en la superficie  
 12.21  $5.98 \times 10^{24}$  kg  
 12.23 0.83 m/s; sí  
 12.25 a)  $5.02 \times 10^3$  m/s b)  $6.06 \times 10^4$  m/s  
 12.27 a)  $7.46 \times 10^3$  m/s b) 1.68 h  
 12.29  $2.01 \times 10^{30}$  kg  
 12.31 a) 4.7 m/s; sí b) 2.2 h  
 12.33 a)  $8.3 \times 10^4$  m/s b)  $1.3 \times 10^6$  s  
 12.35 b)  $4.45 \times 10^{12}$  m,  $4.55 \times 10^{12}$  m c) 248 y  
 12.39 a) (i)  $5.31 \times 10^{-9}$  N (ii)  $2.67 \times 10^{-9}$  N  
 12.41 a)  $-GMm/\sqrt{a^2 + x^2}$   
 c)  $GMmx/(a^2 + x^2)^{3/2}$  hacia el centro del anillo e)  $-GMm/a$ , cero  
 12.43 a) 53 N b) 52 N  
 12.45  $1.39 \times 10^{-9}$   
 12.47 a)  $4.3 \times 10^{37}$  kg,  $2.1 \times 10^7 M_{\text{Sol}}$  b) no  
 c)  $6.3 \times 10^{10}$  m; sí  
 12.49 a)  $9.67 \times 10^{12}$  N, a medio camino entre los ejes  $x$  y  $y$  b)  $3.02 \times 10^{-5}$  m/s  
 12.51 b)  $5.39 \times 10^{13}$  N · m, en sentido horario  
 12.53 b) (i)  $1.63 \times 10^{-5}$  m/s,  $4.08 \times 10^{-6}$  m/s (ii)  $2.04 \times 10^{-5}$  m/s c) 31.9 m  
 12.55 a)  $3.58 \times 10^7$  m  
 12.57  $1.8 \times 10^2$  m/s  
 12.59 a)  $1.39 \times 10^7$  m b)  $3.59 \times 10^7$  m  
 12.61  $0.01R_E = 64$  km

- 12.63 0.28%  
 12.65  $6.06 \times 10^3$  km/h  
 12.67  $\sqrt{2Gm_E h / (R_E^2 + hR_E)}$   
 12.69 a) 13.7 km/s b) 13.3 km/s c) 13.2 km/s  
 12.71 a) (i) 2.8 y (ii) 6.1 y b)  $4.90 \times 10^8$  km  
 c)  $4.22 \times 10^8$  km  
 12.73 a)  $GM^2/4R^2$  b)  $\sqrt{GM/4R}$ ,  $4\pi\sqrt{R^3/GM}$   
 c)  $GM^2/4R$   
 12.75  $6.8 \times 10^4$  m/s  
 12.77 a)  $7.91 \times 10^3$  s b) 1.53  
 c)  $8.43 \times 10^3$  m/s,  $5.51 \times 10^3$  m/s  
 d)  $2.41 \times 10^2$  m/s,  $3.26 \times 10^2$ ; perigeo  
 12.79  $3.22 \times 10^9$  J  
 12.81  $9.36$  m/s<sup>2</sup>  
 12.83  $\frac{GMm}{x(x+L)}$   
 12.85 a)  $U(r) = \frac{Gm_E m}{2R_E^2} r^2$  b)  $7.90 \times 10^3$  m/s  
 12.87 a) en contra de la dirección del movimiento en todos los casos b)  $2.24 \times 10^7$  s  
 c) 44.1°  
 12.89  $F = \frac{2GMm}{a^2} \left[ 1 - \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \right]$ , hacia el centro del disco

Capítulo 13

- 13.1 a)  $4.54 \times 10^{-3}$  s,  $1.38 \times 10^3$  rad/s  
 b)  $2.27 \times 10^{-3}$  s,  $2.76 \times 10^3$  rad/s  
 13.3  $5.53 \times 10^3$  rad/s,  $1.14 \times 10^{-3}$  s  
 13.5 0.0500 s  
 13.7 a) 0.167 s b) 37.7 rad/s  
 c)  $8.44 \times 10^{-2}$  kg  
 13.9 a) 0.375 s b) 2.66 Hz c) 16.7 rad/s  
 13.11 a) 0.98 m b)  $\pi/2$  rad  
 c)  $x(t) = (-0.98 \text{ m}) \sin([12.2 \text{ rad/s}]t)$   
 13.13 a)  $-2.71$  m/s<sup>2</sup>  
 b)  $x(t) = (1.46 \text{ cm}) \cos([15.7 \text{ rad/s}]t + 0.715 \text{ rad})$ ,  
 $v_x(t) = (-22.9 \text{ cm/s}) \sin([15.7 \text{ rad/s}]t + 0.715 \text{ rad})$ ,  
 $a_x(t) = (-359 \text{ cm/s}^2) \cos([15.7 \text{ rad/s}]t + 0.715 \text{ rad})$   
 13.15 120 kg  
 13.17 a) 0.253 kg b) 1.22 cm c) 3.05 N  
 13.19 a) 1.51 s b) 26.0 N/m c) 0.308 m/s  
 d) 1.92 N e)  $-0.0125$  m; 0.303 m/s;  
 0.216 m/s<sup>2</sup>  
 13.21 a) 1.48 m/s b)  $2.96 \times 10^{-5}$  J  
 13.23 a) 1.20 m/s b) 1.11 m/s c) 36 m/s<sup>2</sup>  
 d) 13.5 m/s<sup>2</sup> e) 0.36 J  
 13.25  $m = 3M$ ;  $\frac{5}{4}$   
 13.27 0.240 m  
 13.29 a) 0.0778 m b) 1.28 Hz c) 0.624 m/s  
 13.31 a) 4.06 cm b) 1.21 m/s c) 29.8 rad/s  
 13.33 b) 23.9 cm; 1.45 Hz  
 13.35 a)  $2.7 \times 10^{-8}$  kg · m<sup>2</sup>  
 b)  $4.3 \times 10^{-6}$  N · m/rad  
 13.37  $5.12 \times 10^{-2}$  kg · m<sup>2</sup>  
 13.41 a) 0.25 s b) 0.25 s  
 13.43 0.407 oscilaciones/s  
 13.45 2.00 m  
 13.47 10.7 m/s<sup>2</sup>  
 13.49  $0.129$  kg · m<sup>2</sup>  
 13.53 A:  $2\pi\sqrt{L/g}$ ; B:  $(4\pi\sqrt{2/3})\sqrt{L/g} = 0.943T_A$ ;  
 péndulo A  
 13.55 A:  $2\pi\sqrt{L/g}$ ; B:  $2\pi\sqrt{\frac{11L}{10g}} = 1.05T_A$ ;  
 péndulo B  
 13.57 a) 0.393 Hz b) 1.73 kg/s  
 13.59 a) A b) magnitud =  $bA/2m$ , en dirección  $-x$ ;  
 pendiente negativa  
 c)  $a_x(0) = A \left( \frac{b^2}{2m^2} - \frac{k}{m} \right)$ ; si  $b < \sqrt{2mk}$ ,  
 $a(0) < 0$ ; si  $b = \sqrt{2mk}$ ,  $a(0) = 0$ ; si  
 $b > \sqrt{2mk}$ ,  $a(0) > 0$   
 13.61 a) kg/s b) (i)  $5.0F_{\text{máx}}/k$  (ii)  $2.5F_{\text{máx}}/k$

- 13.63 a)  $6.72 \times 10^3 \text{ m/s}^2$  b)  $3.02 \text{ kN}$   
 c)  $18.3 \text{ m/s}$ ,  $75.6 \text{ J}$  d)  $17.6 \text{ kW}$  e)  $12.1 \text{ kN}$ ,  
 $36.7 \text{ m/s}$ ,  $302 \text{ J}$ ,  $141 \text{ kW}$   
 13.65 a) todos sin cambio b) se reduce a  $1/4$   
 c) se reduce a la mitad d)  $1/\sqrt{5}$   
 del valor e)  $U$ : sin cambio;  $K$ :  $1/5$  de su valor  
 13.67 a)  $24.4 \text{ cm}$  b)  $0.220 \text{ s}$  c)  $1.19 \text{ m/s}$   
 13.69 a)  $0.318 \text{ Hz}$ ,  $0.500 \text{ m}$ ,  $3.14 \text{ s}$  b)  $1.57 \text{ s}$   
 13.71  $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\sqrt{2}g}{L}} = 0.921 \left( \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \right)$   
 13.73 a)  $1.49 \text{ s}$  b)  $-2.12 \times 10^{-3} \text{ s}$  por  $s$ ; más corto  
 c)  $0.795 \text{ s}$   
 13.75 a)  $0.150 \text{ m/s}$  b)  $0.112 \text{ m/s}^2$ , hacia abajo  
 c)  $0.700 \text{ s}$  d)  $4.38 \text{ m}$   
 13.77 a)  $2.6 \text{ m/s}$  b)  $0.21 \text{ m}$  c)  $0.49 \text{ s}$   
 13.79  $9.08 \times 10^{24} \text{ kg}$   
 13.81  $1.17 \text{ s}$   
 13.83 a) sí c)  $2.40 \times 10^3 \text{ s}$  d) no  
 13.87 c)  $-7.57 \times 10^{-19} \text{ J}$  e)  $8.39 \times 10^{12} \text{ Hz}$   
 13.89  $0.705 \text{ Hz}$ ;  $14.5^\circ$   
 13.91  $2\pi \sqrt{M/3k}$   
 13.93  $\frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{3g}{2L}}$   
 13.95 c)  $0.430 \text{ m}$   
 13.97 a)  $k_{\text{ef}} = k_1 + k_2$  b)  $k_{\text{ef}} = k_1 + k_2$   
 c)  $k_{\text{ef}} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$  d)  $\sqrt{2}$   
 13.99 a)  $Mv^2/6$  c)  $\omega = \sqrt{3k/M}$ ;  $M' = M/3$   
 13.101  $579 \text{ N/m}$

**Capítulo 14**

- 14.1  $w = 41.8 \text{ N}$ ; no  
 14.3  $7.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; sí  
 14.5  $1.6$   
 14.7  $61.7 \text{ N}$   
 14.9 a)  $1.86 \times 10^6 \text{ Pa}$  b)  $184 \text{ m}$   
 14.11  $0.581$   
 14.13 a) absoluta:  
 $46.7 \text{ lb/in}^2 = 3.22 \times 10^5 \text{ Pa} = 3.18 \text{ atm}$ ;  
 manométrica:  
 $32.0 \text{ lb/in}^2 = 2.21 \times 10^5 \text{ Pa} = 2.18 \text{ atm}$   
 b) no c)  $432 \text{ cm}^2$   
 14.15  $6.27 \times 10^6 \text{ Pa} = 61.9 \text{ atm}$   
 14.17  $6.0 \times 10^4 \text{ Pa}$   
 14.19  $1.41 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $4.03 \times 10^4 \text{ Pa}$   
 14.21  $2.3 \times 10^5 \text{ N}$   
 14.23 a)  $637 \text{ Pa}$  b) (i)  $1170 \text{ Pa}$  (ii)  $1170 \text{ Pa}$   
 14.25  $1.66 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.64 \text{ atm}$   
 14.27  $6.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  $2.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$   
 14.29 a)  $\rho < \rho_{\text{fluido}}$  c) sumergida:  $\rho/\rho_{\text{fluido}}$ ; arriba:  
 $(\rho_{\text{fluido}} - \rho)/\rho_{\text{fluido}}$  d)  $32\%$   
 14.31 a)  $116 \text{ Pa}$  b)  $921 \text{ Pa}$  c)  $0.822 \text{ kg}$ ,  
 $822 \text{ kg/m}^3$   
 14.33  $1.91 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$   
 14.35  $9.6 \text{ m/s}$   
 14.37 a)  $17.0 \text{ m/s}$  b)  $0.317 \text{ m}$   
 14.39  $28.4 \text{ m/s}$   
 14.41  $1.47 \times 10^5 \text{ Pa}$   
 14.43  $12,600 \text{ N}$   
 14.45  $2.03 \times 10^4 \text{ Pa}$   
 14.47 a)  $(p_0 - p)\pi D^2/4$  b)  $776 \text{ N}$   
 14.49 a)  $5.9 \times 10^5 \text{ N}$  b)  $1.76 \times 10^5 \text{ N}$   
 14.51 c) independiente del área de la superficie  
 14.53  $(p - p_0)VR^2/Gmd$   
 14.55 a)  $12,700 \text{ kg/m}^3$ ,  $3140 \text{ kg/m}^3$   
 14.57 a)  $1470 \text{ Pa}$  b)  $13.9 \text{ cm}$   
 14.59  $9.8 \times 10^6 \text{ kg}$ ; sí  
 14.61 a)  $30\%$  b)  $70\%$   
 14.63  $4.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ;  $5.27 \text{ kg}$   
 14.65 a)  $1.10 \times 10^4 \text{ m}^3$  b)  $112 \text{ kN}$   
 14.67 a)  $0.107 \text{ m}$  b)  $2.42 \text{ s}$   
 14.69 a)  $H/2$  b)  $H$   
 14.71  $0.0958 \text{ kg}$   
 14.73  $33.5 \text{ N}$   
 14.75 b)  $12.2 \text{ N}$  c)  $11.8 \text{ N}$   
 14.77 b)  $2.52 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  $0.124$   
 14.79 más arriba por  $5.57 \times 10^{-4} \text{ m}$   
 14.81 a)  $1 - \rho_B/\rho_L$  b)  $(\rho_L - \rho_B)L/(\rho_L - \rho_W)$   
 c)  $4.60 \text{ cm}$

- 14.83 a)  $la/g$  b)  $\omega^2 r^2/2g$   
 14.87 a)  $2\sqrt{h(H-h)}$  b)  $h$   
 14.89 a)  $0.200 \text{ m}^3/\text{s}$  b)  $6.97 \times 10^4 \text{ Pa}$   
 14.91  $3h_1$   
 14.93 a)  $r = r_0(1 + 2gy/v_0^2)^{-1/4}$  b)  $1.10 \text{ m}$   
 14.95 a)  $80.4 \text{ N}$   
 14.97 a)  $\sqrt{2gh}$  b)  $(p_a/\rho g) - h$

**Capítulo 15**

- 15.1 a)  $0.439 \text{ m}$ ;  $1.28 \text{ ms}$  b)  $0.219 \text{ m}$   
 15.3  $220 \text{ m/s} = 800 \text{ km/h}$   
 15.5 a)  $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$  a  $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ;  
 $1.3 \times 10^{-15} \text{ s}$  a  $2.3 \times 10^{-15} \text{ s}$  b) no  
 15.7 a)  $f = 25.0 \text{ Hz}$ ,  $T = 0.0400 \text{ s}$ ,  $k = 19.6 \text{ rad/m}$   
 b)  $y(x, t) = (0.0700 \text{ m}) \cos 2\pi \left( \frac{x}{0.320 \text{ m}} + \frac{t}{0.0400 \text{ s}} \right)$  c)  $+0.0495 \text{ m}$  d)  $0.0050 \text{ s}$   
 15.9 c) dirección  $-x$  para ambos  
 d)  $v_y(x, t) = \omega A \cos(kx + \omega t)$ ,  
 $a_y(x, t) = -\omega^2 A \sin(kx + \omega t)$   
 15.11 a)  $4.0 \text{ mm}$  b)  $0.040 \text{ s}$  c)  $0.14 \text{ m}$ ,  $3.6 \text{ m/s}$   
 d)  $0.24 \text{ m}$ ,  $6.0 \text{ m/s}$  e) no  
 15.13 b) dirección  $+x$   
 15.15 a)  $16.3 \text{ m/s}$  b)  $0.136 \text{ m}$  c) ambas se  
 incrementan en un factor de  $\sqrt{2}$   
 15.17 a)  $0.390 \text{ s}$   
 15.19 a)  $10.0 \text{ m/s}$  b)  $0.250 \text{ m}$   
 c)  $y(x, t) = (3.00 \text{ cm}) \cos[(8.00\pi \text{ rad/m})x - (80.0\pi \text{ rad/s})t]$  d)  $1890 \text{ m/s}^2$  e) sí  
 15.21 a)  $95 \text{ km}$  b)  $2.5 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$   
 c)  $1.1 \times 10^8 \text{ W}$   
 15.23 a)  $0.050 \text{ W/m}^2$  b)  $2.2 \times 10^4 \text{ J}$   
 15.25  $707 \text{ W}$   
 15.33 a)  $(1.33 \text{ m})n$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$   
 b)  $(1.33 \text{ m})(n + \frac{1}{2})$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$   
 15.39 a)  $96.0 \text{ m/s}$  b)  $461 \text{ N}$  c)  $1.13 \text{ m/s}$ ,  
 $426 \text{ m/s}^2$   
 15.41 b)  $2.80 \text{ cm}$  c)  $277 \text{ cm}$  d)  $185 \text{ cm}$ ,  
 $0.126 \text{ s}$ ,  $1470 \text{ cm/s}$  e)  $280 \text{ cm/s}$   
 f)  $y(x, t) = (5.60 \text{ cm}) \sin[(0.0907 \text{ rad/cm})x + (113 \text{ rad/s})t]$   
 15.43 a)  $y(x, t) = (4.60 \text{ mm}) \sin[(6.98 \text{ rad/m})x + (742 \text{ rad/s})t]$  b)  $3^{\text{m}}$  c)  $39.4 \text{ Hz}$   
 15.45 a)  $45.0 \text{ cm}$  b) no  
 15.47 a)  $311 \text{ m/s}$  b)  $246 \text{ Hz}$  c)  $245 \text{ Hz}$ ,  $1.40 \text{ m}$   
 15.49 a)  $20.0 \text{ Hz}$ ,  $126 \text{ rad/s}$ ,  $3.49 \text{ rad/m}$   
 b)  $y(x, t) = (2.50 \text{ mm}) \cos[(3.49 \text{ rad/m})x - (126 \text{ rad/s})t]$   
 c)  $y(t) = (2.50 \text{ mm}) \cos[(126 \text{ rad/s})t]$   
 d)  $y(t) = (2.50 \text{ mm}) \cos[3\pi/2 - (126 \text{ rad/s})t]$  e)  $0.314 \text{ m/s}$   
 f)  $-2.50 \text{ mm}$ ,  $0$   
 15.51 a)  $(7L/2)\sqrt{\mu_1/F}$  b) no  
 15.53 a)  $(2\pi A/\lambda)\sqrt{FL/M}$  b) aumentar en un  
 factor de 4  
 15.55 a)  $4\pi^2 F \Delta x/\lambda^2$   
 15.57 a)  $1, 0, 2, +, 3, -, 4, 0, 5, -, 6, +$  b)  $1, -, 2, +, 3, -, 4, +, 5, -, 6, 0$  c) (a): se invierte el signo de las respuestas; (b): sin cambio  
 15.61 c)  $C/B$   
 15.63 b)  $k$  disminuye en un factor de  $2\sqrt{2}$ ;  
 $\omega$  disminuye en un factor de  $\sqrt{2}$   
 15.65 a)  $7.07 \text{ cm}$  b)  $400.0 \text{ W}$   
 15.67  $\alpha = (v_1^2 - v_2^2)\rho/Y\Delta T$   
 15.69  $n(0.800 \text{ Hz})$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$   
 15.71 b) sí  
 15.73 c)  $2A, 2A\omega, 2A\omega^2$   
 15.75  $230 \text{ N}$   
 15.77 a)  $0, L$  b)  $0, L/2, L$  d) no  
 15.79 a)  $148 \text{ N}$  b)  $26\%$   
 15.81 b)  $\frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \sin^2(kx - \omega t)$   
 c)  $\frac{1}{2}FK A^2 \sin^2(kx - \omega t)$   
 15.83  $\pi/\omega\sqrt{2}$   
 15.85 a)  $99.4 \text{ N}$  c)  $-4.25 \text{ Hz}$ , disminuye

**Capítulo 16**

- 16.1 a)  $0.344 \text{ m}$  b)  $1.2 \times 10^{-5} \text{ m}$   
 c)  $6.9 \text{ m}$ ,  $50 \text{ Hz}$   
 16.3 a)  $7.78 \text{ Pa}$  b)  $77.8 \text{ Pa}$  c)  $778 \text{ Pa}$   
 16.5 a)  $1.33 \times 10^{10} \text{ Pa}$  b)  $9.47 \times 10^{10} \text{ Pa}$   
 16.7  $90.8 \text{ m}$   
 16.9  $81.5^\circ\text{C}$   
 16.11  $0.208 \text{ s}$   
 16.13  $Y/900$   
 16.15 a)  $9.44 \times 10^{-11} \text{ m}$ ;  $0.434 \text{ m}$   
 b)  $5.66 \times 10^{-9} \text{ m}$ ;  $0.101 \text{ m}$   
 c) aire;  $A_{\text{aire}}/A_{\text{agua}} = 60.0$   
 16.17 a)  $1.94 \text{ Pa}$  b)  $4.58 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$   
 c)  $96.6 \text{ dB}$   
 16.19 a)  $4.4 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  b)  $6.39 \text{ dB}$   
 c)  $5.8 \times 10^{-11} \text{ m}$   
 16.21  $14.0 \text{ dB}$   
 16.23 a)  $20.0$   
 16.25 a) *fundamental*: nodo de desplazamiento en  $0.60 \text{ m}$ , nodos de presión en  $0$  y  $1.20 \text{ m}$ ; *primer sobretono*: nodos de desplazamiento en  $0.30 \text{ m}$  y  $0.90 \text{ m}$ , nodos de presión en  $0, 0.60 \text{ m}$  y  $1.20 \text{ m}$ ; *segundo sobretono*: nodos de desplazamiento en  $0.20 \text{ m}$ ,  $0.60 \text{ m}$  y  $1.00 \text{ m}$ , nodos de presión en  $0, 0.40 \text{ m}$ ,  $0.80 \text{ m}$  y  $1.20 \text{ m}$  b) *fundamental*: nodo de desplazamiento en  $0$ , nodo de presión en  $1.20 \text{ m}$ ; *primer sobretono*: nodos de desplazamiento en  $0$  y  $0.80 \text{ m}$ , nodos de presión en  $0.40 \text{ m}$  y  $1.20 \text{ m}$ ; *segundo sobretono*: nodos de desplazamiento en  $0, 0.48 \text{ m}$  y  $0.96 \text{ m}$ , nodos de presión en  $0.24 \text{ m}$ ,  $0.72 \text{ m}$ ,  $1.20 \text{ m}$   
 16.27  $506 \text{ Hz}$ ,  $1520 \text{ Hz}$ ,  $2530 \text{ Hz}$   
 16.29 a)  $267 \text{ Hz}$  b) no  
 16.31 a)  $614 \text{ Hz}$  b)  $1.23 \text{ kHz}$   
 16.33 a)  $172 \text{ Hz}$  b)  $86 \text{ Hz}$   
 16.35  $0.125 \text{ m}$   
 16.37 destructiva  
 16.39  $1.3 \text{ Hz}$   
 16.41  $780 \text{ m/s}$   
 16.43 a)  $375 \text{ Hz}$  b)  $371 \text{ Hz}$  c)  $4 \text{ Hz}$   
 16.45 a)  $0.25 \text{ m/s}$  b)  $0.91 \text{ m}$   
 16.47  $19.8 \text{ m/s}$   
 16.49  $26.8 \text{ Hz}$   
 16.51  $0.095c$ ; hacia nosotros  
 16.53 a)  $36.0^\circ$  b)  $2.23 \text{ s}$   
 16.55 a)  $1.00$  b)  $8.00$  c)  $47.3 \text{ mm}$   
 16.57  $3f_0$  c)  $v = 4Lf_0$   
 16.59 armónico de la flauta  $3N(N = 1, 3, \dots)$  resuena con el armónico de la cuerda  $4N$   
 16.61 a) cerrado b)  $n = 7, n = 9$  c)  $43.9 \text{ cm}$   
 16.63 a)  $v/(2L)$ ,  $v/L$ ,  $3v/(2L)$   
 16.65 a)  $375 \text{ m/s}$  b)  $1.39$  c)  $0.8 \text{ cm}$   
 16.67 a)  $n(77.3 \text{ Hz})$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$   
 16.69  $1.27$   
 16.71 a)  $548 \text{ Hz}$  b)  $652 \text{ Hz}$   
 16.73 a)  $I = 2\pi^2 \sqrt{\rho B F^2} (\Delta R)^2$   
 b)  $P = 8\pi^3 \sqrt{\rho B F^2 R^2} (\Delta R)^2$   
 c)  $A = (R/d)\Delta R$ ,  $p_{\text{máx}} = 2\pi \sqrt{\rho B} (R/d)\Delta R$ ,  
 $I = 2\pi^2 \sqrt{\rho B} (R/d)^2 (\Delta R)^2$   
 16.75 a)  $6.74 \text{ cm}$  b)  $147 \text{ Hz}$   
 16.77 b)  $2.0 \text{ m/s}$   
 16.79 a)  $1.2 \times 10^6 \text{ m/s}$  b)  $3.6 \times 10^{16} \text{ m} = 3.8 \text{ ly}$   
 c)  $5.2 \times 10^3 \text{ ly}$ ;  $4100 \text{ BCE}$   
 16.81 a)  $f_0 \left( \frac{2v_w}{v - v_w} \right)$  b)  $f_0 \left( \frac{2v_w}{v + v_w} \right)$   
 16.83 d)  $9.69 \text{ cm/s}$ ;  $6.67 \times 10^2 \text{ m/s}^2$

**Capítulo 17**

- 17.1  $-81.0^\circ\text{F}$  b)  $134.1^\circ\text{F}$  c)  $88.0^\circ\text{F}$   
 17.3  $38 \text{ F}^\circ$   
 17.5 a)  $-18.0 \text{ F}^\circ$  b)  $-10.0 \text{ C}^\circ$   
 17.7 a)  $104.4^\circ\text{F}$ ; sí b)  $54^\circ\text{F}$   
 17.9 a)  $216.5 \text{ K}$  b)  $325.9 \text{ K}$  c)  $205.4 \text{ K}$   
 17.11 a)  $-210^\circ\text{C}$  b)  $63 \text{ K}$   
 17.13  $0.964 \text{ atm}$   
 17.15 a)  $-282^\circ\text{C}$  b) no,  $4.76 \times 10^4 \text{ Pa}$   
 17.17  $0.39 \text{ m}$   
 17.19  $1.9014 \text{ cm}$ ,  $1.8964 \text{ cm}$   
 17.21  $2.3 \times 10^{-5} (\text{C}^\circ)^{-1}$   
 17.23  $11 \text{ L}$

- 17.25  $1.7 \times 10^{-5} \text{ (C}^\circ\text{)}^{-1}$   
 17.27 a) 1.431 cm<sup>2</sup> b) 1.437 cm<sup>2</sup>  
 17.29 0.261 mm  
 17.31 a)  $3.2 \times 10^{-5} \text{ (C}^\circ\text{)}^{-1}$  b)  $2.5 \times 10^9 \text{ Pa}$   
 17.33  $5.79 \times 10^5 \text{ J}$   
 17.35  $240 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$   
 17.37  $1.4 \times 10^3 \text{ s}$   
 17.39 a)  $1.21 \times 10^{-2} \text{ C}^\circ$   
 17.41  $45.1 \text{ C}^\circ$   
 17.43 a)  $114 \text{ C}^\circ$  b)  $6.35 \text{ C}^\circ$   
 17.45 a)  $215 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  b) agua c) demasiado pequeño  
 17.47 8 min  
 17.49  $3.64 \times 10^4 \text{ J} = 8.69 \times 10^3 \text{ cal} = 34.5 \text{ Btu}$   
 17.51  $2.39 \times 10^4 \text{ Btu/h} = 7.01 \times 10^3 \text{ W}$   
 17.53  $357 \text{ m/s}$   
 17.55 3.45 L  
 17.57  $5.50 \times 10^5 \text{ J}$   
 17.59 0.0940 kg  
 17.61 2.10 kg  
 17.63 190 g  
 17.65 a)  $222 \text{ K/m}$  b)  $10.7 \text{ W}$  c)  $73.3 \text{ C}^\circ$   
 17.67 a)  $-5.8 \text{ C}^\circ$  b)  $11 \text{ W/m}^2$   
 17.69  $7.1 \times 10^2 \text{ Btu} = 7.5 \times 10^5 \text{ J}$   
 17.71  $105.5 \text{ C}^\circ$   
 17.73 a)  $21.3 \text{ kW}$  b)  $6.44 \text{ kW}$   
 17.75 167 W  
 17.77 2.1 cm<sup>2</sup>  
 17.79 a)  $35.2 \text{ M}$  b)  $39.6 \text{ C}^\circ$   
 17.81 b)  $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ ,  $-23 \text{ kg/m}^3$   
 17.83  $37.5 \text{ C}^\circ$   
 17.85  $35.0 \text{ C}^\circ$   
 17.87  $23.0 \text{ cm}$ ,  $7.0 \text{ cm}$   
 17.89 b)  $1.9 \times 10^8 \text{ Pa}$   
 17.91 a)  $87 \text{ C}^\circ$  b)  $-80 \text{ C}^\circ$   
 17.93  $20.2 \text{ C}^\circ$   
 17.95 a) 54.3  
 17.97 a)  $83.6 \text{ J}$  b)  $1.86 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$   
 c)  $5.60 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$   
 17.99 a)  $2.7 \times 10^7 \text{ J}$  b)  $6.89 \text{ K}$  c)  $19.3 \text{ K}$   
 17.101 2.53 cm  
 17.103 a)  $86.1 \text{ C}^\circ$  b) sin hielo,  $0.130 \text{ kg}$  de agua líquida, sin vapor  
 17.105 a)  $100 \text{ C}^\circ$  b)  $0.0214 \text{ kg}$  de vapor,  $0.219 \text{ kg}$  de agua líquida  
 17.107 1.743 kg  
 17.109 a)  $94 \text{ W}$  b) 1.3  
 17.111 2.9  
 17.113 c)  $6.0 \times 10^5 \text{ s}$  (aprox. 170 h) d)  $1.5 \times 10^{10} \text{ s}$  (aprox. 500 y); no  
 17.115  $0.106 \text{ W/m} \cdot \text{K}$   
 17.117  $5.82 \times 10^{-3} \text{ kg}$   
 17.119 a)  $69.6 \text{ C}^\circ$   
 17.121  $1.76 \text{ C}^\circ$   
 17.123 a)  $103 \text{ C}^\circ$  b)  $27 \text{ W}$   
 17.125 a) lo contrario b)  $1.2 \times 10^{-4}$  c)  $5.2 \text{ s}$   
 d) dentro de  $1.93 \text{ C}^\circ$   
 17.127 a) (i)  $280 \text{ W}$  (ii)  $0.248 \text{ W}$   
 (iii)  $2.10 \times 10^3 \text{ W}$  (iv)  $116 \text{ W}$ ; radiación proveniente del Sol b)  $3.72 \text{ L/h}$  c)  $1.4 \text{ L/h}$

### Capítulo 18

- 18.1 a)  $56.2 \text{ mol}$  b)  $6.81 \times 10^6 \text{ Pa} = 67.2 \text{ atm}$   
 18.3  $0.959 \text{ atm}$   
 18.5 a)  $3 \times 10^{27}$  moléculas  
 b)  $3 \times 10^{19}$  moléculas/cm<sup>3</sup>  
 18.7  $503.0 \text{ C}^\circ$   
 18.9  $3.36 \times 10^5 \text{ Pa}$   
 18.11  $0.159 \text{ L}$   
 18.13  $1.05 \text{ atm}$   
 18.15 a)  $70.2 \text{ C}^\circ$  b) sí  
 18.17 850 m  
 18.19 la densidad en el nivel del mar es 1.2% mayor  
 18.21  $2.28 \times 10^4 \text{ Pa}$   
 18.23 a)  $58720 \text{ Pa}$  b)  $3.88 \text{ cm}$   
 18.25 a)  $8.2 \times 10^{-17} \text{ atm}$  b) no  
 18.27  $55.6 \text{ mol}$ ,  $3.35 \times 10^{25}$  moléculas  
 18.29 a)  $9.00 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  b)  $3.10 \times 10^{-10} \text{ m}$   
 c) aproximadamente igual  
 18.31 b) 1.004  
 18.33 a) podría ser cierto b) podría ser cierto  
 c) no es cierto d) debe ser cierto e) podría ser cierto  
 18.35 a)  $1.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ ; no,  $0.64\%$  de  $c$   
 b)  $7.3 \times 10^{10} \text{ K}$

- 18.37 a)  $6.21 \times 10^{-21} \text{ J}$  b)  $2.34 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$   
 c)  $484 \text{ m/s}$  d)  $2.57 \times 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$   
 e)  $1.24 \times 10^{19} \text{ N}$  f)  $1.24 \times 10^{-17} \text{ Pa}$   
 g)  $8.15 \times 10^{21}$  moléculas  
 h)  $2.45 \times 10^{22}$  moléculas  
 18.39  $3800 \text{ C}^\circ$   
 18.41 a)  $1560 \text{ J}$  b)  $935 \text{ J}$   
 18.43 a)  $741 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  b)  $5.65 \text{ kg}$ ;  $4850 \text{ L}$   
 18.45 a)  $924 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  b) la tabla 17.3 da  $910 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$   
 18.49 a)  $337 \text{ m/s}$  b)  $380 \text{ m/s}$  c)  $412 \text{ m/s}$   
 18.51 a)  $610 \text{ Pa}$ ; sólido  $\rightarrow$  vapor  
 b)  $2.21 \times 10^7 \text{ Pa}$ ; sólido  $\rightarrow$  líquido  $\rightarrow$  vapor  
 18.53 no; no  
 18.55  $0.213 \text{ kg}$   
 18.57 a)  $-178 \text{ C}^\circ$  b)  $1.17 \times 10^{26}$  moléculas/m<sup>3</sup>  
 c) la de Titán es 4.7 veces mayor que la de la Tierra  
 18.59  $1.92 \text{ atm}$   
 18.61 a) 31 b)  $8.41 \times 10^3 \text{ N}$  c)  $7.8 \times 10^3 \text{ N}$   
 18.63 a)  $26.2 \text{ m/s}$  b)  $16.1 \text{ m/s}$ ,  $5.44 \text{ m/s}$   
 c)  $1.74 \text{ m}$   
 18.65  $5.0 \times 10^{27}$   
 18.67 a) igual energía cinética traslacional; A tiene mayor rapidez rms b) B  
 c)  $4250 \text{ C}^\circ$  d) B  
 18.69 b)  $303 \text{ mol/m}^3$  c) van der Waals  
 18.71 a)  $4.65 \times 10^{-26} \text{ kg}$  b)  $6.11 \times 10^{-21} \text{ J}$   
 c)  $2.04 \times 10^{23}$  moléculas d)  $1.24 \times 10^4 \text{ J}$   
 18.73 b)  $r_2$  c)  $r_1 = R_0/2^{1/6}$ ,  $r_2 = R_0$ ,  $r_1/r_2 = 2^{-1/6}$   
 d)  $U_0$   
 18.75 a)  $517 \text{ m/s}$  b)  $299 \text{ m/s}$   
 18.77 b)  $1.40 \times 10^3 \text{ K}$ ,  $1.01 \times 10^4 \text{ K}$   
 c)  $6.37 \times 10^3 \text{ K}$ ,  $4.59 \times 10^2 \text{ K}$   
 18.79 a)  $1.24 \times 10^{14} \text{ kg}$  b)  $4.16 \times 10^{11}$   
 c)  $2.95 \times 10^{-16} \text{ m}$ , no  
 18.81 a)  $2R = 16.6 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  b) menor  
 18.83  $\text{CO}_2$ ;  $20.79 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ,  $0.270$ ;  $\text{SO}_2$ ;  
 $24.94 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ,  $0.205$ ;  $\text{H}_2\text{S}$ ;  $24.94 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ,  $0.039$   
 18.87 b)  $0.0420N$  c)  $(2.94 \times 10^{-21})N$   
 d)  $0.0297N$ ,  $(2.08 \times 10^{-21})N$  e)  $0.0595N$ ,  
 $(4.15 \times 10^{-21})N$   
 18.89 42.6%  
 18.91 a)  $4.5 \times 10^{11} \text{ m}$  b)  $703 \text{ m/s}$ ,  $6.4 \times 10^8 \text{ s}$   
 (aprox. 20 años), no c)  $1.4 \times 10^{-14} \text{ Pa}$   
 d) aprox.  $650 \text{ m/s}$ ; evaporarse  
 f)  $2 \times 10^5 \text{ K}$ ; no  
 18.93 d)  $T_c = 8a/27Rb$ ,  $(V/n)_c = 3b$   
 e)  $p_c = a/27b^2$  f)  $8/3$  g) 3.28, 3.44, 4.35

### Capítulo 19

- 19.1 b) 1330 J  
 19.3 b)  $-6540 \text{ J}$   
 19.5 a)  $0.88 \text{ atm}$   
 19.7 a)  $(p_1 - p_2)(V_2 - V_1)$  b) el negativo del trabajo realizado en dirección contraria  
 19.9 a)  $3.78 \times 10^4 \text{ J}$  b)  $7.72 \times 10^4 \text{ J}$  c) no  
 19.11 a)  $410 \text{ J}$  b) se eleva  
 19.13 a)  $16.4 \text{ min}$  b)  $139 \text{ m/s} = 501 \text{ km/h}$   
 19.15 a) cero b)  $T_b = 2T_a$  c)  $U_b = U_a + 400 \text{ J}$   
 19.17 a) positivo b) I: positivo; II: negativo  
 c) entra d) I: entra; II: sale  
 19.19 a)  $1.67 \times 10^5 \text{ J}$  b)  $2.03 \times 10^6 \text{ J}$   
 19.21 b)  $208 \text{ J}$  c) en el pistón d)  $712 \text{ J}$   
 e)  $920 \text{ J}$  f)  $208 \text{ J}$   
 19.23 a)  $948 \text{ K}$  b)  $900 \text{ K}$   
 19.25  $2/5$   
 19.27 a)  $25.0 \text{ C}^\circ$  b)  $17.9 \text{ C}^\circ$  c) a  
 19.29 a)  $-605 \text{ J}$  b) 0 c) sí,  $605 \text{ J}$ , libera  
 19.31 a)  $747 \text{ J}$  b) 1.30  
 19.33 a)  $4.76 \times 10^5 \text{ Pa}$  b)  $-1.06 \times 10^4 \text{ J}$   
 c) 1.59; se calienta  
 19.35  $5.1 \times 10^3 \text{ J}$ ; aumenta; aumenta  
 19.37 b)  $224 \text{ J}$  c)  $Q = 0$  d)  $-224 \text{ J}$   
 19.39  $11.6 \text{ C}^\circ$   
 19.41 a) aumenta b)  $4800 \text{ J}$   
 19.43 a)  $45.0 \text{ J}$  b) libera  $65.0 \text{ J}$   
 c)  $Q_{ad} = 23.0 \text{ J}$ ,  $Q_{ab} = 22.0 \text{ J}$   
 19.45 a) igual b) absorbe  $4000 \text{ J}$   
 c) absorbe  $8000 \text{ J}$   
 19.47 b)  $-2460 \text{ J}$   
 19.49 a)  $1173 \text{ K}$  b)  $1.22 \times 10^4 \text{ J}$

- c)  $4.26 \times 10^4 \text{ J}$  d)  $4.57 \times 10^4 \text{ J}$   
 19.51  $-0.226 \text{ m}^3$   
 19.53 a)  $4.32 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  b)  $648 \text{ J}$   
 c)  $7.15 \times 10^2 \text{ J}$  d)  $7.14 \times 10^5 \text{ J}$   
 e) no hay diferencia sustancial  
 19.55  $3.4 \times 10^3 \text{ J/kg}$   
 19.57 b)  $11.9 \text{ C}^\circ$   
 19.59 a)  $0.173 \text{ m}$  b)  $206 \text{ C}^\circ$  c)  $7.46 \times 10^4 \text{ J}$   
 19.61 a)  $Q = 300 \text{ J}$ ,  $\Delta U = 0$  b)  $Q = 0$ ,  
 $\Delta U = -300 \text{ J}$  c)  $Q = 750 \text{ J}$ ,  $\Delta U = 450 \text{ J}$   
 19.63 a)  $W = 738 \text{ J}$ ,  $Q = 2588 \text{ J}$ ,  $\Delta U = 1850 \text{ J}$   
 b)  $W = 0$ ,  $Q = -1850 \text{ J}$ ,  $\Delta U = -1850 \text{ J}$   
 c) 0  
 19.65 a)  $W = -187 \text{ J}$ ,  $Q = -654 \text{ J}$ ,  $\Delta U = -467 \text{ J}$   
 b)  $W = 113 \text{ J}$ ,  $Q = 0$ ,  $\Delta U = -113 \text{ J}$   
 c)  $W = 0$ ,  $Q = 580 \text{ J}$ ,  $\Delta U = 580 \text{ J}$   
 19.67 a)  $360 \text{ K}$ ,  $2.67 \times 10^2 \text{ Pa}$  b) 1.14 L

### Capítulo 20

- 20.1 a)  $6500 \text{ J}$  b) 34%  
 20.3 a) 23% b)  $12,400 \text{ J}$  c)  $0.350 \text{ g}$   
 d)  $222 \text{ kW} = 298 \text{ hp}$   
 20.5 a) 25% b)  $970 \text{ MW}$   
 20.7 13.8  
 20.9 a)  $1.62 \times 10^4 \text{ J}$  b)  $5.02 \times 10^4 \text{ J}$   
 20.11 a)  $767 \text{ W}$  b) 7.27  
 20.13 a)  $215 \text{ J}$  b)  $378 \text{ K}$  c) 39.1%  
 20.15 a)  $4.2 \times 10^4 \text{ J}$  b)  $715 \text{ K}$   
 20.17 a)  $492 \text{ J}$  b)  $212 \text{ W}$  c) 5.4  
 20.19 a)  $400 \text{ W}$  b) 10.7 c)  $36.9 \text{ kg}$   
 20.21  $4500 \text{ J}$   
 20.23  $37.1 \text{ hp}$   
 20.25 a)  $428 \text{ J/K}$  b)  $-392 \text{ J/K}$  c)  $36 \text{ J/K}$   
 20.27 a) irreversible b)  $+1.25 \times 10^4 \text{ J/K}$ ;  
 congruente  
 20.29  $6.31 \text{ J/K}$   
 20.31 a)  $6.05 \times 10^3 \text{ J/K}$  b) cinco veces mayor en el caso de vaporización  
 20.33 galio:  $+6.63 \text{ J/K}$ ; mano:  $-6.48 \text{ J/K}$ ; mayor para el galio  
 20.35 a) no b)  $18.3 \text{ J/K}$  c)  $18.3 \text{ J/K}$   
 20.37 a) 0.200 b)  $8000 \text{ J}$   
 20.39 a)  $27.8 \text{ K}$  b)  $15.3 \text{ K}$   
 20.41 b) absorbido:  $bc$ ; despedido:  $ab, ca$   
 c)  $T_a = T_b = 241 \text{ K}$ ,  $T_c = 481 \text{ K}$   
 d)  $Q_{\text{neto}} = W_{\text{neto}} = 610 \text{ J}$  e) 8.7%  
 20.43 a) entra:  $2.10 \times 10^4 \text{ J}$ ; sale:  $1.66 \times 10^4 \text{ J}$   
 b)  $4.4 \times 10^3 \text{ J}$ ; 21% c) la máxima es  $e = 67\%$   
 20.45 a)  $7.0\%$  b)  $3.0 \times 10^6 \text{ J/s}$ ;  $2.8 \times 10^6 \text{ J/s}$   
 c)  $6 \times 10^5 \text{ kg/h} = 6 \times 10^5 \text{ L/h}$   
 20.47 a)  $p_1 = 2.00 \text{ atm}$ ,  $V_1 = 4.00 \text{ L}$ ;  $p_2 = 2.00 \text{ atm}$ ,  
 $V_2 = 6.00 \text{ L}$ ;  $p_3 = 1.11 \text{ atm}$ ,  $V_3 = 6.00 \text{ L}$ ;  
 $p_4 = 1.67 \text{ atm}$ ,  $V_4 = 4.00 \text{ L}$   
 b) (i)  $Q = 1422 \text{ J}$ ,  $W = 405 \text{ J}$   
 (ii)  $Q = -1355 \text{ J}$ ,  $W = 0$   
 (iii)  $Q = W = -274 \text{ J}$  (iv)  $Q = 339 \text{ J}$ ,  
 $W = 0$  c)  $131 \text{ J}$  d) 7.5%;  $e_{\text{Carnot}} = 44\%$   
 20.49 a)  $a \rightarrow b$ :  $Q = 2.25 \times 10^3 \text{ J}$ ,  
 $W = 0.90 \times 10^3 \text{ J}$ ,  $\Delta U = 1.35 \times 10^3 \text{ J}$ ;  $b \rightarrow c$ :  
 $Q = -2.40 \times 10^3 \text{ J}$ ,  $W = 0$ ,  
 $\Delta U = -2.40 \times 10^3 \text{ J}$ ;  $c \rightarrow a$ :  
 $Q = 0.45 \times 10^3 \text{ J}$ ,  $W = -0.60 \times 10^3 \text{ J}$ ,  
 $\Delta U = 1.05 \times 10^3 \text{ J}$  b)  
 $Q = W = 0.30 \times 10^3 \text{ J}$ ,  $\Delta U = 0$  c) 11.1%  
 20.51  $\left(\frac{T_H - T'}{T_H}\right)\left(\frac{T' - T_C}{T'}\right)$ ; menor  
 20.53 a)  $122 \text{ J}$ ,  $78 \text{ J}$  b)  $5.10 \times 10^{-4} \text{ m}^3$   
 c)  $p_b = 2.32 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,  $V_b = 4.81 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ,  
 $T_b = 771 \text{ K}$ ;  $p_c = 4.00 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,  
 $V_c = 4.81 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ,  $T_c = 1333 \text{ K}$ ;  
 $p_d = 1.47 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_d = 5.10 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,  
 $T_d = 518 \text{ K}$  d)  $e = 61.1\%$ ;  $e_{\text{Carnot}} = 77.5\%$   
 20.55 b)  $6.20 \times 10^4 \text{ J}$  c)  $3.42 \times 10^4 \text{ J}$   
 d) antes:  $6.20 \times 10^4 \text{ J}$ ; después:  $3.42 \times 10^4 \text{ J}$   
 20.57 a)  $88.5 \text{ J}$  b)  $17.7 \text{ J}$   
 20.59 a)  $b \rightarrow c$ :  $nC_V \ln(T_c/T_b)$ ;  $d \rightarrow a$ :  
 $nC_V \ln(T_a/T_d)$   
 b)  $nC_V \ln\left(\frac{T_c T_a}{T_b T_d}\right)$   
 20.61 a)  $-143 \text{ J/K}$  b)  $+196 \text{ J/K}$  c) cero  
 d)  $+53 \text{ J/K}$











