

# Sonido y ondas

12.1 Vibraciones y ondas

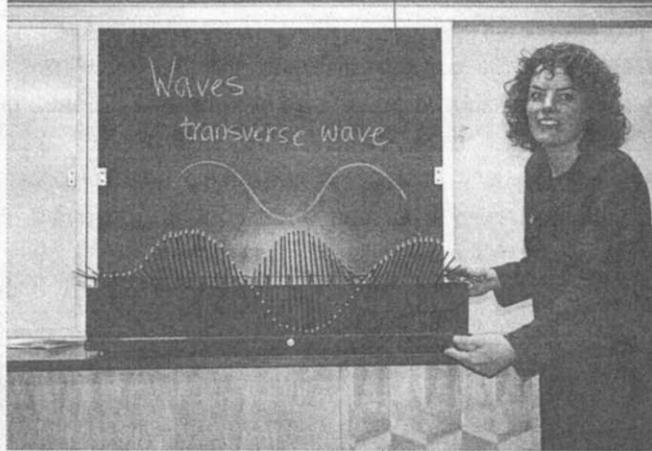
12.2 Movimiento ondulatorio

12.3 Ondas transversales y longitudinales

12.4 Ondas sonoras

12.5 Reflexión y refracción del sonido

12.6 Vibraciones forzadas y resonancia



En el salón de clases Diane Riendeau usa una máquina generadora de ondas y muestra a sus alumnos cómo una vibración produce una onda.

12.7 Interferencia

12.8 Efecto Doppler

12.9 Barreras de ondas y ondas de proa

12.10 Ondas de choque y estampido sónico

12.11 Sonidos musicales

Muchas de las cosas del mundo que nos rodea se mueven y oscilan: la superficie de una campana, la cuerda de una guitarra, la lengüeta de un clarinete, los labios sobre la boquilla de un clarinete y las cuerdas vocales de tu laringe cuando hablas o cantas. Todas estas cosas *vibran*. Cuando vibran en el aire, hacen que las moléculas del aire que tocan se muevan y oscilen también, exactamente en la misma forma, y dichas vibraciones se dispersan en todas direcciones haciéndose más débiles, perdiendo energía en forma de calor, hasta que se extinguen por completo. Sin embargo, si tales vibraciones llegan a tu oído, en cambio, se transmitirían a una parte de tu cerebro y escucharías sonido.

## 12.1 Vibraciones y ondas

En general, todo lo que va y viene, va de un lado a otro y regresa, entra y sale, se enciende y apaga, sube y baja, está vibrando. Una **vibración** es una oscilación en el tiempo. Un vaivén tanto en el espacio como en el tiempo es una **onda**, la cual se extiende de un lugar a otro. La luz y el sonido son vibraciones que se propagan en el espacio en forma de ondas; sin embargo, se trata de dos clases de ondas muy distintas. El sonido es la propagación de vibraciones a través de un medio material sólido, líquido o gaseoso. Si no hay medio que vibre, entonces el sonido no es posible. El sonido no puede viajar en el vacío. No obstante, la luz sí puede viajar en el vacío ya que, como veremos en los capítulos siguientes, es una vibración de campos eléctricos y magnéticos no materiales, es decir, una vibración de energía pura. La luz puede atravesar muchos materiales, pero no necesita de alguno de ellos. Esto se ve cuando la luz solar viaja por el vacío y llega a la Tierra.

La relación entre vibración y una onda se demuestra en la figura 12.1. Una pluma que esté fija a una

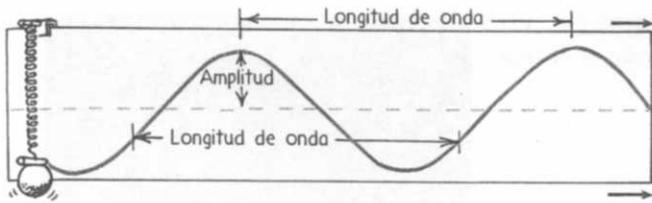


FIGURA 12.1

FIGURA INTERACTIVA

Cuando la lenteja oscila hacia arriba y hacia abajo, la pluma traza una curva senoide sobre el papel, que se mueve en dirección horizontal con rapidez constante.

lenteja de un resorte vertical vibrará de arriba abajo y trazará una onda en una hoja de papel que se mueva horizontalmente a rapidez constante. La

**The Physics Place**

Ondas y vibraciones

onda es en realidad una *curva senoide*, que es una representación gráfica de una onda. Al igual que con una onda de agua, a los puntos altos de una senoide se les llama *crestas*; y a los puntos bajos, *valles*. La línea recta punteada representa la posición "inicial", o el punto medio de la vibración. Se aplica el término **amplitud** para indicar la distancia del punto medio a la cresta (o valle) de la onda. Así, la amplitud es igual al desplazamiento máximo con respecto al equilibrio.

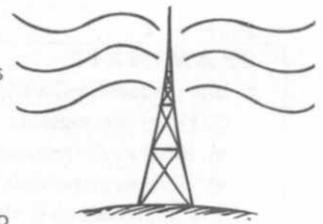
La **longitud de onda** es la distancia desde la cima de una cresta hasta la cima de la siguiente cresta; también, es la distancia entre cualesquiera dos partes idénticas sucesivas de la onda. Las longitudes de onda de las olas en una playa se miden en metros; las de las ondulaciones en un estanque, en centímetros; y las de la luz, en milésimas de millonésimas de metro (nanómetros). Cualquier onda tiene una fuente de vibración.

La rapidez de repetición en una vibración se describe por su **frecuencia**. La frecuencia de un péndulo oscilante, o de un objeto fijo a un resorte, indica la cantidad de oscilaciones o vibraciones que efectúa en determinado tiempo (que por lo general es un segundo). Una oscilación completa de ida y vuelta es una vibración. Si se hace en un segundo, la frecuencia es una vibración por segundo. Si en un segundo hay dos vibraciones, la frecuencia será dos vibraciones por segundo.

La unidad de frecuencia se llama **hertz** (Hz), en honor a Heinrich Hertz, quien demostró la existencia de las ondas de radio en 1886. Una vibración por segundo es 1 hertz; dos vibraciones por segundo son 2 hertz, y así sucesivamente. Las frecuencias mayores se miden en kilohertz (kHz), e incluso las frecuencias todavía mayores en megahertz (MHz). Las ondas de radio AM (amplitud modulada) se miden en kilohertz; en tanto

FIGURA 12.2

La fuente de todas las ondas es algo que vibra. Los electrones de la antena transmisora vibran 940,000 veces cada segundo y producen ondas de radio de 940 kHz. Las ondas de radio no pueden verse ni escucharse, pero envían un patrón que indica a los aparatos de radio o televisión qué sonidos o imágenes formar.



que las de radio FM (frecuencia modulada) se miden en megahertz. Una estación de radio de AM de 960 kHz, por ejemplo, transmite ondas cuya frecuencia es de 960,000 vibraciones por segundo. Una estación de radio de FM de 101.7 MHz transmite a 101,700,000 de hertz. Estas frecuencias de las ondas de radio son las que



Una abeja bate sus alas cientos de veces por segundo: ¡el poder de la miel!

tienen los electrones que son forzados a vibrar en la antena de una torre emisora de una estación de radio. Las frecuencias aún mayores se miden en gigahertz (GHz), mil millones de vibraciones por segundo. Los teléfonos celulares funcionan en el rango de GHz, ¡lo cual significa que los electrones interiores están vibrando al unísono miles de millones de veces por segundo! Las frecuencias de los electrones vibratorios y de la onda que producen son iguales.

El **periodo** de una vibración o una onda es el tiempo que tarda en completar una vibración, para un ciclo completo. Si se conoce la frecuencia de un objeto, se puede determinar su periodo, y viceversa. Por ejemplo, imagina que un péndulo hace dos oscilaciones en un segundo. Su frecuencia de vibración será de 2 Hz. El tiempo necesario para terminar una vibración, es decir, el periodo de vibración, es de 1/2 segundo. O bien, si la frecuencia de vibración es de 3 Hz, entonces, el periodo es 1/3 de segundo. La frecuencia y el periodo son recíprocos entre sí:

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{periodo}}$$

o, viceversa,

$$\text{Periodo} = \frac{1}{\text{frecuencia}}$$

### PARA Y EXAMÍNA

- Una maquinilla eléctrica (rasuradora) completa 60 ciclos por segundo.
  - ¿Cuál es su frecuencia?
  - ¿Cuál es su periodo?
- Si la diferencia en la altura entre la cresta y el valle de una onda es de 60 cm, ¿cuál será la amplitud de la onda?
- Las ráfagas de aire hacen que el edificio de Sears en Chicago oscile completando un ciclo cada 10 segundos.
  - ¿Cuál es su frecuencia?
  - ¿Cuál es su periodo?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

- 60 ciclos por segundo o 60 Hz
  - 1/60 segundos.
- La amplitud es de 30 cm, la mitad de la distancia de la altura de cresta a valle.
- 1/10 Hz
  - 10 s.



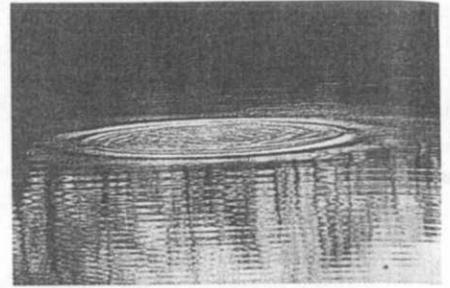
La frecuencia de una onda es igual a la frecuencia de su fuente vibratoria, lo cual es válido no sólo para las ondas sonoras sino, como veremos en el siguiente capítulo, también para las ondas luminosas. Estrictamente hablando, las ondas que estamos estudiando son ondas periódicas, pues tienen periodos característicos.

## 12.2 Movimiento ondulatorio

Si dejas caer una piedra en un estanque tranquilo, las ondas viajarán hacia afuera, formando círculos. La energía es transferida por la onda, viajando de un lugar a otro. El agua no va a ningún lado. Esto se observa en las olas que se encuentran con una hoja flotante. La hoja sobre la superficie subirá y bajará cuando pase por ella la onda, pero terminará donde estaba antes. Se mueven las ondas, no el agua. Lo mismo es válido para las ondas de viento sobre un campo de césped alto en un día con ráfagas. Las ondas viajan a través del césped, en tanto que las plantas de césped individuales permanecen en su lugar; en cambio, los tallos del césped se balancean de un lado a otro con límites bien definidos, pero no van más allá. Cuando hablas, las moléculas en el aire propagan la perturbación por el aire a aproximadamente 340 metros por segundo. La perturbación, no el aire mismo, viaja a través del recinto a esta rapidez. En este ejemplo, cuando termina el movimiento ondulatorio, el agua, el césped y el aire regresan a sus posiciones iniciales.

FIGURA 12.3

Ondas en el agua.



Longitud de onda

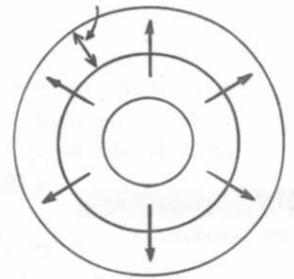


FIGURA 12.4

Vista superior de las ondas en el agua.

Una característica del movimiento ondulatorio es el hecho de que el medio que transporta la onda regresa a sus condiciones iniciales después de que pase la perturbación.

### Rapidez de una onda

La rapidez del movimiento ondulatorio periódico se relaciona con la frecuencia y la longitud de onda de las ondas. Lo entenderemos con el caso sencillo de las ondas en el agua (figuras 12.3 y 12.4). Si fijáramos los ojos en un punto estacionario de la superficie del agua y observáramos las olas que pasan por él, podríamos medir cuánto tiempo pasa entre la llegada de una cresta y la llegada de la siguiente cresta (el periodo), y también veríamos la distancia entre las crestas (la longitud de onda). Sabemos que la rapidez se define como una distancia dividida entre un tiempo. En este caso, la distancia es una longitud de onda y el tiempo es un periodo, por lo que la rapidez de la onda = longitud de onda/periodo.

Por ejemplo, si la longitud de la onda es de 10 metros y el tiempo entre las crestas, en un punto de la superficie, es de 0.5 segundos, la onda recorre 10 metros en 0.5 segundos, y su rapidez será de 10 metros divididos entre 0.5 segundos, es decir, 20 metros por segundo.

Como el periodo es igual al inverso de la frecuencia, la fórmula **rapidez de la onda** = longitud de onda/periodo se escribe también como:

$$\text{Rapidez de la onda} = \text{longitud de onda} \times \text{frecuencia}$$

Esta relación es válida para todas las clases de ondas, ya sean de agua, sonoras o luminosas.

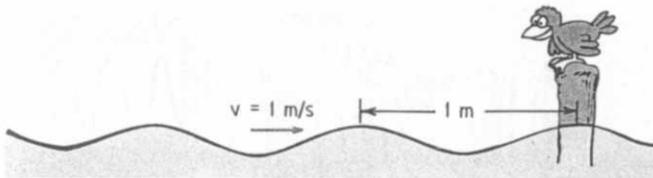


FIGURA 12.5

FIGURA INTERACTIVA

Si la longitud de onda es de 1 m, y por el poste pasa una onda por segundo, la rapidez de la onda será de 1 m/s.



La rapidez  $v$  de una onda se suele expresar mediante la ecuación  $v = f\lambda$ , donde  $v$  es la rapidez de la onda,  $f$  es la frecuencia de onda y  $\lambda$  (la letra griega lambda) es la longitud de onda.

PARA Y EXAMÍNATE

- Si frente a ti pasa un tren de carga, y cada furgón tiene 10 m de longitud, y ves que cada segundo pasan tres furgones, ¿cuál será la rapidez del tren?
- Si una ola en el agua sube y baja tres veces cada segundo, y la distancia entre las crestas de las olas es de 2 m.
  - ¿Cuál es la frecuencia del oleaje?
  - ¿Cuál es su longitud de onda?
  - ¿Cuál es la rapidez de la onda?
- El sonido de una rasuradora eléctrica de 60 Hz se dispersa a 340 metros por segundo.
  - ¿Cuál es la frecuencia de las ondas sonoras?
  - ¿Cuál es su periodo?
  - ¿Cuál es su rapidez?
  - ¿Cuál es su longitud de onda?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

- 30 m/s. Se puede llegar a esto de dos formas. Según la definición de rapidez del capítulo 3,

$$v = \frac{d}{t} = \frac{3 \times 10 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 30 \text{ m/s,}$$

ya que frente a ti pasan 30 m del tren en 1 s.

Si se compara el tren con un movimiento ondulatorio, donde la longitud de onda corresponde a 10 m y la frecuencia es de 3 Hz, entonces

$$\begin{aligned} \text{Rapidez} &= \text{frecuencia} \times \text{longitud de onda} \\ &= 3 \text{ Hz} \times 10 \text{ m} = 30 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

- 3 Hz
  - 2 m

c) Rapidez de la onda = frecuencia  $\times$  longitud de onda  
 $= 3/s \times 2 \text{ m} = 6 \text{ m/s.}$
- 60 Hz
  - 1/60 segundo

c) 340 m/s    d) 5.7 m.



Sé claro en cuanto a la distinción entre **frecuencia** y **rapidez**. La frecuencia con que vibra una onda es completamente diferente de la rapidez con que se mueve de un lugar a otro.

12.3 Ondas transversales y longitudinales

Sujeta un extremo de un resorte de juguete (*slinky*) a la pared, y con la mano sujeta el otro extremo. Si de repente agitas tu mano hacia arriba y hacia abajo, producirás vibraciones en ángulo recto con la dirección de la rapidez de la onda. El movimiento perpendicular, o hacia los lados, en este caso, se llama **movimiento transversal**. A esta clase de onda se le llama **onda transversal**. Las ondas en las cuerdas tensadas de los instrumentos musicales y sobre la superficie de los líquidos son transversales. Después veremos

The Physics Place Ondas longitudinales versus ondas transversales

que las ondas electromagnéticas, que pueden ser de radio o de luz, también son transversales.

La onda cuyo movimiento es a lo largo de la dirección en que vibra la fuente se conoce como **onda longitudinal**. Puedes formar una onda longitudinal si tiras y empuja con rapidez el extremo del resorte de juguete [*slinky*] (figura 12.6a). En este caso las vibraciones son paralelas a la dirección de la transferencia de energía. Una parte del resorte se comprime, y una onda de **compresión** viaja por él. Entre las compresiones sucesivas está una región estirada, llamada **rarefacción**. Tanto las compresiones como las rarefacciones viajan de

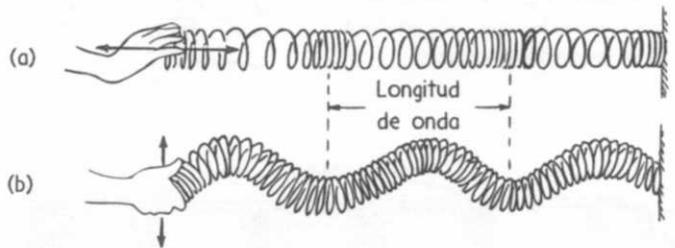


FIGURA 12.6

FIGURA INTERACTIVA

Las dos ondas transfieren energía de izquierda a derecha. a) Cuando el extremo del resorte de juguete (*slinky*) se estira y se oprime con rapidez, a lo largo de su longitud, se produce una onda longitudinal. b) Cuando el extremo del resorte se mueve de arriba abajo, o de lado a lado, se produce una onda transversal.

forma paralela al resorte y forman la onda longitudinal.

Si por casualidad estudias los terremotos, sabrás que hay dos tipos de ondas que viajan por el suelo: ondas P longitudinales y ondas S transversales. Como viajan a rapidezces distintas, ofrecen a los investigadores los medios para determinar la fuente de las ondas. Además, las ondas transversales no pueden propagarse por la materia líquida; en tanto que las ondas longitudinales sí pueden transmitirse tanto por las partes fundidas como por las partes sólidas del interior de la Tierra y, al estudiar esas ondas, se deduce mucho acerca de la constitución de la materia en el interior de la Tierra.

### 12.4 Ondas sonoras

Piensa en las moléculas de aire en una habitación como diminutas pelotas de ping-pong que se mueven al azar de un lado a otro. Si agitas una raqueta en medio de las pelotas de ping-pong, las pondrás a vibrar de un lado a otro. Las pelotas vibrarán al ritmo con que agites la raqueta. En algunas regiones, se agruparán momentáneamente (compresión), y en otras se propagarán momentáneamente (rarefacción). Las puntas vibrantes de un diapasón

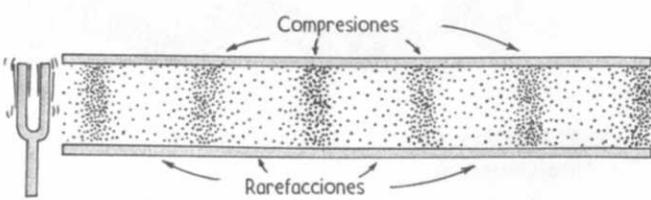


**El sonido requiere de un medio para viajar. No puede viajar en el vacío porque no hay nada que comprimir ni que estirar.**

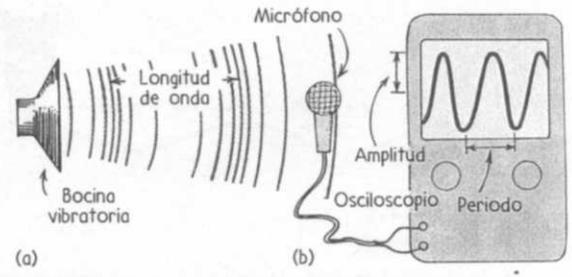
hacen lo mismo a las moléculas de aire. Las vibraciones hechas de compresiones y rarefacciones se propagan del diapasón a través de aire y se produce una *onda sonora*.



**FIGURA 12.7**  
Una raqueta que vibra en medio de pelotas de ping-pong produce la vibración de las pelotas.



**FIGURA 12.8**  
Las compresiones y las rarefacciones se propagan (a la misma rapidez y en la misma dirección) desde el diapasón, por el aire en el tubo. La longitud de onda es la distancia entre compresiones (o rarefacciones) sucesivas.



**FIGURA 12.9**  
a) El altoparlante, o bocina de radio, es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal eléctrica. El sonido que produce causa vibraciones similares en el micrófono, las cuales se muestran en un osciloscopio. b) La onda en la pantalla del osciloscopio es una gráfica de presión contra tiempo, que muestra cómo cerca del micrófono aumenta y disminuye conforme pasa la onda sonora. Cuando aumenta la intensidad, se incrementa la amplitud de la onda.

La longitud de una onda sonora es la distancia entre compresiones sucesivas o, equivalentemente, la distancia entre rarefacciones sucesivas. Cada molécula en el aire vibra de un lado a otro con respecto a cierta posición del equilibrio, conforme la onda se mueve.

Nuestras impresiones subjetivas acerca de la frecuencia de sonido se describe como **tono**. El sonido de un tono alto, como una campana pequeña, tiene una frecuencia de vibración alta. El sonido de una campana grande tiene un tono bajo porque sus vibraciones son de frecuencia baja. El tono es lo alto o bajo que percibamos un sonido, dependiendo de la frecuencia de la onda sonora.

El oído de una persona es capaz de captar normalmente tonos que corresponden al intervalo de frecuencias de entre unos 20 hertz y unos 20,000 hertz. Conforme vamos madurando, se contraen los límites de este intervalo de audición, de manera que para cuando puedas cambiar tu aparato de sonido por un costoso estéreo de alta fidelidad, quizá ya no puedas notar las diferencias como ahora. Las ondas sonoras cuyas frecuencias son menores que 20 hertz se denominan *ondas infrasónicas*, y aquellas cuyas frecuencias son mayores que 20,000 hertz se llaman *ondas ultrasónicas*. No podemos escuchar las ondas sonoras infrasónicas ni las ultrasónicas.\* Aunque los perros y algunos otros animales sí pueden hacerlo.

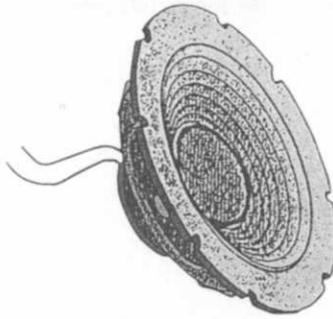
La mayoría de los sonidos se transmiten a través del aire. Sin embargo, cualquier sustancia elástica —ya sea sólida, líquida o gaseosa— también transmite el sonido.\*\* El aire es un conductor de sonido deficiente comparado con sólidos y líquidos.

\* En hospitales, la concentración de rayos de ultrasonido son usados para deshacer las piedras del riñón y cálculos biliares, eliminando la necesidad de una cirugía.  
\*\* Una sustancia elástica es "ligera", tiene recuperación y puede transmitir energía con pequeñas pérdidas. El acero, por ejemplo es elástico, mientras que el plomo no.

## APLICACIONES COTIDIANAS

### ■ ALTAVOCES

El altavoz o la bocina de tu radio o de otro sistema que produzca sonido cambia las señales eléctricas en ondas sonoras. Las señales eléctricas pasan por una bobina enrollada



sobre el cuello de un cono de papel. Esta bobina, que actúa como un electroimán, se localiza cerca de un imán permanente. Cuando la corriente fluye en una dirección, la fuerza magnética empuja el electroimán hacia el imán permanente, jalando el cono hacia adentro. Cuando la corriente fluye en el sentido opuesto, el cono es empujado hacia afuera. Las vibraciones de la señal eléctrica hacen que el cono vibre. De esta manera, las vibraciones del cono producen las ondas sonoras en el aire.

Escucharás con claridad el sonido de un tren lejano si colocas el oído sobre el riel. Cuando nades dile a un amigo que se coloque a cierta distancia y choque unas piedras debajo del agua, mientras tú estés sumergido en ella. Observa como el agua es un excelente conductor del sonido. El sonido no se propaga en el vacío porque en éste no hay algo que pueda comprimirse y expandirse. La transmisión del sonido requiere de un medio.

pti

**Los elefantes se comunican entre sí mediante ondas infrasónicas. Sus grandes orejas les ayudan a detectar esas ondas sonoras de baja frecuencia.**

Haz una pausa y reflexiona sobre la física del sonido (o acústica) mientras escuches tranquilamente tu radio. El altavoz o bocina de tu radio es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal eléctrica. Las moléculas de aire junto al cono en vibración de la bocina se ponen en vibra-

ción. Este aire, a la vez, vibra contra las moléculas vecinas, que también hacen lo mismo, y así sucesivamente. El resultado es que del altavoz emanan distribuciones rítmicas de aire comprimido y enrarecido, que llenan todo el recinto con movimientos ondulatorios. El aire en vibración que resulta pone a vibrar los tímpanos, que a la vez envían cascadas de impulsos eléctricos rítmicos por el canal del nervio coclear o auditivo hasta el cerebro. Y así escuchas el sonido de la música.



**FIGURA 12.10**

Las ondas de aire comprimido y enrarecido, producidas por el cono vibratorio del altavoz, reproducen el sonido de la música.

pti

**Una onda sonora que viaja a través del canal auditivo hace vibrar el tímpano y éste, a la vez, hace vibrar tres pequeños huesos, que hacen vibrar la cóclea llena de fluido. En ésta, diminutas células capilares convierten el impulso en una señal eléctrica para el cerebro.**

### Rapidez del sonido

Si desde lejos observamos a una persona cuando parte leña o da golpes con un mazo, podremos apreciar con facilidad que el sonido del golpe tarda cierto tiempo en llegar a nuestros oídos. El trueno se escucha después de haber visto el destello del rayo. Estas experiencias frecuentes demuestran que el sonido necesita de un tiempo apreciable para propagarse de un lugar a otro. La rapidez del sonido depende de las condiciones del viento, la temperatura y la humedad. No depende de la intensidad ni de la frecuencia del sonido; todos los sonidos se propagan con la misma rapidez. La rapidez del sonido en aire seco a 0 °C es, aproximadamente, de 330 metros por segundo, es decir, casi 1200 kilómetros por hora. El vapor de agua en el aire aumenta un poco dicha rapidez. El sonido se propaga con mayor rapidez en el aire cálido que en el aire frío. Esto era de esperarse, porque las moléculas del aire caliente son más rápidas, chocan entre sí con más frecuencia y, en consecuencia, pueden transmitir un impulso en menos tiempo.\* Por cada grado de aumento de temperatura sobre 0 °C, la rapidez del sonido en el aire aumenta 0.6 metros por segundo. Así, en el aire a la temperatura normal de un recinto, de unos 20 °C, el sonido se propaga a unos 340 metros por segundo. En el agua, la rapidez del sonido es cuatro veces mayor que en el aire; y en el acero, 15 veces mayor que en el aire.

\* La rapidez del sonido en un gas es de más o menos las 3/4 partes de la rapidez promedio de las moléculas del gas.



Nuestros dos oídos son tan sensibles a las diferencias del sonido que llega a ellos, que es posible decir con gran precisión de qué dirección proviene un sonido. Con un solo oído, no tendríamos idea de ello (y, en caso de emergencia, no sabríamos hacia dónde movernos).

#### PARA Y EXAMÍNATE

1. ¿En una onda sonora las compresiones y las rarefacciones viajan en la misma dirección o en la dirección contraria entre sí?
2. ¿Cuál es la distancia aproximada de un relámpago, cuando tú notas un retraso de 3 segundos entre el destello del relámpago y el sonido del trueno?

#### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Viajan en la misma dirección.
2. Suponiendo que la rapidez del sonido en el aire es de aproximadamente 340 m/s, en 3 segundos viajará  $340 \text{ m/s} \times 3 \text{ s} = 1020 \text{ m}$ . No hay un tiempo de retraso considerable para el destello de luz, de manera que la tormenta está a poco más de 1 kilómetro de distancia.

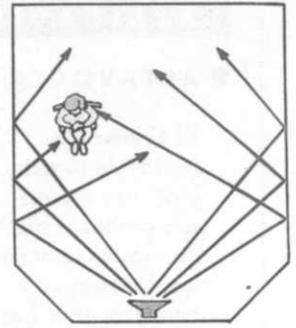
## 12.5 Reflexión y refracción del sonido

Al igual que la luz, cuando el sonido encuentra una superficie puede tanto ser rebotado por ésta como pasar a través de ella. Cuando se rebota el proceso se llama **reflexión**. A la reflexión del sonido se le llama *eco*. La fracción de la energía que porta la onda sonora reflejada por una superficie es grande si la superficie es rígida y lisa; pero es menor si la superficie es suave e irregular. La energía acústica que no se refleje se transmite o se absorbe.

El sonido se refleja en una superficie lisa de la misma forma en que lo hace la luz: el ángulo de incidencia (el ángulo entre la dirección del sonido y la superficie reflejante) es igual al ángulo de reflexión (figura 12.11). A veces, cuando el sonido se refleja en las paredes, el techo y el piso de una habitación, las superficies vuelven a reflejarlo y el sonido se hace confuso. A esas reflexiones múltiples se les llama **reverberación**. Por otro lado, si las superficies reflectoras son muy absorbentes, la intensidad del sonido sería baja, y el sonido sonaría mal y sin vida. La reflexión del sonido en un recinto lo hace vivo y bello, como habrás notado probablemente al cantar en la regadera. En el diseño de un auditorio o de una sala de con-

FIGURA 12.11

El ángulo del sonido incidente es igual al ángulo del sonido reflejado.



ciertos, se debe encontrar un equilibrio entre la reverberación y la absorción. Al estudio de las propiedades del sonido se le llama *acústica*.

Con frecuencia se recomienda poner superficies muy reflectoras detrás del escenario, que dirijan el sonido hacia la audiencia. En algunas salas de concierto, se cuelgan superficies reflectoras arriba del escenario. Las del Davies Hall de San Francisco son superficies grandes y brillantes de plástico, que también reflejan la luz (figura 12.12). Un espectador puede observar esos reflectores y ver las imágenes reflejadas de los miembros de la orquesta. Los reflectores de plástico tienen curvatura, lo cual aumenta el campo de visión. Tanto el sonido como la luz obedecen la misma ley de reflexión, por lo que si se orienta un reflector para poder ver determinado instrumento musical, ten la seguridad que lo podrás escuchar también. El sonido del instrumento seguirá la visual hacia el reflector y luego hacia ti.

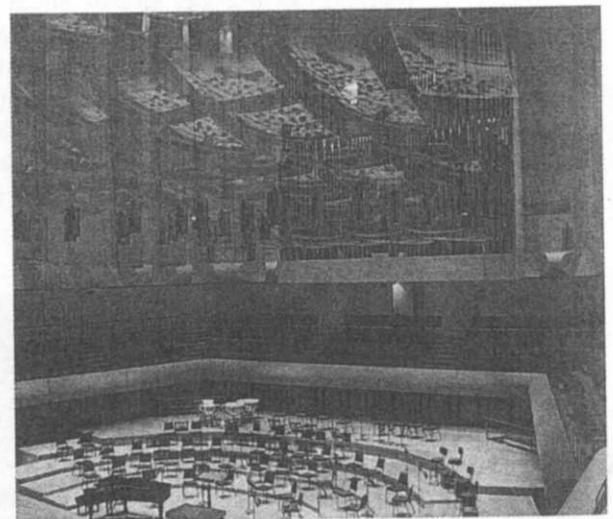


FIGURA 12.12

Las placas de plástico sobre la orquesta reflejan tanto la luz como el sonido. Es muy fácil ajustarlas: lo que escuchas es lo que ves.

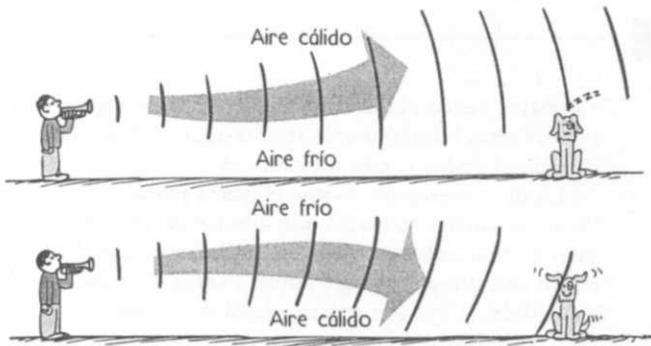


FIGURA 12.13

Las ondas sonoras se desvían en el aire, cuando éste tiene distintas temperaturas.

Para mejorar la acústica de algunas salas, en ocasiones se utilizan absorbedores en vez de reflectores.

La **refracción** ocurre cuando un sonido continúa a través de un medio y luego se desvía. Las ondas sonoras se desvían cuando algunas partes de sus frentes viajan a distintas rapidez-

ces. Esto sucede en vientos erráticos o cuando el sonido se propaga a través de aire a distintas temperaturas. En un día caluroso, el aire cercano al suelo podrá estar bastante más caliente que el aire de arriba, y entonces aumenta la rapidez del

sonido cerca del suelo. Las ondas sonoras, por consiguiente, tienden a apartarse del suelo y hacen que el sonido no parezca propagarse bien (figura 12.13).

Hay refracción del sonido bajo el agua, porque su rapidez varía con la temperatura. Esto causa un problema para los barcos que hacen rebotar ondas ultrasónicas en el fondo del mar, para cartografiarlo. La refracción es una bendición para los submarinos que no quieren ser detectados. Debido a los gradientes térmicos y los estratos de agua a distintas temperaturas, la refracción del sonido deja huecos o "puntos ciegos" en el agua. Es ahí donde se ocultan los submarinos. Si no fuera por la refracción, serían más fáciles de detectar.

Los médicos usan las reflexiones y refracciones múltiples de las ondas ultrasónicas en una técnica inocua para "ver" en el interior del organismo sin usar los rayos X. Cuando el sonido de alta frecuencia (el ultrasonido) entra al organismo, es reflejado con más intensidad en el exterior de los órganos que en su interior, y se obtiene una imagen del contorno de los órganos (figura 12.14). La técnica del eco ultrasónico podrá ser relativamente novedosa para los seres humanos; pero no para los murciélagos ni para los delfines. Se sabe bien que los murciélagos emiten chillidos ultrasónicos y localizan los objetos gracias a sus ecos.

FIGURA 12.14

Un feto de tres meses y medio se observa en la pantalla de un sistema de ultrasonido.

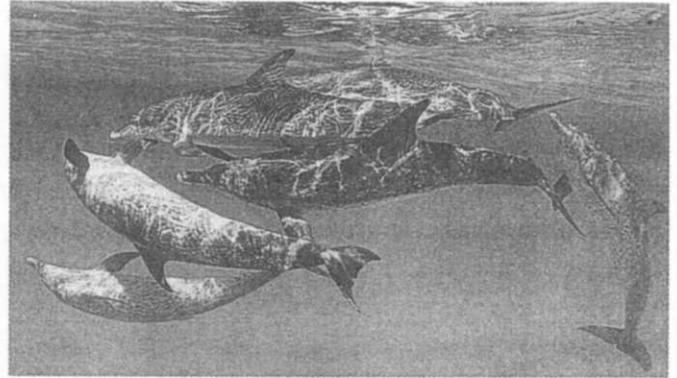


FIGURA 12.15

Un delfín emite sonido de ultra-alta frecuencia, para ubicar e identificar los objetos en su ambiente. Capta la distancia por el retraso desde que manda el sonido hasta que recibe el eco, y detecta la dirección por las diferencias de tiempo en que el eco llega hasta sus orejas. La dieta principal del delfín son los peces, y como en éstos la audición se limita a frecuencias bastante bajas, no se percatan cuándo los van a atrapar.

**Tanto para los sonidos como para la luz, la dirección del recorrido es siempre en ángulo recto con respecto de sus frentes de onda.**

**Los búhos tienen oídos extraordinariamente sensibles. Cuando cazan en la noche, captan los leves crujidos y chillidos de los roedores y otros pequeños mamíferos. Al igual que los seres humanos, los búhos localizan las fuentes de sonido mediante el hecho de que a menudo las ondas sonoras llegan a un oído un milisegundo antes que al otro. Un búho mueve su cabeza conforme de lanza contra su presa; cuando el sonido del objetivo llega a ambos oídos a la vez, el alimento está justo enfrente. Además, en algunos búhos, un oído es más grande que el otro, lo cual agudiza aún más su habilidad para localizar presas.**

## 12.6 Vibraciones forzadas y resonancia

Si golpeamos un diapasón no instalado, el sonido que se produce sería bastante débil. Si sujetamos el mismo diapasón contra una mesa, después de golpearlo, el sonido será más intenso. Esto se debe a que se obliga a vibrar a la mesa y, con su mayor superficie, pone en movimiento a más aire. La mesa es

## APLICACIONES COTIDIANAS

### ■ DELFINES E IMÁGENES ACÚSTICAS

El sentido principal del delfín es el acústico, porque no les sirve de mucho la vista en las profundidades del mar, que con frecuencia están sucias y oscuras. Mientras que para nosotros el sonido es un sentido pasivo, para el delfín es activo, porque éste emite sonidos y después percibe sus alrededores con base en los ecos que regresan. Las ondas ultrasónicas emitidas por un delfín le permiten "ver" a través de los cuerpos de otros animales y personas. Piel, músculos y grasa son casi transparentes para los delfines, de manera que pueden "ver" un contorno delgado del cuerpo, donde los huesos, los dientes y las cavidades llenas de aire son casi transparentes. La evidencia física de cánceres, tumores

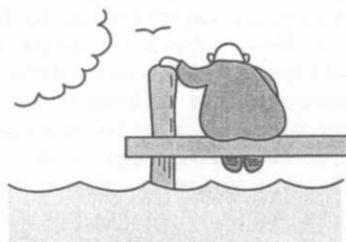
e infartos puede detectarse usando delfines; algo que los seres humanos sólo recientemente tienen la capacidad de hacer con ultrasonido.

Lo más interesante es que el delfín puede reproducir las señales acústicas que dibujan la imagen mental de sus alrededores. Así, es probable que el delfín comunique su experiencia a otros delfines, pasándoles la imagen acústica total de lo que se "ve", y la pone directamente en las mentes de otros delfines. No necesita palabras ni símbolos para indicar "pez", por ejemplo, sino que comunica una imagen real del pez, quizá con filtrado muy selectivo para dar énfasis, en la forma en que comunicamos un concierto musical a otros a través de diversos medios de reproducción sonora. ¡No es de extrañar que el lenguaje del delfín sea tan distinto del nuestro!

## RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE MUESTRA

### Problemas

1. Un buque que sondea las profundidades del océano inspecciona el lecho marino, usando el sonido ultrasónico que viaja a 1530 m/s en agua salada. ¿Qué tan profunda será el agua si el tiempo de retraso del eco desde el lecho marino es de 2 segundos?
2. Mientras espera en el lecho de la bahía, Otis se da cuenta de que las olas llegan con una distancia  $d$  entre sus crestas. Las crestas que llegan chocan contra el pilar del muelle a una tasa de una cada 2 segundos.



- a) Encuentra la frecuencia de las ondas.
- b) Demuestra que la rapidez de las ondas está dada por  $fd$ .
- c) Supón que la distancia  $d$  entre las crestas de la onda es de 1.8 m. Demuestra que la rapidez de las ondas es ligeramente menor que 1.0 m/s.

### Soluciones

1. El viaje redondo es de 2 s, lo cual significa 1 s de bajada y 1 s de subida. Por lo tanto,

$$d = vt = 1530 \text{ m/s} \times 1 \text{ s} = 1530 \text{ m}$$

(El radar funciona de manera parecida, donde en vez de ondas sonoras se transmiten microondas.)

2. a) La frecuencia de las ondas está dada, una por 2 s, o bien,  $f = 0.5 \text{ Hz}$ .
  - b)  $v = f\lambda = fd$ .
  - c)  $v = fd = 0.5 \text{ Hz} (1.8 \text{ m}) = 0.9 \text{ m/s}$ .

forzada a vibrar por un diapasón a cualquier frecuencia. Se trata de un caso de vibración forzada. En el piso de una fábrica, la vibración causada por el funcionamiento de la maquinaria pesada es otro ejemplo de **vibración forzada**. Un ejemplo más agradable es el sonido que producen las cajas de resonancia de los instrumentos musicales.

Cuando dejas caer una llave inglesa sobre un piso de concreto, no es probable que confundas ese sonido con el de una pelota de béisbol que golpea contra el suelo. Esto se debe a que los dos

objetos vibran en forma distinta cuando golpean el suelo. No se les fuerza a vibrar a una frecuencia específica sino que, en cambio, cada uno vibra a su propia frecuencia característica. Cuando es perturbado, cualquier objeto hecho de un material elástico vibra con sus frecuencias especiales propias, que en conjunto producen su sonido especial. Se habla entonces de la **frecuencia natural** de un objeto, la cual depende de factores como la elasticidad y la forma del objeto. Desde

luego, las campanas y los diapasones vibran con sus frecuencias características propias. Y es interesante que la mayoría de los objetos, desde los planetas hasta los átomos, y casi todo lo que hay entre ellos, tenga una elasticidad tal que vibran a una o más frecuencias naturales.

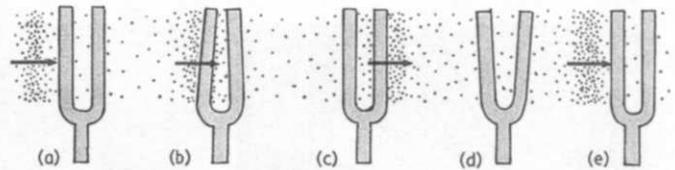
Cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas en un objeto coincide con la frecuencia natural del mismo, hay un incremento significativo de la amplitud. A este fenómeno se le llama **resonancia**. En forma literal, *resonancia* quiere decir “volver a sonar”. La masilla (plastilina) no resuena porque no es elástica, y un pañuelo que se deja caer es demasiado flácido. Para que algo resuene necesita que una fuerza lo regrese a su posición inicial, y que la energía sea suficiente para mantenerlo vibrando.

Una experiencia frecuente que ilustra la resonancia es un columpio. Cuando aumentan las oscilaciones, se empuja al ritmo de la frecuencia natural del columpio. Más importante que la fuerza con que se impulse, es su sincronización. Hasta con impulsos pequeños, si se realizan con el ritmo de la frecuencia del movimiento oscilatorio, se producen grandes amplitudes.

Una demostración muy común en los salones de clase es con un par de diapasones, ajustados a la misma frecuencia y colocado a una distancia de un metro entre sí (figura 12.17). Cuando uno de ellos se golpea, se pone al otro a vibrar. Es una versión en pequeña escala de cuando columpiamos a un amigo: la sincronización es lo más importante. Cuando una serie de ondas sonoras chocan contra el diapasón, cada compresión da un pequeño impulso al brazo del mismo. Como la frecuencia de esos impulsos es igual a la frecuencia natural del diapasón, los impulsos harán aumentar sucesivamente la amplitud de la vibración. Esto se debe a que los impulsos se dan en el momento adecuado, y ocurren de forma repetida en la misma dirección del movimiento instantáneo del diapasón. El movimiento del segundo diapasón se llama *vibración simpática* o *vibración por resonancia*.

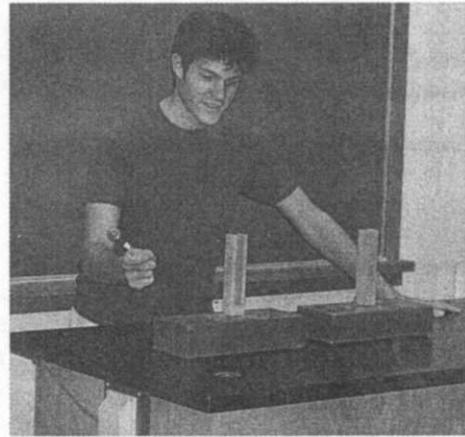
Si los diapasones no se ajustan a frecuencias iguales, la sincronización de los impulsos se pierde y no habrá resonancia. Cuando sintonizas tu radio ajustas, en forma parecida, la frecuencia natural de los circuitos electrónicos del aparato, para que sean iguales a alguna de las señales que llegan de las estaciones. Por ello, la radio resuena con una estación cada vez, en lugar de tocar todas las estaciones al mismo tiempo.

**pti**  
¿Por qué los estudios hollywoodenses insisten en presentarnos motores que hacen ruido siempre que una nave espacial viaja por el espacio exterior? ¿No sería más dramático verla flotar en silencio?



**FIGURA 12.16**

Etapas de la resonancia. a) La primera compresión llega al diapasón y le da un empuje diminuto y momentáneo. b) El diapasón se flexiona, y luego c) regresa a su posición inicial en el momento preciso en que llega un enrarecimiento, y d) continúa su movimiento en la dirección contraria. Justo cuando regresa a su posición inicial e), el diapasón llega la siguiente compresión y se repite el ciclo. Ahora se flexiona más, debido a que se está moviendo.



**FIGURA 12.17**

Ryan demuestra la resonancia con un par de diapasones con frecuencias coincidente.

La resonancia no se restringe al movimiento ondulatorio: se presenta siempre que se aplican impulsos sucesivos a un objeto en vibración, de acuerdo con su frecuencia natural. En 1831 una tropa de caballería cruzaba un puente cerca de Manchester, Inglaterra y, por accidente hicieron que se derrumbara el puente al marchar al ritmo de la frecuencia natural del puente. Desde entonces, se acostumbra ordenar que las tropas “rompan filas” cuando cruzan los puentes, para evitar la resonancia. Hace poco, la resonancia generada por el viento causó otro gran desastre en un puente (figura 12.18).

**pti**  
Al igual que los seres humanos, los loros utilizan sus lenguas para formar sonidos. Pequeños cambios en la posición de la lengua producen enormes diferencias en el sonido que se produce primero en la siringe, un órgano como la laringe anidado entre la tráquea y los pulmones.

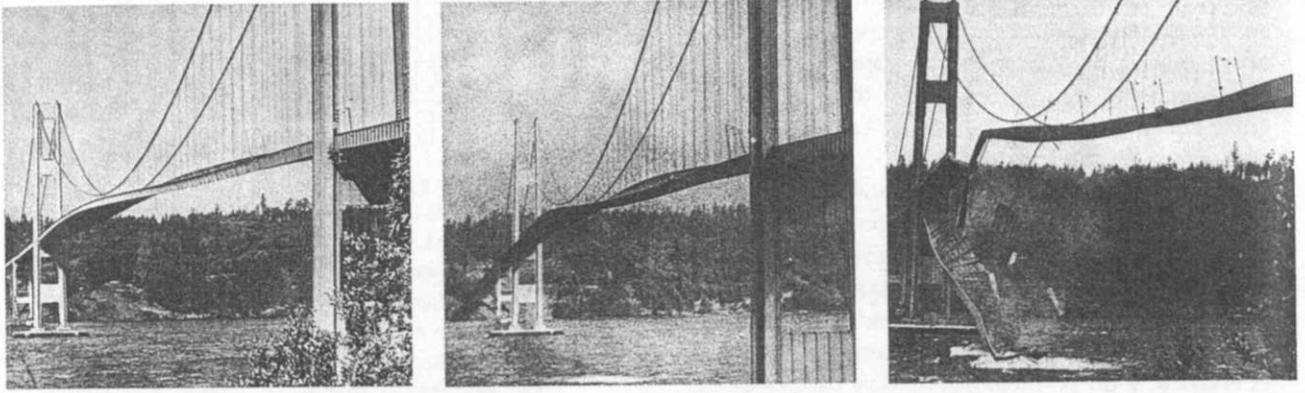


FIGURA 12.18

En 1940, cuatro meses después de terminarse, el puente Tacoma Narrows, en el estado de Washington, Estados Unidos, fue destruido por resonancia generada por el viento. Un vendaval de intensidad moderada produjo un viento irregular en resonancia con la frecuencia natural del puente, aumentando continuamente la amplitud de la vibración hasta que el puente se desplomó.

## 12.7 Interferencia

Una propiedad interesante de todas las ondas es la **interferencia**. Considera las ondas transversales. Cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra onda, sus efectos individuales se suman y producen una onda de mayor amplitud. A esto se le llama *interferencia constructiva* (figura 12.19). Cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra onda, se reducen sus efectos individuales. Simplemente, la parte alta de una onda llena la parte baja de otra. A esto se le llama *interferencia destructiva*.

### The Physics Place

Interferencia y pulsaciones

La forma de entender mejor la interferencia entre ondas es en el agua. En la figura 12.20 se muestra el patrón de interferencia que se produce cuando dos objetos vibratorios tocan la superficie del agua. Se observa que las regiones donde se traslapa una cresta de una onda, con el valle de otra onda, producen regiones cuya amplitud es cero. En los puntos de esas regiones, las ondas llegan con las fases opuestas. Se dice que están *desfasadas* entre sí.

La interferencia del sonido se ilustra muy bien cuando se toca sonido monoaural con bocinas estereofónicas que están desfasadas. Se ponen fuera de fase cuando los conductores de señal a una bocina se intercambian (se invierten los conductores posi-

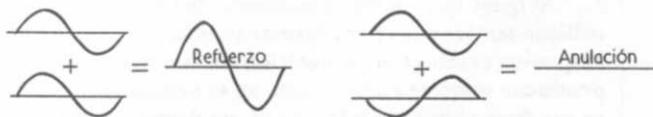


FIGURA 12.19

Interferencias constructiva y destructiva en una onda transversal.

En la figura 12.21 se presenta una comparación de la interferencia en ondas transversales y en ondas longitudinales. En el caso del sonido, la cresta de una onda corresponde a la compresión, y el valle de una onda corresponde a la rarefacción.

La interferencia acústica destructiva es la esencia de la *tecnología antirruído*. Por ejemplo, en dispositivos ruidosos como los rotomartillos, se instalan unos micrófonos que envían el sonido del dispositivo a microchips electrónicos, los cuales producen patrones de onda de imagen especulares de las señales de sonido. Para el rotomartillo, esta señal sonora de imagen especular se alimenta a audífonos que usa el operador. Las compresiones acústicas (o enrarecimientos acústicos del martillo se anulan con los enrarecimientos (o compresiones) de su imagen especular en los audífonos. La combinación de las señales anula el ruido del rotomartillo. Los audífonos anuladores del ruido ya son muy comunes en los pilotos. Las cabinas de algunos aviones ahora son más silenciosas gracias a la tecnología antirruído. ¿Los automóviles serán los siguientes en eliminar la necesidad de silenciadores?

La interferencia del sonido se ilustra muy bien cuando se toca sonido monoaural con bocinas estereofónicas que están desfasadas. Se ponen fuera de fase cuando los conductores de señal a una bocina se intercambian (se invierten los conductores posi-

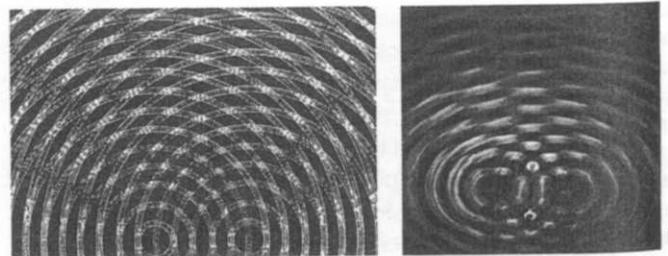
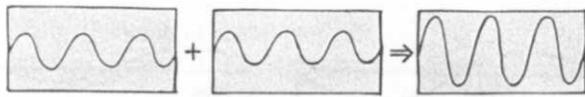


FIGURA 12.20

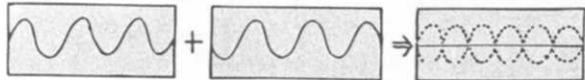
Dos conjuntos de ondas de agua que se traslapan producen un patrón de interferencia.



La superposición de dos ondas idénticas transversales y en fase produce una onda de mayor amplitud.



La superposición de dos ondas longitudinales idénticas y en fase produce una onda de mayor intensidad.



Dos ondas transversales idénticas desfasadas se destruyen entre sí cuando se superponen.



Dos ondas longitudinales idénticas desfasadas se destruyen entre sí cuando se superponen.

FIGURA 12.21

Interferencia constructiva (los dos paneles superiores) y destructiva (los dos paneles inferiores) en ondas transversales y longitudinales.



FIGURA 12.22

Cuando la imagen especular de una señal sonora se combina con el sonido original, se anula el sonido.



FIGURA 12.23

Los conductores positivo y negativo que entran a una de las bocinas estereofónicas se intercambiaron, y el resultado fue que los altoparlantes están fuera de fase. Cuando están muy alejadas, el sonido monoaural no es tan intenso como cuando las bocinas tienen la fase correcta. Cuando se ponen cara a cara se escucha poco sonido. La interferencia es casi completa porque las compresiones de una bocina llenan los enrarecimientos de la otra.



FIGURA 12.24

Ken Ford remolca planeadores en silenciosa comodidad cuando utiliza los audífonos antirruído. En los aviones más grandes, el sonido de los motores se procesa y se emite como antirruído de los altavoces dentro de la cabina para brindar a los pasajeros un viaje más silencioso.

vo y negativo de la señal). Para una señal monoaural ello significa que cuando una bocina está mandando una compresión de sonido, la otra está mandando un enrarecimiento. El sonido que se produce no es tan lleno ni tan intenso como cuando los altavoces están bien conectados y en fase, ya que las ondas más largas se anulan por interferencia. Las ondas más cortas se anulan cuando las bocinas se acercan entre sí, y cuando un par de bocinas se ponen frente a frente, viéndose entre sí ¡se escuchan muy poco! Sólo las ondas sonoras con las frecuencias máximas sobreviven a la anulación. Debes hacer la prueba para comprobarlo.

### Pulsaciones

Cuando dos tonos de una frecuencia un poco distinta suenan al unísono, se oye una fluctuación en la intensidad de los sonidos combinados; el sonido es intenso y después débil, luego intenso y después débil, y así sucesivamente. A estas variaciones periódicas en la intensidad del sonido se les llama **pulsaciones** y se deben a la interferencia. Golpea dos diapasones que no estén bien afinados y como

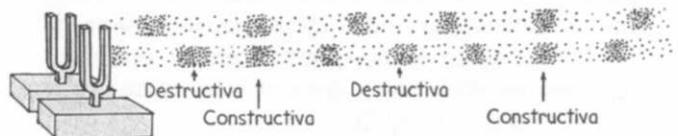


FIGURA 12.25

La interferencia de dos fuentes de sonido, con frecuencias un poco distintas, origina pulsaciones.

uno vibra con distinta frecuencia que el otro, las dos vibraciones estarán en fase, momentáneamente, después fuera de fase, después en fase, y así sucesivamente. Cuando las ondas combinadas llegan en fase a los oídos, por ejemplo, cuando una compresión de un diapasón se encima con una compresión del otro, el sonido es máximo. Un momento después, cuando los diapasones están desfasados, una compresión de uno se encuentra con un enrarecimiento del otro y se produce un mínimo. El sonido que llega a los oídos varía entre la intensidad máxima y mínima, y produce un efecto de trémolo.

Las pulsaciones se pueden producir con cualquier clase de ondas, y permiten tener un método práctico de comparar las frecuencias. Por ejemplo, para afinar un piano el afinador escucha las pulsaciones producidas entre una frecuencia estándar y la frecuencia de determinada nota del piano. Cuando las frecuencias son idénticas, desaparecen las pulsaciones. Los miembros de una orquesta afinan sus instrumentos musicales escuchando las pulsaciones entre el tono de su instrumento y la nota estándar producida por un piano o algún otro instrumento.

### Ondas estacionarias

Otro efecto fascinante de la interferencia son las *ondas estacionarias*. Sujeta una cuerda a un muro, y agítala hacia arriba y hacia abajo del otro extremo. El muro es demasiado rígido para moverse, por lo que las ondas se reflejan y regresan por la cuerda. Si se mueve el extremo de la cuerda en forma adecuada, se puede hacer que las ondas incidente y reflejada formen una **onda estacionaria**, en la cual unas partes de la cuerda, llamadas *nodos*, queden estacionarias. Puedes acercar los dedos precisamente arriba o abajo de los nodos, y la cuerda no los tocará. Otras partes de ella, sin embargo, sí los tocarían. Las posiciones sobre una onda estacionaria con el desplazamiento máximo y se conocen como *antinodos*. Los antinodos están a media distancia entre los nodos.

Las ondas estacionarias se producen cuando dos conjuntos de ondas de igual amplitud y longitud pasan uno a través del otro en direcciones contrarias. Entonces, las ondas están dentro y fuera de fase entre sí, en forma permanente, y producen regiones estables de interferencia constructiva y destructiva (figura 12.26).

Las ondas estacionarias se forman en las cuerdas de los instrumentos musicales, por ejemplo, cuando se puntean (con una uña), se tocan (con un arco) o se percuten (en un piano). Se forman en el

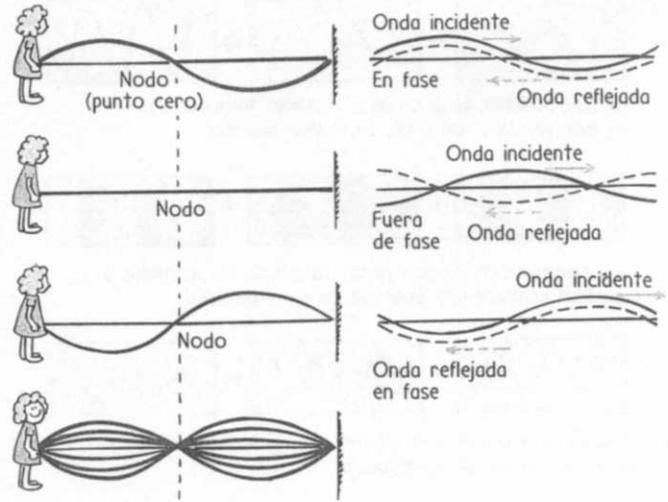


FIGURA 12.26

FIGURA INTERACTIVA

Las ondas incidente y reflejada se interfieren y producen una onda estacionaria.

aire de los tubos de un órgano, de las trompetas o de los clarinetes, y en el aire de una botella, cuando se sopla sobre la boca de éste. Se pueden formar ondas estacionarias en una tina llena de agua o en una taza de café, al moverla hacia adelante y hacia atrás con la frecuencia adecuada. Además, se pueden producir con vibraciones tanto transversales como longitudinales.

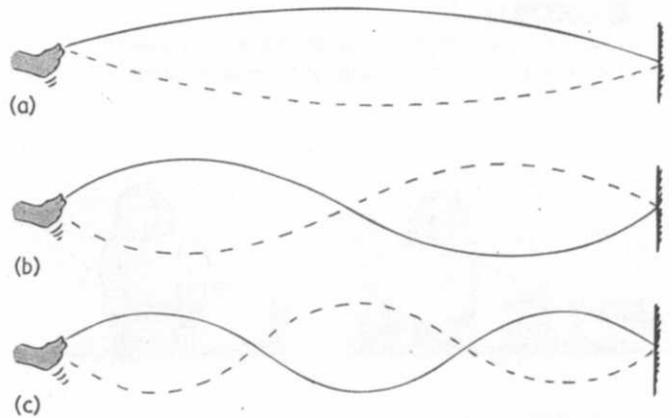


FIGURA 12.27

FIGURA INTERACTIVA

- a) Mueve la cuerda hasta que establezcas una onda estacionaria de un segmento ( $\frac{1}{2}$  longitud de onda).
- b) Muévela con el doble de frecuencia y produce una onda con dos segmentos (1 longitud de onda).
- c) Muévela con tres veces la frecuencia y produce tres segmentos ( $1\frac{1}{2}$  longitudes de onda).

## PARA Y

## EXAMÍNATE

1. ¿Es posible que una onda anule otra onda, de manera que no quede ninguna amplitud?
2. Imagina que produces una onda estacionaria de tres segmentos, como se muestra en la figura 12.27c. Si agitas con una frecuencia del doble, ¿cuántos segmentos de onda ocurrirán en tu nueva onda estacionaria? ¿Y cuántas longitudes?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. Esto se conoce como interferencia destructiva. Cuando se produce una onda estacionaria con una cuerda, por ejemplo, algunas partes de la cuerda no tienen amplitud, como los nodos.
2. Si le das el doble de frecuencia a la cuerda, producirás una onda estacionaria con el doble de segmentos. Tendrás seis segmentos. Como una longitud de onda completa tiene dos segmentos, tendrás tres longitudes de onda completas en tu onda estacionaria.

## 12.8 Efecto Doppler

Piensa en el patrón de las ondas de agua que produce un insecto al agitar sus patas de arriba abajo, en el centro de un estanque tranquilo (figura 12.28). El insecto no va a ninguna parte; más bien, mueve el agua en una posición fija. Las ondas que provoca son círculos concéntricos, porque la rapidez de la onda es igual en todas las direcciones.

 The Physics Place

El efecto Doppler

 The Physics Place

El efecto Doppler

Si agita las patas en el agua a una frecuencia constante, la distancia entre las crestas de las ondas (la longitud de onda) es igual en todas direcciones. Las ondas llegan al punto A con la misma frecuencia con la que llegan al punto B. Esto quiere decir que la frecuencia del movimiento ondulatorio es igual en los puntos A y B, o en cualquier lugar próximo al insecto. Esta frecuencia de las ondas es la misma que la frecuencia de pateo del insecto.

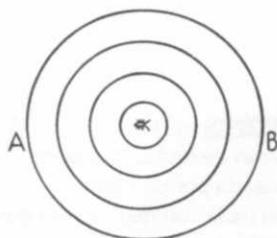


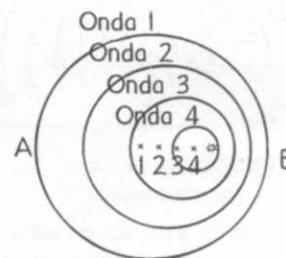
FIGURA 12.28

Vista superior de las ondas de agua causadas por un insecto estacionario que patea en agua inmóvil.

FIGURA 12.29

## FIGURA INTERACTIVA

Ondas en agua causadas por un insecto que nada hacia el punto B en agua inmóvil.



Imagina que el insecto se mueve por el agua, con una rapidez menor que la de las ondas. De hecho, el insecto va tras una parte de las ondas que produjo. El patrón de las ondas se distorsiona y ya no está formado por círculos concéntricos (figura 12.29). El centro de la onda más exterior se produjo cuando el insecto estaba en su centro. El centro de la siguiente onda más pequeña fue producido cuando el insecto estaba también en su centro, y así sucesivamente. Los centros de las ondas circulares se mueven en la misma dirección que el insecto. Aunque ese insecto mantiene la misma frecuencia de pateo que antes, un observador en B observaría que las ondas le llegan más a menudo. Mediría una frecuencia mayor. Esto se debe a que cada onda sucesiva tiene menor distancia por recorrer y, por lo tanto, llega a B con más frecuencia que si el insecto no se moviera acercándose a B. Por otro lado, un observador en A mide que hay menor frecuencia, por el mayor tiempo entre las llegadas de las crestas de las ondas. Se debe a que para llegar a A, cada cresta debe viajar más lejos que la que le precedía, debido al movimiento del insecto. A este cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente (o al receptor) de las ondas se llama **efecto Doppler** (en honor al físico y matemático austriaco Christian Johann Doppler, quien vivió de 1803 a 1853).

En el agua las ondas se propagan sobre la superficie plana de este líquido. Por otro lado, las ondas sonoras y las luminosas viajan en el espacio tridimensional en todas direcciones, como un globo cuando se infla. Así como las ondas circulares están más cercanas entre sí frente a un insecto que está nadando, las ondas esféricas del sonido o de la luz frente a una fuente en movimiento están más cercanas entre sí, y llegan con mayor frecuencia a un receptor. El efecto Doppler es válido para cualquier tipo de ondas.

El efecto Doppler es evidente al oír cómo cambia el tono de la sirena de una ambulancia o de un camión de bomberos. Conforme la sirena se acerca, las crestas de las ondas sonoras llegan a tu oído con mayor frecuencia y el tono es más alto que lo normal. Y cuando la sirena pasa y se aleja, las crestas



FIGURA 12.30

FIGURA INTERACTIVA

El tono del sonido aumenta cuando la fuente se mueve hacia a ti; mientras que disminuye conforme la fuente se aleja de ti.

de las ondas llegan a tus oídos con menor frecuencia y escuchas una disminución en el tono.

También, el efecto Doppler se percibe en la luz. Cuando se acerca una fuente luminosa hay un aumento de la frecuencia medida; y cuando se aleja, disminuye la frecuencia. A un aumento de la frecuencia de la luz se le llama *corrimiento al azul*, porque la frecuencia es mayor, hacia el extremo azul del espectro. A la disminución de la frecuencia de la luz se le llama *corrimiento al rojo*, porque indica un desplazamiento hacia el extremo de menor frecuencia, el extremo del rojo del espectro. Las galaxias lejanas, por ejemplo, muestran un corrimiento al rojo de la luz que emiten. Al medir ese corrimiento se pueden calcular sus rapidez de alejamiento. Una estrella que gira muy rápidamente tiene un corrimiento al rojo en el lado que se aleja de nosotros; y un corrimiento al azul, en el lado que gira hacia nosotros. Eso permite a los astrónomos calcular la rapidez de rotación de la estrella.

**PARA Y EXAMÍNATE**

Cuando una fuente luminosa o sonora se acerca hacia a ti, ¿hay un incremento o una disminución en la rapidez de la onda?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

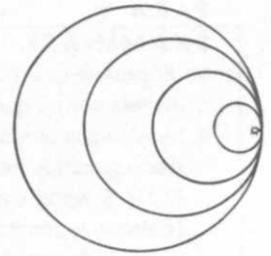
¡Ninguno! Es la frecuencia de una onda lo que sufre un cambio cuando se mueve la fuente, no la rapidez de la onda.

**12.9 Barreras de ondas y ondas de proa**

Cuando la rapidez de una fuente ondulatoria es igual a la de las ondas que produce, se origina una barrera de onda. Imagina el insecto de nuestro ejemplo anterior. Cuando nada con la misma rapidez que la de las ondas, se empareja con las ondas que produce. En vez de que las ondas se alejen frente a él, se superponen y se apilan una sobre otra, directamente frente al insecto (figura 12.31). Así, el insecto encuentra una barrera de onda. Se requiere mucho esfuerzo por parte

FIGURA 12.31

Patrón de ondas causado por un insecto que se mueve con la rapidez de las ondas.



del insecto para que nada sobre la cresta, antes de que pueda nadar más rápido que la ola.

Sucede algo parecido cuando un avión viaja a la rapidez del sonido. Las ondas se traslapan para producir una barrera de aire comprimido en los bordes delanteros de las alas y las demás partes del avión. Piensa en el impulso que se requiere para que el avión atraviese esa barrera (figura 12.32). Una vez que la atraviesa, el avión puede volar más rápido que el sonido ya sin una oposición similar. Se dice entonces que es *supersónico*. Al igual que un insecto, una vez que el avión logra pasar su barrera de onda, delante de él encuentra un medio relativamente liso y sin perturbaciones.

Cuando el insecto nada con más rapidez que la de las ondas, produce, en el caso ideal, un patrón ondulatorio como el que se presenta en la figura 12.33. Deja atrás las ondas que produce. Las ondas se traslapan en las orillas y el patrón que forman esas ondas que se traslapan tiene la forma de V, y se llama **onda de proa**, la cual parece que es arrastrada por el insecto. La conocida onda de proa es la que genera una lancha rápida que corta el agua.

Algunos patrones de onda causados por fuentes móviles a rapidez distintas se muestran en la figura

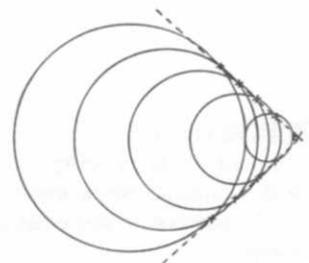
FIGURA 12.32

Este avión produce una nube de vapor de agua que se acaba de condensar en el aire en rápida expansión, en la región enrarecida detrás de la pared de aire comprimido.



FIGURA 12.33

Patrón de ondas idealizado causado por un insecto que nada con más rapidez que la de las ondas.



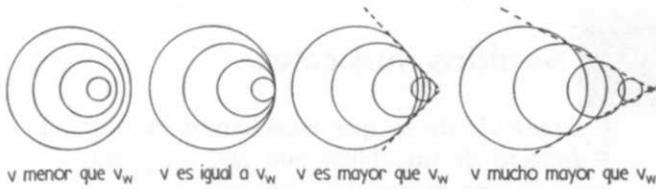


FIGURA 12.34

Patrones idealizados causados por un insecto que nada con rapidez cada vez mayores. El traslape en las orillas sólo se presenta cuando el insecto nada con más rapidez que la de las ondas.

12.34. Observa que después de que la rapidez de la fuente excede la rapidez de la onda, la rapidez incrementada produce una V con forma más angosta.\*

## 12.10 Ondas de choque y estampido sónico

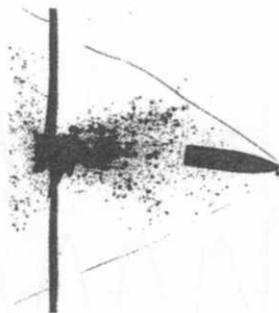
En tanto que una lancha rápida que corta el agua genera una onda de proa bidimensional, un avión supersónico genera una *onda de choque* tridimensional. Al igual que una onda de proa se produce con círculos traslapados que forman una V, una **onda de choque** se produce por traslape de esferas que forman un cono. Y así como la onda de proa de una lancha rápida se propaga hasta llegar a la orilla de un lago, la estela cónica generada por un avión supersónico se propaga hasta llegar al suelo.

La onda de proa de una lancha rápida que pasa cerca puede salpicarte y mojarte, si estás en la orilla. En cierto sentido, puedes decir que te golpeó un “estampido del agua”. Del mismo modo, cuando la superficie cónica de aire comprimido que se forma detrás de un avión supersónico llega a las personas en tierra, el crujido agudo que escuchan se llama **estampido sónico**.

No se escucha ningún estampido sónico cuando los aviones son más lentos que el sonido, es decir,

FIGURA 12.35

Onda de choque de una bala que atraviesa una lámina de Plexiglás. La luz que se desvía cuando la bala pasa por el aire comprimido hace visible la onda. Fíjate bien y nota la segunda onda de choque que se origina en la cola de la bala



\*Las ondas de proa generadas por los botes en el agua son mucho más complejas que lo que se indica aquí. Nuestro tratamiento idealizado sirve como una analogía para la producción de las menos complejas ondas de choque en el aire.

son subsónicos, porque las ondas sonoras que llegan a los oídos se perciben como un tono continuo. Sólo cuando el avión se mueve con más rapidez que el sonido se traslapan las ondas, y llegan a una persona en un solo estallido. El aumento repentino de presión tiene el mismo efecto que la expansión súbita de aire que produce una explosión. Ambos procesos dirigen una ráfaga de aire con alta presión hacia una persona. El oído es presionado mucho, y no distingue si la alta presión se debe a una explosión o a muchas ondas encimadas.

Un esquiador acuático sabe bien que junto a la alta joroba de la onda de proa en forma de V, hay una depresión en forma de V. Lo mismo sucede con una onda de choque, que suele consistir en dos conos: uno de alta presión generado por la nariz del avión supersónico; y otro de baja presión, que sigue la cola de la nave. Las superficies de esos conos se observan en la imagen de la bala supersónica de la figura 12.35. Entre esos dos conos, la presión del aire sube repentinamente y es mayor que la presión atmosférica; y luego baja y es menor que la presión atmosférica; después sólo regresa a su valor normal, atrás del cono interior de la cola (figura 12.37). Esta alta presión seguida inmediatamente por una presión menor intensifica el estampido sónico.

FIGURA 12.36

Una onda de choque.

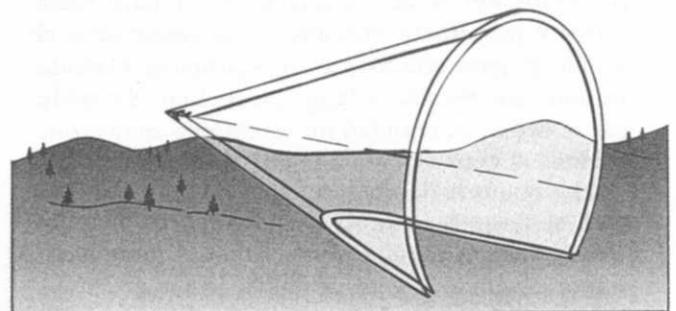
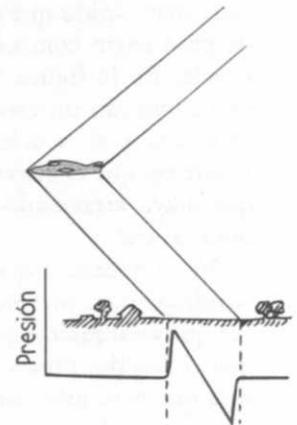


FIGURA 12.37

La onda de choque está formada en realidad por dos conos: uno de alta presión, con su vértice en la proa del avión; y un cono de baja presión, con el vértice en la cola. Una gráfica de la presión de aire a nivel del suelo, entre los conos, tiene la forma de la letra N.

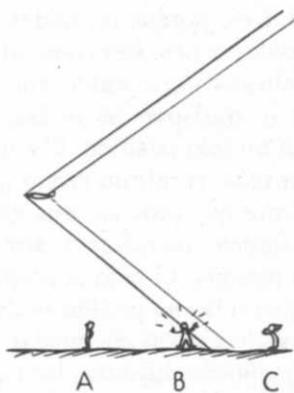


FIGURA 12.38

La onda de choque todavía no ha llegado al escucha A, pero está llegando al escucha B y ya llegó al escucha C.

Una idea errónea común es creer que los estampidos sónicos se producen cuando un avión atraviesa la barrera del sonido, esto es, sólo cuando la rapidez del avión supera la del sonido. Es igual que decir que un bote produce una onda de proa al atravesar por primera vez sus propias ondas. Esto no es así. El hecho es que una onda de choque, y el estampido sónico que produce, barren en forma continua hacia atrás y por debajo de un avión que viaje más rápido que el sonido, así como una onda de proa barre continuamente atrás de una lancha rápida. En la figura 12.38 se ve que el escucha B está captando un estampido sónico. El escucha C ya lo oyó, y el escucha A lo oír en unos instantes. Puede ser que el avión que generó esa onda de choque ¡haya atravesado la barrera del sonido varias horas antes!

No es necesario que la fuente en movimiento sea “ruidosa” para producir una onda de choque. Una vez que cualquier objeto se mueva con más rapidez que el sonido, producirá ruido. Una bala supersónica que pase sobre uno produce un crujido, que es un estampido sónico pequeño. Si la bala fuera mayor y perturbara más aire en su trayectoria, el crujido se parecería más a un estampido. Cuando un domador restalla su látigo en el circo, el crujido que se oye es en realidad un estampido sónico que produce el extremo del látigo al moverse con más rapidez que la del sonido. Ni la bala ni el látigo son en sí mismos fuentes de sonido. Pero cuando se mueven con rapidez supersónicas, producen su propio sonido al generar ondas de choque.



**No confundas supersónico con ultrasónico. Supersónico tiene que ver con la rapidez: más rápido que el sonido. Ultrasónico tiene que ver con la frecuencia: mayor de lo que podemos escuchar.**

## 12.11 Sonidos musicales

La mayoría de lo que escuchamos es ruido. El impacto de un objeto que cae, un portazo, el rugir de una motocicleta y la mayor parte de los sonidos del tráfico citadino son ruidos. El ruido es una vibración irregular del tímpano, producida a la vez por una vibración irregular en nuestro entorno. Las gráficas que indican la variación en la presión del aire sobre el tímpano se muestran en la figura 12.40a y b. En la parte a observamos el patrón irregular del ruido. En la parte b, vemos que el sonido musical tiene formas que se repiten periódicamente. Son los tonos periódicos o “notas” musicales. (No obstante, ¡los instrumentos musicales también pueden hacer ruido!) Tales gráficas se exponen en la pantalla de un osciloscopio, cuando la señal eléctrica de un micrófono llega a la terminal de entrada de este útil dispositivo.



FIGURA 12.39

La física y cantante Lynda Williams, profesora de la Universidad de Santa Rosa Junior, se entrega totalmente a la física de la música.

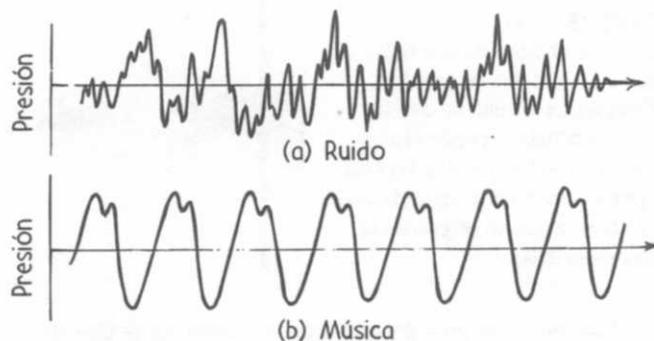


FIGURA 12.40

Representaciones gráficas a) del ruido y b) de la música.

No tenemos problemas para distinguir entre la nota de un piano y una de la misma altura (frecuencia) de un clarinete. Cada uno de esos tonos tiene un sonido característico que difiere en **calidad** o timbre, es decir, una mezcla de armónicos de intensidades distintas. La mayoría de los sonidos musicales están formados por una superposición de muchos tonos de distintas frecuencias. A esos diversos tonos se les llama **tonos parciales** o simplemente parciales. La frecuencia mínima se llama **frecuencia fundamental**, y determina la altura de la nota. Los tonos parciales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental se llaman **armónicos**. Un tono con el doble de la frecuencia que la fundamental es el segundo armónico; uno con tres veces la frecuencia fundamental es el tercer armónico, y así sucesivamente (figura 12.41).\* Lo que da a una nota musical su timbre característico es la diversidad de tonos parciales.

Cuando tocamos el do central en el piano, se produce un tono fundamental con una altura aproximada de 262 hertz, y también una mezcla de tonos parciales con dos, tres, cuatro, cinco o más veces la frecuencia del do central. El número y la sonoridad relativa de los tonos parciales determinan el timbre del sonido asociado con el piano. Los sonidos de prácticamente todos los instrumentos musicales están formados por uno fundamental y varios parciales. Es factible producir los tonos puros, que sólo tienen una frecuencia, con medios electrónicos. Por ejemplo, los sintetizadores electrónicos producen tonos puros y la mezcla de ellos origina una gran variedad de sonidos musicales.

La calidad de un tono está determinada por la presencia y la intensidad relativa de los diversos parciales. El sonido que produce cierta nota en el piano y el que produce una nota de la misma altura que se toca con un clarinete tienen distintos timbres, que el oído reconoce porque sus parciales son distintos. Un par de tonos con la misma altura pero con diferentes timbres tienen ya sea distintos parciales, o una diferencia en la intensidad relativa de esos parciales.

### Instrumentos musicales

Los instrumentos musicales convencionales se clasifican en tres categorías: de cuerdas vibratorias; de columnas de aire vibratorias y de percusión.

\*No todos los tonos parciales que contiene un tono complejo son múltiplos enteros del fundamental. A diferencia de los armónicos de los instrumentos de viento y los metales, los instrumentos de cuerda, como los pianos, producen tonos parciales "estirados" que casi son armónicos, pero no lo son.

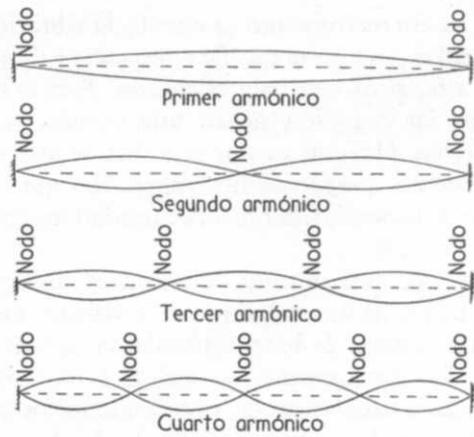


FIGURA 12.41 Modos de vibración de una cuerda para guitarra.

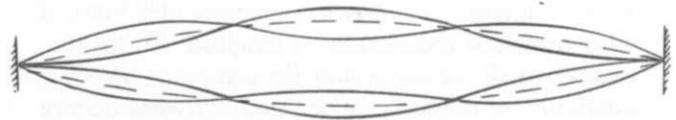


FIGURA 12.42 Vibración compuesta por el modo fundamental y el tercer armónico.

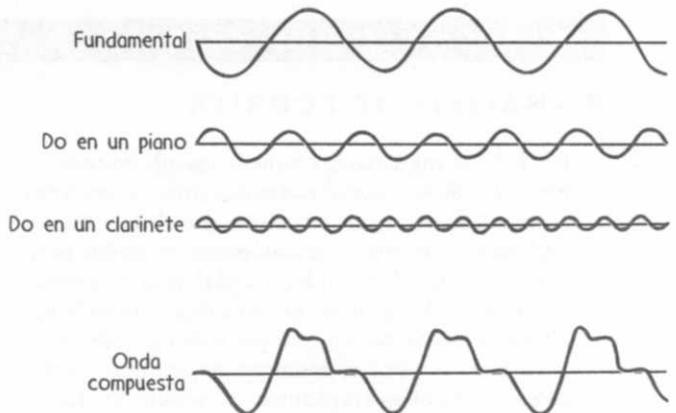


FIGURA 12.43 La combinación de ondas senoidales producen una onda compuesta.

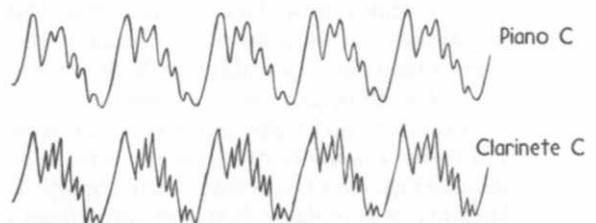


FIGURA 12.44 Los sonidos del piano y del clarinete difieren en su timbre.

En un instrumento de cuerda, la vibración de las cuerdas pasa a una caja de resonancia y después sale al aire, pero con baja eficiencia. Para compensar esto, las orquestas tienen una sección grande de cuerdas. Hay una menor cantidad de instrumentos de viento, que son de alta eficiencia, y que compensan de forma suficiente una cantidad mucho mayor de violines.

En un instrumento de viento, el sonido es una vibración de una columna de aire dentro de él. Hay varias formas de hacer vibrar las columnas de aire. En los instrumentos de metal, como trompetas, cornos y trombones, las vibraciones de los labios del ejecutante interactúan con las ondas estacionarias, que se forman por la reflexión de la energía acústica dentro del instrumento gracias al extremo en forma de campana. Las longitudes de las columnas de aire que vibran se manipulan oprimiendo válvulas que agregan o reducen segmentos del tubo, o aumentando o reduciendo su longitud. En los instrumentos de viento, como los clarinetes, oboes y saxofones, el músico produce una corriente de aire que pone a vibrar una lengüeta; mientras que en los flautines, flautas y pícolos, el músico sopla contra la orilla de un agujero y produce una corriente variable que pone a vibrar la columna de aire.

En los instrumentos de percusión, como los tambores y los címbalos, se golpea una membrana bidimensional o superficie elástica para producir el sonido. El tono fundamental que se produce depende de la geometría, la elasticidad y, en algunos casos, de la tensión superficial. Los cambios de intensidad se producen modificando la tensión de la superficie vibratoria; una forma de lograrlo consiste en oprimir con la mano la orilla de la membrana en un tambor. Es posible generar diferentes formas de vibración golpeando la superficie en distintos lugares. En un timbal, por ejemplo, la forma de la caja cambia la frecuencia de la membrana. Como en todos los sonidos musicales, la calidad depende del número de los tonos parciales y de su sonoridad relativa.

Los instrumentos musicales electrónicos son muy distintos de los convencionales. En vez de cuerdas que frotar, pulsar o golpear, o de lengüetas sobre las que se debe soplar aire, o de diafragmas que se deban golpear para producir los sonidos, en algunos instrumentos electrónicos se usan los electrones para generar las señales que forman los sonidos musicales. Otros comienzan con el sonido de un instrumento acústico y lo modifican. La música electrónica requiere que el compositor y el

## APLICACIONES COTIDIANAS

### ■ ANÁLISIS DE FOURIER

En 1822 el matemático francés Joseph Fourier hizo uno de los descubrimientos más interesantes acerca de la música. Descubrió que el movimiento ondulatorio se puede descomponer en ondas senoidales sencillas. Una onda senoidal es la más sencilla de las ondas y tiene una sola frecuencia (figura 12.43). Fourier determinó que todas las ondas periódicas se pueden descomponer en ondas senoidales de distintas amplitudes y frecuencias. La operación matemática para hacerlo se llama **análisis de Fourier**. Aquí no explicaremos este procedimiento matemático, sino sólo señalaremos que, gracias a dicho análisis, es posible determinar las ondas senoidales puras que se suman y forman el tono de un violín, por ejemplo. Cuando esos tonos puros suenan juntos, digamos, al golpear varios diapasones o al tocar las teclas adecuadas de un órgano eléctrico, se combinan y se obtiene el tono del violín. La onda senoidal de frecuencia mínima es la fundamental y determina la altura de la nota. Las ondas senoidales de mayor frecuencia son los parciales que forman el timbre característico. Así, la forma de la onda de cualquier instrumento musical no es más que una suma de ondas senoidales simples.

Como la forma de la onda en la música es una multitud de ondas senoidales, para reproducir con exactitud el sonido en un radio, un reproductor de discos o de cintas, se debe procesar un intervalo de frecuencias tan grande como sea posible. Las notas del teclado en un piano van de 27 a 4200 hertz; no obstante, para reproducir con fidelidad la música de una pieza en el piano, el sistema sonoro debe tener un intervalo de frecuencias de hasta 20,000 hertz. Cuanto mayor sea el intervalo de frecuencias de un sistema sonoro eléctrico, más se parecerá el sonido producido al original; ésa es la razón por la que un sistema sonoro de alta fidelidad tiene una amplia gama de frecuencias.

Nuestro oído hace una especie de análisis de Fourier automático. Clasifica el complejo conjunto de pulsaciones de aire que le llegan y las transforma en tonos puros, formados por ondas senoidales. Nosotros recombina los distintos grupos de esos tonos puros al escuchar. Las combinaciones que hemos aprendido a atender determinan lo que escuchamos en un concierto. Podemos dirigir nuestra atención hacia los sonidos de los diversos instrumentos, y distinguir los sonidos más débiles de los más fuertes; nos podemos deleitar con la interacción de los instrumentos y además seguir detectando los sonidos extraños del entorno. Es un logro casi increíble.

ejecutante tengan vastos conocimientos de musicología, pues constituye una herramienta nueva y poderosa en las manos del músico.



¿Quién aprecia mejor la música, un conocedor o un oyente casual?



¿Se saltan tus CD? Límpialos suavemente con un poco de crema dental (dentífrico). Los abrasivos que pulen los dientes también pueden eliminar las ralladuras de un disco.



FIGURA 12.45

¿Todos los oyentes escuchan la misma música?

## RESUMEN DE TÉRMINOS

**Vibración** Un vaivén en el tiempo.

**Onda** Un vaivén tanto en el espacio como en el tiempo.

**Amplitud** Para una onda o una vibración, el desplazamiento máximo a cada lado de la posición de equilibrio (posición intermedia).

**Longitud de onda** Distancia entre crestas, valles o partes idénticas sucesivos de una onda.

**Frecuencia** Para un cuerpo o medio en vibración, la cantidad de vibraciones por unidad de tiempo. Para una onda, la cantidad de crestas que pasan por determinado punto por unidad de tiempo.

**Hertz** Unidad del SI para frecuencia. Un hertz (Hz) es igual a una vibración por segundo.

**Periodo** Tiempo requerido para que una vibración o una onda realicen un ciclo completo; es igual a  $1/\text{frecuencia}$ .

**Pulsaciones** Serie de refuerzos y anulaciones alternados, producida por la interferencia de dos ondas de frecuencias un poco distintas, que se escuchan como un efecto de trémolo en las ondas sonoras.

$$\text{Rapidez de la onda} = \text{frecuencia} \times \text{longitud de onda}$$

**Onda transversal** Onda en la cual el medio vibra en dirección perpendicular (transversal) a la dirección en que se propaga la onda. Las ondas luminosas son transversales.

**Onda longitudinal** Onda en la cual el medio vibra en dirección paralela (longitudinal) a la dirección en que se propaga la onda. Las ondas sonoras son longitudinales.

**Compresión** Región condensada del medio a través del cual se propaga una onda longitudinal.

**Refracción** Desviación del sonido o de cualquier onda originada por una diferencia en la rapidez de las ondas.

**Tono** La impresión subjetiva de la frecuencia del sonido.

**Reflexión** El regreso de una onda sonora; se le llama *eco*.

**Reverberación** Persistencia de un sonido, como el eco.

**Rarefacción** Región enrarecida, o región de menor presión, en el medio a través del cual se propaga una onda longitudinal.

**Vibración forzada** Producción de vibraciones en un objeto, debida a una fuerza en vibración.

**Frecuencia natural** Frecuencia a la cual un objeto elástico naturalmente tiende a vibrar, de manera que se requiere una energía mínima para producir una vibración forzada o para continuar la vibración a esa frecuencia.

**Resonancia** Respuesta de un objeto cuando la frecuencia impelente coincide con su frecuencia natural.

**Interferencia** Resultado de la superposición de ondas diferentes, a menudo de la misma longitud de onda. La interferencia constructiva resulta del reforzamiento cresta con cresta; la interferencia destructiva resulta de la anulación de cresta con valle.

**Rapidez de la onda** Rapidez con que las ondas pasan por determinado punto.

**Onda estacionaria** Distribución ondulatoria estacionaria que se forma en un medio cuando dos conjuntos de ondas idénticas atraviesan el medio en direcciones opuestas.

**Efecto Doppler** Corrimiento en la frecuencia del movimiento ondulatorio, debido al movimiento del emisor o del receptor.

**Onda de proa** Perturbación en forma de V producida por un objeto que se mueve por una superficie líquida a una rapidez mayor que la rapidez de la onda.

**Onda de choque** Perturbación en forma de cono producida por un objeto que se mueva a rapidez supersónica a través de un fluido.

**Estampido sónico** Sonido intenso debido a la incidencia de una onda de choque.

**Calidad** El timbre característico de un sonido musical, determinado por el número y las intensidades relativas de los tonos parciales.

**Tono parcial** Onda sonora de una frecuencia, componente de un tono complejo. Cuando la frecuencia de un tono parcial es un múltiplo entero de la frecuencia más baja, es un tono armónico.

**Frecuencia fundamental** La frecuencia más baja de vibración, o primer armónico; en una cuerda, la vibración forma un solo segmento.

**Armónico** Un tono parcial cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El segundo armónico tiene doble frecuencia que la fundamental, el tercer armónico tres veces la frecuencia, y así sucesivamente.

**Análisis de Fourier** Un método matemático que descompone una onda periódica en una combinación de ondas senoidales simples.

## LECTURAS SUGERIDAS

Chiaverina, Chris y Tom Rossing. *Light Science: Physics for the Visual Arts*. Nueva York: Springer, 1999. ¡Lectura agradable de dos físicos divertidos!

Para más en la música de los salones de conciertos, véase <http://www.concerthalls.org>

Véase la producción de ondas estacionarias en <http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaEd/e-wave4.html>.

## PREGUNTAS DE REPASO

## 12.1 Vibraciones y ondas

1. ¿Cómo se llama un vaivén en el tiempo? ¿Y un vaivén en el espacio y en el tiempo?
2. ¿Cuál es la diferencia entre la propagación de las ondas sonoras y la propagación de las ondas luminosas?
3. ¿Cuál es la fuente de todas las ondas?
4. Explica las diferentes partes de una onda: periodo, amplitud, longitud de onda y frecuencia.
5. ¿Cuántas vibraciones por segundo representa una onda de radio de 101.7 MHz?
6. ¿Cómo se relacionan entre sí la frecuencia y el periodo?

## 12.2 Movimiento ondulatorio

7. En una palabra, ¿qué es lo que se mueve de la fuente al receptor en el movimiento ondulatorio?
8. ¿El medio en el cual se propaga una onda se mueve con ella? Describe un ejemplo que respalde tu respuesta.
9. ¿Cuál es la relación entre frecuencia, longitud de onda y rapidez de la onda?

## 12.3 Ondas transversales y longitudinales

10. ¿Qué dirección tienen las vibraciones en una onda transversal, en relación con la dirección de propagación de la onda?
11. ¿Qué dirección tienen las vibraciones en una onda longitudinal, en relación con la dirección de propagación de la onda?
12. Explica la diferencia entre compresión y rarefacción.

## 12.4 Ondas sonoras

13. ¿Cómo emite sonido un diapasón que vibra?
14. ¿El sonido viaja más rápido en el aire tibio o en el aire frío? Defiende tu respuesta.
15. ¿Cómo se compara la rapidez del sonido en el agua con la rapidez del sonido en el aire? ¿Cómo se compara la rapidez del sonido en el acero con la rapidez del sonido en el aire?

## 12.5 Reflexión y refracción del sonido

16. ¿Cuál es la ley de la reflexión para el sonido?
17. ¿Qué es una *reverberación*?
18. ¿Cuál es la causa de la refracción?
19. ¿El sonido tiende a desviarse hacia arriba o hacia abajo, cuando su rapidez es menor cerca del suelo que su rapidez a mayor altura?

20. Hay una diferencia entre la forma en que pasivamente vemos nuestro entorno en un día soleado y la forma en que activamente indagamos en nuestro entorno con una lámpara en la oscuridad. ¿Cuál de estas formas de percibir nuestro entorno es más parecida a la manera en que un delfín percibe su ambiente?

## 12.6 Vibraciones forzadas y resonancia

21. ¿Por qué suena más fuerte un diapasón cuando se golpea sujetándolo contra una mesa?
22. ¿Un pedazo de masilla (plastilina) tiene una frecuencia natural? Explica.
23. ¿Qué tienen que ver las vibraciones forzadas con la resonancia?
24. ¿Qué se requiere para hacer que un objeto resuene?
25. Cuando escuchas tu radio, ¿por qué sólo escuchas una estación a la vez, y no todas al mismo tiempo?
26. ¿Por qué las tropas "rompen filas" cuando cruzan un puente?

## 12.7 Interferencia

27. ¿Qué clase de ondas pueden mostrar interferencia?
28. Explica la diferencia entre interferencia constructiva e interferencia destructiva.
29. ¿Qué significa decir que una onda está fuera de fase con otra?
30. ¿Qué fenómeno físico sustenta las pulsaciones?
31. ¿Qué causa una onda estacionaria?
32. ¿Qué es un nodo? ¿Qué es un antinodo?

## 12.8 Efecto Doppler

33. ¿En el efecto Doppler cambia la frecuencia? ¿Cambia la longitud de onda? ¿Cambia la rapidez de la onda?
34. ¿Puede observarse el efecto Doppler en las ondas longitudinales, en las ondas transversales o en ambas?

## 12.9 Barreras de ondas y ondas de proa

35. ¿Cómo se compara la rapidez de una fuente ondulatoria con la rapidez de las ondas mismas cuando se produce una barrera de onda? ¿Cómo se comparan cuando se produce una onda de proa?
36. ¿Cómo varía la forma en V de una onda de proa, en función de la rapidez de la fuente ondulatoria?

**12.10 Ondas de choque y estampido sónico**

37. ¿Cierto o falso? El estampido sónico sólo se produce cuando un avión rompe la barrera del sonido. Defiende tu respuesta.
38. ¿Cierto o falso? Para producir un estampido sónico un objeto debe ser "ruidoso". Menciona dos ejemplos que respalden tu respuesta.

**12.11 Sonidos musicales**

39. Describe la diferencia entre ruido y música.
40. ¿Por qué en una orquesta suele haber más instrumentos de cuerda que instrumentos de viento?

**EXPLORACIONES ACTIVAS**

- Ata una manguera de caucho, un resorte o una cuerda a un soporte fijo, y sacúdelo para producir ondas estacionarias. Observa cuántos nodos puedes producir.
- Trata de ver cuál de tus oídos tiene mejor audición. Cúbrete uno y determina a qué distancia tu oído descubierto puede captar el tic-tac de un reloj; repite lo anterior con el otro oído. Observa también cómo mejora la audición cuando pones las manos en forma cóncava a un lado de cada oído.
- Realiza la actividad sugerida en la figura 12.23 con un sistema de sonido estereofónico. Simplemente invierte los alambres de entrada de uno de los altavoces de manera que los dos estén fuera de fase. Cuando se escucha un sonido monoaural y los altavoces se colocan frente a frente, la disminución del volumen es verdaderamente sorprendente! Si los altavoces están bien aislados, casi no escucharás ningún sonido.
- Para esta actividad necesitarás un altavoz aislado (fuera de su caja o estuche) y una hoja de cartoncillo, cuanto más grande, mejor. Corta un agujero en la parte central de la hoja que esté aproximadamente a la mitad del altavoz. Escucha la música del altavoz aislado y luego escucha la diferencia de cuando se coloque contra el agujero. La hoja disminuye la cantidad del sonido proveniente de la parte trasera del altavoz que interfiere con el sonido proveniente de la parte frontal, produciendo así un sonido más completo. Ahora sabes porque los altavoces se montan en estuches cerrados.
- Moja el dedo y frótalo en torno a la boca de una copa de vidrio de pared delgada y con pie, mientras con la otra mano sujeta la base de la copa, firmemente contra la mesa. La fricción del dedo producirá ondas estacionarias en la copa, que son similares a las ondas que se producen en un violín por la fricción del arco contra las cuerdas. Haz la prueba con un plato o una cacerola de metal.
- Haz girar un zumbador (timbre) de cualquier tipo sobre tu cabeza en un círculo. Tú no escucharás el efecto Doppler, pero tus amigos que estén un poco alejados sí podrán notarlo. El tono aumentará cuando se acerque y disminuirá cuando se aleje. Después, cambia el lugar con un amigo de manera que tú también puedas oírlo.
- Canta la nota más grave o baja que puedas alcanzar. A continuación duplica la altura para saber cuántas octavas abarca tu voz.
- Sopla sobre parte superior de dos botellas vacías y ve si el tono que producen es el mismo. Luego, pon una de las botellas en el congelador e intenta hacer lo mismo. El sonido viajará más lentamente en el aire frío más denso de la botella fría y la nota será más baja. Hazlo para comprobarlo.

**CÁLCULOS DE UN PASO**

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{periodo}}; f = \frac{1}{T}$$

$$\text{Periodo} = \frac{1}{\text{frecuencia}}; T = \frac{1}{f}$$

- ¿Cuál es la frecuencia en hertz que corresponde a cada uno de los siguientes periodos?
  - 0.10 s
  - 5 s
  - 1/60 s
- ¿Cuál es el periodo en segundos que corresponde a cada una de las siguientes frecuencias?
  - 10 Hz
  - 0.2 Hz
  - 60 Hz

- Un peso colgado de un resorte sube y baja una distancia de 20 centímetros, dos veces cada segundo. ¿Cuáles serán su frecuencia, su periodo y su amplitud?

**Rapidez de la onda  $v = f\lambda$** 

- Un marinero en una lancha observa que las crestas de las olas pasan por la cadena del ancla cada 5 segundos. Estima que la distancia entre las crestas es de 15 metros. También estima en forma correcta la rapidez de las olas. ¿Cuál es esa rapidez?
- Las ondas de radio viajan a la rapidez de la luz, es decir, a 300,000 km/s. ¿Cuál es la longitud de las ondas de radio que se reciben de la estación de 101.1 MHz en tu radio de FM?

## EJERCICIOS

1. ¿Cuál es la fuente del movimiento ondulatorio?
2. Si sube al doble la frecuencia de un objeto en vibración, ¿qué sucederá con su periodo?
3. Si sumerges repetidamente el dedo en un plato lleno de agua se forman ondas. ¿Qué sucede con la longitud de onda si sumerges el dedo con más frecuencia?
4. ¿Cómo se compara la frecuencia de vibración de un objeto pequeño que flota en el agua, con la cantidad de ondas que pasan por él cada segundo?
5. ¿Qué clase de movimiento debes impartir a la boquilla de una manguera en el jardín para que el chorro que salga tenga aproximadamente una forma senoidal?
6. ¿Qué clase de movimiento debes impartir a un resorte helicoidal estirado (un *slinky*) para generar una onda transversal? ¿Y para generar una onda longitudinal?
7. Si se abre una llave de gas durante pocos segundos, alguien que esté a un par de metros oír el escape del gas, mucho antes de captar su olor. ¿Qué indica esto acerca de la rapidez del sonido y del movimiento de las moléculas en el medio que lo transporta?
8. Un gato puede oír frecuencias hasta de 70,000 Hz. Los murciélagos emiten y reciben chillidos con ultra alta frecuencia, hasta de 120,000 Hz. ¿Quiénes oyen sonidos de longitudes de onda más cortas, los gatos o los murciélagos?
9. ¿Qué quiere decir que una estación de radio está "en el 101.1 de tu radio FM"?
10. El sonido de la fuente A tiene el doble de frecuencia que el sonido de la fuente B. Compara las longitudes de onda de las ondas sonoras de las dos fuentes.
11. Imagina que una onda sonora y una onda electromagnética tuvieran la misma frecuencia. ¿Cuál tendría la mayor longitud de onda?
12. En los arrancadores de una pista de atletismo, observas el humo de la pistola de arranque antes de oír el disparo. Explica por qué.
13. En una competencia olímpica, un micrófono capta el sonido de la pistola de arranque y lo manda eléctricamente a altoparlantes, en cada arrancador de los competidores. ¿Por qué?
14. En el instante en que una región de alta presión se crea justo fuera de las ramas de un diapasón que vibra, ¿qué se crea dentro de las ramas?
15. ¿Por qué después de una nevada todo está tan callado?
16. Si una campana suena dentro de un capelo de vidrio, ya no la podremos oír si dentro del capelo se hace el vacío, pero la podemos seguir viendo. ¿Qué indica esto acerca de las diferentes propiedades de las ondas sonoras y las ondas luminosas?
17. ¿Por qué la Luna se considera un "planeta silencioso"?
18. Al verter agua en un vaso, lo golpeas repetidamente con una cuchara. A medida que el vaso se llena, ¿aumentará o disminuirá la altura del sonido producido? (¿Qué debes hacer para contestar esta pregunta?)
19. Si la rapidez del sonido dependiera de su frecuencia, ¿disfrutarías de un concierto sentado hasta un segundo piso? Explica por qué.
20. Si la frecuencia del sonido sube al doble, ¿qué cambio tendrá su rapidez? ¿Y su longitud de onda? Defiende tu respuesta.
21. ¿Por qué el sonido se propaga con más rapidez en aire tibio?
22. ¿Por qué el sonido se propaga con más rapidez en aire húmedo? (*Sugerencia:* a la misma temperatura, las moléculas de vapor de agua tienen la misma energía cinética promedio que las moléculas de nitrógeno u oxígeno del aire, que son más pesadas. Entonces, ¿cómo se comparan las rapidez promedio de las moléculas de  $H_2O$  con las de las rapidez de  $N_2$  y de  $O_2$ ?)
23. ¿Por qué el eco es más débil que el sonido original?
24. ¿Cuáles son los dos errores de física que se cometen en una película de ciencia ficción, cuando se ve una explosión lejana en el espacio exterior, y observas y escuchas esa explosión al mismo tiempo?
25. La regla general para estimar la distancia, en kilómetros, entre un observador y un relámpago que cae consiste en dividir entre tres la cantidad de segundos en el intervalo entre el destello de luz y el sonido. ¿Es correcta esta regla?
26. Si una sola perturbación a cierta distancia manda ondas transversales y longitudinales, que se propagan con rapidez bastante distintas en el medio, por ejemplo, en el suelo durante un terremoto, ¿cómo se podría determinar la distancia a la perturbación?
27. ¿Por qué todos los soldados al final de un largo desfile, que marchan con el ritmo de una banda, no guardan el mismo paso que los del principio del desfile?
28. ¿Cuál es el riesgo para las personas que están en el balcón de un auditorio "zapateen" a un ritmo constante?
29. ¿Por qué el sonido de un arpa es suave en comparación con el de un piano?
30. Si el asa de un diapasón se sujeta con firmeza contra una mesa, el sonido de ese diapasón se hace más intenso. ¿Por qué? ¿En qué afecta eso el tiempo que el diapasón dura vibrando? Explica cómo.
31. La cítara es un instrumento musical de la India y tiene un conjunto de cuerdas que vibran y producen música, aun cuando el músico nunca las toca. Esas "cuerdas simpáticas" son idénticas a las cuerdas que se pulsan, y están montadas abajo de ellas. ¿Cuál es tu explicación?
32. Un dispositivo especial puede transmitir sonido fuera de fase proveniente de un ruidoso rotomartillo a los audífonos de su operador. Sobre el ruido del martillo, el operador puede oír con facilidad tu voz, mientras que tú no puedes escuchar la de él. Explica por qué.
33. Dos ondas sonoras de la misma frecuencia pueden interferir, pero para producir pulsaciones, las dos ondas sonoras deben tener distintas frecuencias. ¿Por qué?
34. Al caminar junto a ti, tu amigo da 50 pasos por minuto, mientras que tú das 48 pasos por minuto. Si comienzan al mismo tiempo, ¿cuándo mantendrán de nuevo el mismo paso?
35. Imagina que un afinador de pianos oye tres pulsaciones por segundo al escuchar el sonido combinado de un diapasón y la nota del piano que afina. Después de apretar un poco la cuerda escucha cinco pulsaciones por segundo. ¿Debería apretar o aflojar la cuerda?
36. Una locomotora está parada, y suena el silbato; a continuación se acerca hacia ti.
  - a) ¿La frecuencia que escuchas aumenta, disminuye o queda igual?

- b) ¿Y la longitud de onda que llega al oído?  
 c) ¿Y la rapidez del sonido en el aire que hay entre tú y la locomotora?
37. Cuando suenas el claxon al manejar hacia una persona que está parada, ella escucha un aumento de su frecuencia. ¿Escucharía un aumento en la frecuencia del claxon si estuviera también dentro de un automóvil que se mueve con la misma rapidez y en la misma dirección que el tuyo? Explica por qué.
  38. ¿Cómo ayuda el efecto Doppler a que la policía determine quiénes son los infractores por exceso de rapidez?
  39. Los astrónomos saben que la luz emitida por un elemento específico en un extremo del Sol tiene una frecuencia ligeramente mayor que la luz que provienen de ese elemento en el extremo opuesto. ¿Qué nos indican tales mediciones acerca del movimiento del Sol?
  40. ¿Sería correcto decir que el efecto Doppler es el cambio aparente de la rapidez de una onda, debido al movimiento de la fuente? (¿Por qué esta pregunta es para comprobar la comprensión en la lectura y también el conocimiento de física?)

41. ¿El ángulo del cono de una onda de choque se abre, se cierra o permanece constante cuando un avión supersónico aumenta su rapidez?
42. Si el sonido de un avión no proviene de la parte del cielo donde se ve, ¿significa eso que el avión viaja con más rapidez que la del sonido? Explica.
43. ¿Se produce estampido sónico en el momento en el que el avión atraviesa la barrera del sonido? Explica por qué.
44. ¿Por qué un avión subsónico, por más ruidoso que sea, no puede producir un estampido sónico?
45. ¿Cuál es el principio físico que utiliza Manuel cuando se impulsa con el ritmo de la frecuencia natural del columpio?



**PROBLEMAS**

● PRINCIPIANTE ■ INTERMEDIO ◆ EXPERTO

1. ● Una enfermera cuenta 72 latidos del corazón en un minuto. Demuestra que el periodo y la frecuencia de los latidos son de 0.83 s y 1.2 Hz, respectivamente.
2. ● Sabemos que la rapidez  $v = \text{distancia}/\text{tiempo}$ . Demuestra que cuando la distancia recorrida es una longitud de onda  $\lambda$  y el tiempo de viaje es el periodo  $T$  (que es igual a  $1/\text{frecuencia}$ ) obtienes  $v = f\lambda$ .
3. ● Comúnmente los hornos de microondas cocinan los alimentos usando microondas con frecuencia de 2.45 GHz (gigahertz,  $10^9$  Hz). Demuestra que la longitud de onda de estas microondas es de 12.2 cm.
4. ● Durante años, a los oceanógrafos les intrigaron las ondas sonoras captadas por micrófonos bajo las aguas del Océano Pacífico. Estas llamadas ondas T son de los sonidos más puros de la naturaleza. Finalmente, encontraron que la fuente son volcanes submarinos, cuyas columnas de burbujas ascendentes resuenan como tubos de órgano. Una onda T característica tiene una frecuencia de 7 Hz. Sabiendo que la rapidez del sonido en el agua de mar es 1530 m/s, demuestra que la longitud de una onda T es de 219 m.
5. ● Un barco-sonda explora el fondo del mar con ondas ultrasónicas que se propagan a 1530 m/s en el agua. Demuestra que si el tiempo entre la salida de la señal y el regreso del eco es de 6 segundos, la profundidad que tiene el agua directamente abajo del barco es de 4590 m.
6. ● Un murciélago, al volar en una caverna, emite un sonido y recibe el eco 0.1 s después. Demuestra que la distancia a la que está la pared de la caverna es de 17 m.
7. ● Susie golpea con un martillo un bloque de madera cuando ella está a 85 m de una pared de ladrillos grande. Cada vez que ella golpea el bloque, escucha un eco 0.5 segundos después. Con esta información, demuestra que la rapidez del sonido es de 230 m/s.
8. ● Imagina a un leñador dormilón que vive en las montañas. Antes de acostarse a dormir grita: "¡DESPIÉRTATE!"

- y el eco del sonido en la montaña más cercana le llega 8 horas después, y lo despierta. Demuestra que la montaña está a casi 5000 km de distancia.
9. ● En un teclado, la frecuencia del do central es de 256 Hz.
    - a) Demuestra que el periodo de una vibración con este tono es de 0.00391 s.
    - b) Al salir este sonido del instrumento con una rapidez de 340 m/s, demuestra que su longitud de onda en el aire es de 1.33 m.
  10. ■ a) Si fueras tan ingenuo como para tocar el teclado bajo el agua, donde la rapidez del sonido es de 1500 m/s, demuestra que la longitud de onda del do central en el agua sería de 5.86 m.
    - b) Explica por qué el do central (o cualquier otra nota) tiene mayor longitud de onda en el agua que en el aire.
  11. ● ¿Qué frecuencia de pulsaciones es posible con diapasones cuyas frecuencias sean de 256, 259 y 261 Hz?
  12. ■ Como se observa en la figura, el medio ángulo del cono de la onda de choque generada por un transporte supersónico es  $45^\circ$ . ¿Cuál será la rapidez del avión en relación con la rapidez del sonido?

