

PARTE CUATRO

Sonido

Sonido



Chris Chiaverina, ex presidente de la Asociación Estadounidense de Profesores de Física, y el físico en acústica Tom Rossing producen sonidos en un hang, un nuevo instrumento de acero que se toca con las manos.

Si un árbol se cayera en medio de un tupido bosque, a cientos de kilómetros de cualquier ser viviente, ¿habría algún sonido? A esta pregunta las personas contestan de distintas maneras. “No”, dirán algunos, “el sonido es subjetivo y requiere que alguien lo escuche, y si no lo hay no habrá sonido”. Otros dirán: “Sí, un sonido no es sólo una idea de las personas. Un sonido es algo objetivo.” Con frecuencia, discusiones como ésta no alcanzan a tener un consenso, porque los participantes no pueden darse cuenta que discuten no sobre la naturaleza del sonido, sino sobre la definición de la palabra. Todos tienen razón, dependiendo de qué definición se adopte, aunque sólo se puede investigar cuando se ha convenido en una definición. Los físicos, como los de la imagen anterior, suelen tomar la posición objetiva, y definen el sonido como una forma de energía que existe, sea o no escuchado, y de ahí parten para investigar su naturaleza.

Origen del sonido

La mayoría de los sonidos son ondas producidas por las vibraciones de objetos materiales. En un piano, un violín o una guitarra, el sonido se produce por las cuerdas en vibración; en un saxofón, por una lengüeta vibratoria; en una flauta, por una columna vacilante de aire en la embocadura. Tu voz se debe a las vibraciones de las cuerdas vocales.

En cada uno de esos casos, la vibración original estimula la vibración de algo mayor o más masivo, como la caja de resonancia de un instrumento de cuerdas, la columna de aire de la lengüeta de un instrumento de viento, o el aire en la garganta y la boca de un cantante. Este material en vibración manda, entonces, una perturbación por el medio que la rodea, que normalmente es aire, en forma de ondas longitudinales. En condiciones ordinarias, son iguales la frecuencia de la fuente de vibración y la frecuencia de las ondas sonoras que se producen.

Describiremos nuestra impresión subjetiva de la frecuencia del sonido con la palabra *altura*. La frecuencia corresponde a la altura: un sonido alto o agudo como el de un flautín tiene alta frecuencia de vibración; en tanto que un sonido bajo o grave como el de una bocina de niebla tiene baja frecuencia de vibración. El oído de una persona joven es capaz de captar normalmente alturas que corresponden al intervalo de frecuencias de entre unos 20 y 20,000 hertz. Conforme vamos madurando, se contraen los límites de este intervalo de audición, en especial en el extremo de alta frecuencia. Las ondas sonoras cuyas frecuencias son menores que 20 hertz

son **infrasónicas**, y aquellas cuyas frecuencias son mayores que 20,000 hertz se llaman **ultrasónicas**. No podemos escuchar las ondas sonoras infrasónicas ni las ultrasónicas.

Naturaleza del sonido en el aire

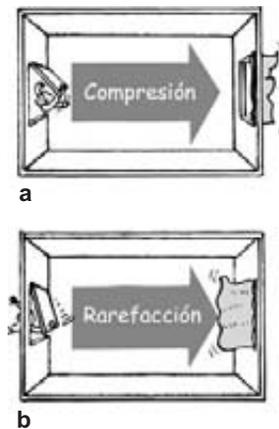


FIGURA 20.1
 a) Cuando la puerta se abre, se produce una compresión que se propaga por el recinto. b) Cuando la puerta se cierra, se produce un rarefacción o enrarecimiento que se propaga por el recinto. (Adaptada de A. V. Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach*. San Francisco: W. H. Freeman and Company. Copyright © 1967.)

Cuando aplaudimos, el sonido que se produce no es periódico. Está formado por un *impulso* o *pulso* ondulatorio que se propaga en todas direcciones. El impulso perturba el aire de la misma forma que un impulso similar perturbaría un resorte o *slinky*. Cada partícula se mueve con ir y venir a lo largo de la dirección de la onda que se expande.

Para tener una idea más clara de este proceso, imagina una habitación larga, como la de la figura 20.1a. En un extremo hay una ventana abierta con una cortina que cuelga de ella. En el otro extremo hay una puerta. Al abrir la puerta nos podemos imaginar que empuja las moléculas que están junto a ella, y las mueve respecto a sus posiciones iniciales hacia las posiciones de las moléculas vecinas. A la vez, éstas empujan a sus vecinas, y así sucesivamente, como una compresión que se propaga por un resorte, hasta que la cortina se sacude y sale de la ventana. Un impulso de aire comprimido se ha movido desde la puerta hasta la cortina. A este impulso de aire comprimido se le llama **compresión**.

Cuando cerramos la puerta (figura 20.1b), ésta empuja algunas moléculas de aire fuera del recinto. De esta forma se produce una zona de baja presión tras la puerta. Las moléculas vecinas, entonces, se mueven hacia ellas y dejan tras de sí una zona de baja presión. Se dice que esta zona de baja presión de aire está *enrarecida*. Otras moléculas más alejadas de la puerta, a su vez, se mueven hacia esas regiones enrarecidas y, de nuevo, la perturbación se propaga por la habitación. Ello se nota en la cortina, que se agita hacia adentro. Esta vez, la perturbación es un **enrarecimiento** o **rarefacción**.

Como en todo movimiento ondulatorio, no es el medio mismo el que se propaga por el recinto, sino el impulso portador de energía. En ambos casos, el impulso viaja desde la puerta hasta la cortina. Lo sabemos porque en ambos casos la cortina se mueve después de que la puerta se abre o se cierra. Si continuamente abres y cierras la puerta con un movimiento periódico, puedes establecer una onda de compresiones y enrarecimientos periódicos, que hará que la cortina salga y entre por la ventana. En una escala mucho menor, pero más rápida es lo que sucede cuando se golpea un diapasón. Las vibraciones periódicas del diapasón y las ondas que produce tienen una frecuencia mucho

Los átomos y las moléculas en un medio vibran al transmitir el sonido. Éste no puede viajar en el vacío porque ahí no hay nada que vibre.

¡EUREKA!

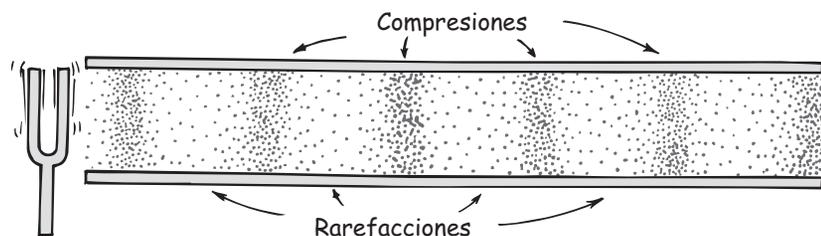


FIGURA 20.2
 Las compresiones y las rarefacciones se propagan (a la misma rapidez y en la misma dirección) desde el diapasón, por el aire en el tubo.



FIGURA 20.3

Una raqueta que vibra en medio de pelotas de ping pong produce la vibración de las pelotas.



FIGURA 20.4

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

mayor, y una amplitud mucho menor que las que causa la puerta que abre y cierra. No notas el efecto de las ondas sonoras sobre la cortina; pero las notas muy bien cuando llegan a tus tímpanos sensibles.

Imagina las ondas sonoras (ondas acústicas) en el tubo que muestra la figura 20.2. Para simplificar sólo se indican las ondas que se propagan por el tubo. Cuando la rama del diapasón que está junto a la boca del tubo llega al mismo, entra una compresión en el tubo. Cuando la rama se aleja en dirección contraria, a la compresión sigue un enrarecimiento. Es como una raqueta de ping pong, que se mueve de un lado a otro en un recinto lleno de pelotas de ping pong. Al vibrar la fuente se produce una serie periódica de compresiones y de rarefacciones. La frecuencia de la fuente vibratoria y la de las ondas que produce son iguales.

Haz una pausa y reflexiona sobre la física del sonido (o acústica) mientras escuches tu radio. El altavoz o bocina de tu radio es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal electrónica. Las moléculas de aire junto al cono en vibración de la bocina se ponen en vibración. Este aire, a la vez, vibra contra las partículas vecinas, que a la vez hacen lo mismo, y así sucesivamente. El resultado es que del altavoz emanan distribuciones rítmicas de aire comprimido y enrarecido, llenando 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.

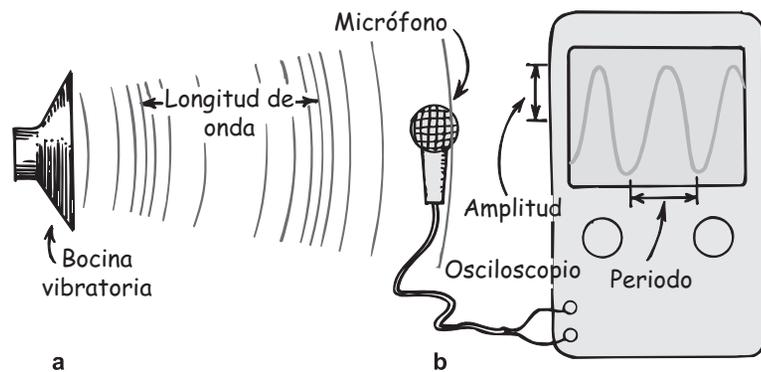


FIGURA 20.5

a) El altavoz, 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 forma de la onda en la pantalla del osciloscopio muestra información acerca del sonido.

Medios que transmiten el sonido

La mayoría de los sonidos que escuchamos se transmiten a través del aire. Sin embargo, cualquier sustancia elástica —ya sea sólida, líquida, gas o plasma— puede transmitir el sonido. La elasticidad es la propiedad que tiene un material para cambiar de forma en respuesta a una fuerza aplicada, para después regresar a su

PRÁCTICA DE FÍSICA



Cuelga de un cordón la parrilla de alambre de un refrigerador o de un horno, y sujeta los extremos del cordón a los oídos. Pide a un amigo que golpee con suavidad la parrilla, con pajas o cerdas de una escoba y con otros objetos. El efecto se aprecia mejor estando relajado, con los ojos cerrados. ¡No te olvides hacer esta prueba!



Nuestros dos oídos son tan sensibles a las diferencias del sonido que llegan 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 saltar).

¡EUREKA!

forma inicial cuando se retira la fuerza de distorsión. El acero es una sustancia elástica. En cambio, la masilla (pastilina) es inelástica.¹ En los líquidos y sólidos elásticos, los átomos están relativamente cerca entre sí y responden con rapidez a los movimientos relativos, y transmiten energía con baja pérdida. El sonido se propaga unas cuatro veces más rápido en el agua que en el aire, y unas 15 veces más rápido en el acero que en el aire.

En relación con los sólidos y los líquidos, el aire es el peor conductor de sonido. Puedes escuchar el sonido de un tren lejano con más claridad si colocas el oído sobre el riel. Asimismo, un reloj colocado sobre una mesa, más allá de la distancia de detección, se puede escuchar si recargas el oído en la mesa. O bien, mientras estés sumergido en el agua haz chocar unas piedras. Escucharás muy bien el chasquido. Si alguna vez nadaste donde había lanchas de motor, es probable que hayas notado que puedes escuchar con mucha más claridad los motores del bote bajo el agua que sobre ella. Los líquidos y los sólidos cristalinos son, en general, conductores excelentes del sonido, mucho mejores que el aire. La rapidez del sonido es, comúnmente, mayor en los sólidos que en los líquidos, y en los líquidos mayor que en los gases. El sonido no se propaga en el vacío porque para propagarse necesita de un medio. Si no hay nada que se comprima y se expanda, no puede haber sonido.

Rapidez del sonido en el aire

Si desde lejos observamos a una persona cuando parte leña, o a un beisbolista que batea, 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 1,200 kilómetros por hora (un poco más que un millonésimo de la rapidez de la luz). El vapor de agua en el aire aumenta un poco esta rapidez. El sonido se propaga con más rapidez en el aire cálido que en el aire frío. Esto era de esperarse, porque las moléculas del aire calien-

¹ La elasticidad no es lo mismo que “estirabilidad”, como la que hay en una banda de hule. Algunos materiales muy rígidos, como el acero, también son elásticos.

te son más rápidas, chocan entre sí con más frecuencia y en consecuencia pueden transmitir un impulso en menos tiempo.² 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.

EXAMÍNATE

1. ¿Las compresiones y los enrarecimientos de una onda sonora se propagan en la misma dirección, o en direcciones opuestas entre sí?
2. ¿Cuál es la distancia aproximada a un relámpago cuando mides que la demora entre el destello de luz y el trueno es de 3 segundos?

Reflexión del sonido

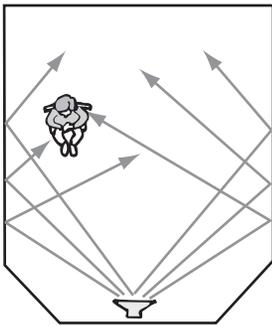


FIGURA 20.6

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

A la reflexión del sonido se le llama *eco*. La fracción de la energía que porta la onda sonora reflejada es grande si la superficie es rígida y lisa, y es menor si la superficie es suave e irregular. La energía acústica que no porte la onda sonora reflejada la contiene la onda “transmitida”, es decir, la absorbida por la superficie.

El sonido se refleja en una superficie lisa de la misma forma en que lo hace la luz: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (figura 20.6). A veces, cuando el sonido se refleja en las paredes, el techo y el piso de un recinto, las superficies reflectoras vuelven a reflejarlo, es decir, se refleja varias veces. 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 feo y sin vida. La reflexión del sonido en un recinto lo hace vivo y lleno, como habrás notado probablemente al cantar en la regadera. En el diseño de un auditorio o de una sala de conciertos 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 20.7). 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.



Una razón por la que los grandes búhos grises escuchan tan bien es que las plumas de su cara sirven como reflectores parabólicos.

¡EUREKA!

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Se propagan en la misma dirección.
2. Suponiendo que la rapidez aproximada del sonido en el aire sea de 340 m/s, en 3 s recorrerá $(340 \text{ m/s} \times 3 \text{ s}) = 1,020 \text{ m}$. No hay demora apreciable con el destello, por lo que el relámpago cayó a un poco más de 1 km de distancia.

² La rapidez del sonido en un gas es de más o menos las 3/4 partes de la rapidez promedio de las moléculas de gas.

**FIGURA 20.7**

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.

Refracción del sonido



Las ondas sonoras se desvían cuando algunas partes de sus frentes viajan a distintas rapidezces. Esto sucede en vientos erráticos o cuando el sonido se propaga a través de aire a distintas temperaturas. A tal desviación del sonido se le llama **refracción**. En un día caluroso, el aire cercano al suelo podrá estar bastante más caliente que el resto, 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. Las distintas rapidezces del sonido producen la refracción.

Escuchamos el relámpago cuando el destello está más o menos cercano, pero con frecuencia no lo escuchamos cuando está muy lejos, debido a la refracción. El sonido se propaga con más lentitud a mayor altitud, y se desvía apartándose del suelo. Con frecuencia sucede lo contrario en un día frío o por la noche, cuando la capa de aire cercana al suelo está más fría que el aire sobre ella. Entonces, se reduce la rapidez del sonido cerca del suelo. La mayor rapidez de los frentes de onda causa una flexión del sonido hacia el suelo, y hace que el sonido se pueda escuchar a distancias bastante mayores (figura 20.8).

También 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 el interior del organismo sin usar los rayos X. Cuando el soni-



La dirección en la que viaja el sonido, al igual que la dirección de un rayo de luz, siempre está en ángulo recto con su frente de onda.

¡EUREKA!

FIGURA 20.8

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

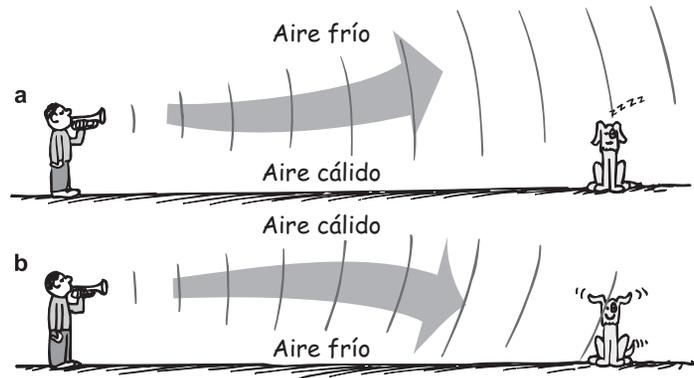


FIGURA 20.9

Un feto de cinco meses se observa en la pantalla de un sistema de ultrasonido.

do 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. Cuando el ultrasonido incide sobre un objeto en movimiento, el sonido reflejado tiene una frecuencia un poco distinta. Al usar este efecto Doppler, el médico puede “ver” latir el corazón de un feto, ya desde las 11 semanas de gestación (figura 20.9).

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 por sus ecos. Los delfines hacen eso y más.³ Las ondas ultrasónicas que emite un delfín le permiten “ver” a través de los cuerpos de otros animales y de las personas. La piel, los músculos y la grasa son casi transparentes para los delfines, por lo que sólo “ven” un delgado contorno del cuerpo; pero observa muy bien los huesos, los dientes y las cavidades llenas de gas. Un delfín puede “ver” evidencias físicas de cánceres, tumores, ataques cardiacos y hasta el estado anímico, algo que los seres humanos sólo han podido hacer en fecha reciente con el ultrasonido.

FIGURA 20.10

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.



³ 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 manda sonidos y después percibe sus alrededores con base en los ecos que regresan. 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 comunica una imagen real del pez, quizá con filtrado muy selectivo para dar énfasis, en la forma en como 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 que el nuestro!

EXAMÍNATE

Un barco oceanográfico explora el fondo del mar con sonido ultrasónico que se propaga a 1,530 m/s en el agua de mar. ¿Qué profundidad tendrá el agua, si desde la emisión del sonido hasta la llegada del eco pasan 2 segundos?

Energía en las ondas sonoras

El movimiento ondulatorio de cualquier clase posee energía en diversos grados. Por ejemplo, las ondas electromagnéticas que provienen del Sol nos traen enormes cantidades de la energía necesaria para la vida en la Tierra. En comparación, la energía en el sonido es extremadamente pequeña. Ello se debe a que para producir el sonido sólo se requiere una cantidad pequeña de energía. Por ejemplo, cuando 10,000,000 de personas hablan al mismo tiempo sólo producirían la energía acústica necesaria para encender una linterna común. La audición es posible sólo porque los oídos tienen una sensibilidad realmente notable. Sólo el micrófono más sensible puede detectar los sonidos menos intensos que los que podemos oír.

La energía acústica se disipa en energía térmica, mientras el sonido se propaga en el aire. Para las ondas de mayor frecuencia, la energía acústica se transforma con más rapidez en energía interna que para las ondas de bajas frecuencias. En consecuencia, el sonido de bajas frecuencias llega más lejos por el aire que el de altas frecuencias. Es la causa de que las sirenas de niebla de los barcos tienen baja frecuencia.

Vibraciones forzadas

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 forzada a vibrar por un diapasón a cualquier frecuencia. Se trata de un caso de **vibración forzada**.

El mecanismo de una caja de música se monta en una caja de resonancia. Sin la caja de resonancia, ese sonido apenas sería perceptible. Las cajas de resonancia son importantes en todos los instrumentos musicales de cuerda.

Frecuencia natural

Cuando alguien deja caer una llave sobre un piso de concreto, no es probable que confundamos 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 se golpean. Golpea una llave y las vibraciones que se provocan son distintas de las de un bat de béisbol, o de las de cualquier otra cosa. Todo objeto hecho de un material elástico vibra cuando es perturbado 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

COMPRUEBA TU RESPUESTA

1,530 m. (1 s para bajar y 1 s para subir.)

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.

Resonancia



FIGURA 20.11

La frecuencia natural de una campana más pequeña es mayor que la de la grande, y suena con un tono más alto.



FIGURA 20.12

Al impulsar el columpio al ritmo de su frecuencia natural, se produce una amplitud grande.

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 (pastilina) 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. Cuando se golpea uno de ellos, 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 con el diapasón, cada compresión da un impulso diminuto 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 con frecuencia *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. Entonces la radio resuena con una estación cada vez, en lugar de tocar todas las estaciones al mismo tiempo.

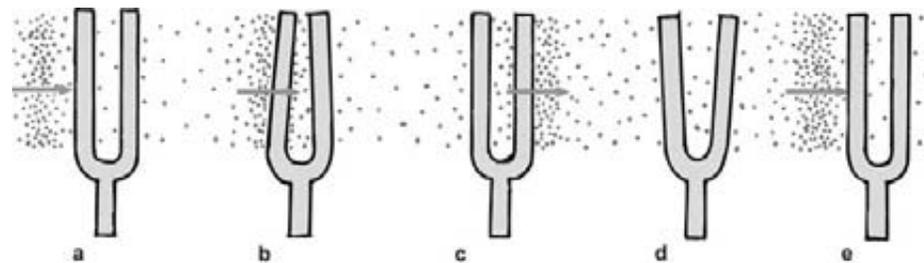


FIGURA 20.13

Etapas de la resonancia. (Las flechas indican que las ondas sonoras se propagan hacia la derecha. *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 un enrarecimiento llega, y *d*) continúa su movimiento en dirección contraria. Justo cuando regresa a su posición inicial *e*), al diapasón llega la siguiente compresión y se repite el ciclo. Ahora se flexiona más, debido a que se está moviendo.



FIGURA 20.14

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 fuerza moderada produjo una fuerza irregular, en resonancia con la frecuencia natural del puente, aumentando continuamente la amplitud de la vibración hasta que el puente se desplomó.



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. Más de un siglo después, la resonancia generada por el viento causó otro gran desastre en un puente (figura 20.14).

Los efectos de la resonancia están alrededor de nosotros. La resonancia acenúa no sólo el sonido de la música, sino también el color de las hojas en el otoño, la altura de las mareas oceánicas, la operación de los rayos láser, y una vasta multitud de fenómenos que le dan belleza al mundo que nos rodea.

Interferencia

Las ondas sonoras, como cualquier otra onda, pueden mostrar **interferencia**. Recuerda que en el último capítulo describimos la interferencia entre ondas. En la figura 20.15 se presenta una comparación de la interferencia en ondas transversales y en ondas longitudinales. En ambos casos, cuando las crestas de una onda se traslapan con las crestas de otra, se produce un incremento de amplitud. O bien, cuando la cresta de una onda se encima con el valle de otra, se produce menor amplitud. En el caso del sonido, la cresta de una onda corresponde a una compresión; y el valle a un enrarecimiento. La interferencia se produce en todas las ondas, ya sean transversales o longitudinales.

En la figura 20.16 vemos un caso interesante de interferencia acústica. Si estás a distancias iguales de dos altoparlantes que emiten tonos idénticos de frecuencia fija, el sonido será mayor porque se suman los efectos de ambos altoparlantes. Las compresiones y los enrarecimientos de los tonos llegan al mismo tiempo, o *en fase*. Sin embargo, si te mueves hacia un lado, para que las trayectorias de los altoparlantes hasta ti difieran media longitud de onda, entonces los enrarecimientos de un altoparlante se llenarán con las compresiones del otro. Eso es la interferencia destructiva. Es como si la cresta de una ola en el agua llenara

Everyday Physics *Tacoma Narrows Bridge*

Resonant effects can sometimes have disastrous consequences. In 1940 a new bridge across one of the arms of Puget Sound in the state of Washington was opened to traffic. It was a suspension bridge with a central span of 850 meters (2800 feet). Because the bridge was designed for two lanes, it had a width of only 12 meters (40 feet). Within a few months after it opened, early-morning winds in the Sound caused the bridge to oscillate in standing-wave patterns that were so large in amplitude that the bridge failed structurally and fell into the water below, as shown in the figure.

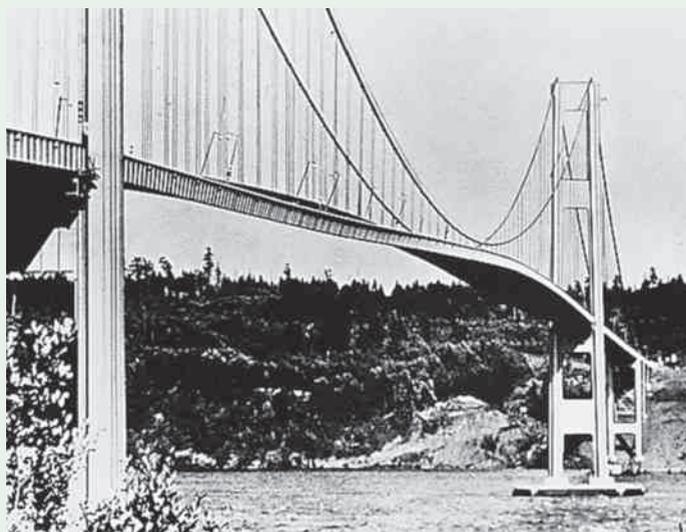
But why did this bridge fail when other suspension bridges are still standing (including the bridge that now spans the Sound at the location of the original)? The bridge was long, narrow, and particularly flexible. Motorists often complained about the vertical oscillations and nicknamed the bridge “Gallop Gertie.” However, the amplitudes of the vertical oscillations were relatively small until that fateful morning. The wind was blowing along the arm of the Sound (perpendicular to the length of the bridge) at moderate to high velocities but was not near gale force. One may speculate that fluctuations in the wind speed matched the natural frequency of the bridge, causing it to resonate. However, the wind was reasonably steady, and wind fluctuations are normally quite random. Furthermore, the forces would be horizontal, and the oscillations were vertical.

The best explanation involves the formation and shedding of vortices in the wind blowing past the bridge. *Vortices* are the eddies

that you get near the ends of the oars when you row a boat. Vortices rotate in opposite directions in the wind blowing over and under the bridge. As each vortex is shed, it exerts a vertical impulse on the bridge. Therefore, if the frequency of vortex formation and shedding is near the natural frequency of the bridge for vertical oscillations, a standing wave will form just like those on a guitar string. (The frequency does not have to match exactly; it only needs to be close. How close depends on the details of the bridge construction.)

The bridge would have been fine except for another unfortunate circumstance. Besides the vertical standing wave, there were also torsional, or twisting, standing waves on the bridge. Normally, the frequencies of the two standing waves are quite different. But for the Tacoma Narrows Bridge, the two frequencies were fairly close (eight per minute for the vertical motion compared with ten per minute for the twisting motion). This allowed some of the energy from the vertical motion to be transferred to the twisting motion that eventually led to the mechanical failure of the bridge.

1. What was the periodic driving force that caused the standing wave to be formed on the bridge?
2. What uncommon characteristic of the Tacoma Narrows Bridge ultimately led to its mechanical failure?



The Tacoma Narrows Bridge collapsed when winds set up resonant vibrations.

Special Collections Div., Univ. of Washington Libraries,
photo by Farquharson (both)

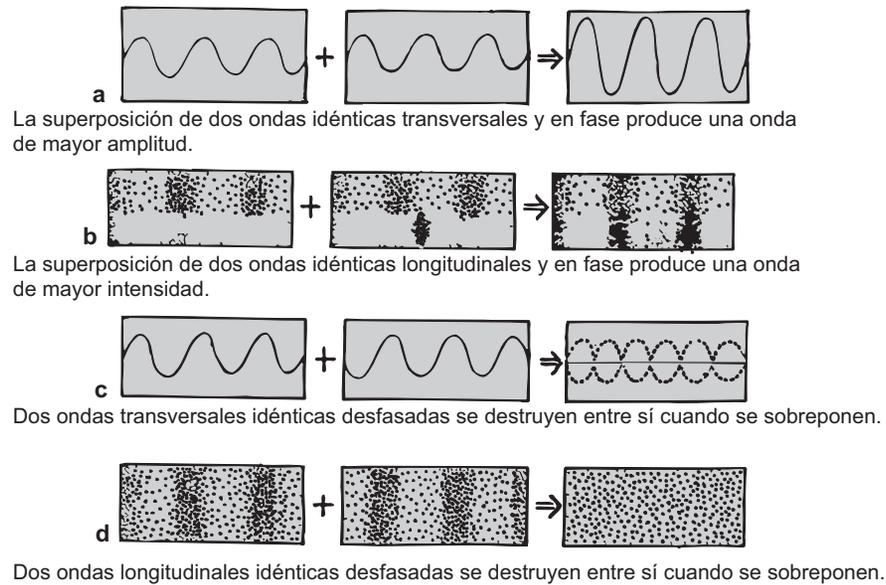
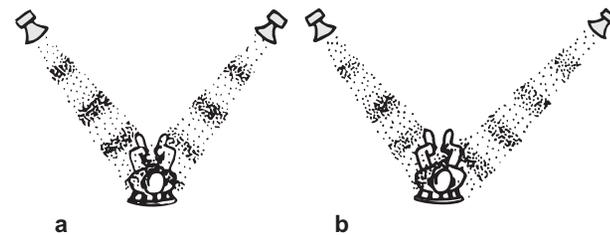


FIGURA 20.15 Interferencia constructiva (a, b) y destructiva (c, d) entre ondas transversales y longitudinales.

FIGURA 20.16 Interferencia de ondas sonoras. a) Las ondas llegan en fase y se interfieren constructivamente, cuando las longitudes de trayectoria desde las bocinas son iguales. b) Las ondas llegan fuera de fase y se interfieren destructivamente cuando las longitudes de trayectoria difieren en media (o en $3/2$, $5/2$, etc.) longitud de onda.



exactamente el valle de otra. Si el recinto con los altoparlantes no tiene superficies reflectoras ¡escucharás poco o nada de sonido!

Si las bocinas emiten toda una gama de sonidos con distintas frecuencias, sólo habrá algunas ondas que se interfieran destructivamente para determinada diferencia en longitudes de trayectoria. De manera que esa clase de interferencia no suele ser problema, porque normalmente hay suficiente reflexión del sonido como para llenar los puntos de anulación. Sin embargo, a veces los “puntos muertos” son evidentes en teatros o salas de concierto mal diseñados, donde las ondas sonoras se reflejan en las paredes y se interfieren con las ondas no reflejadas, produciendo zonas de baja amplitud. Si mueves la cabeza algunos centímetros en cualquier dirección notarás una diferencia considerable.

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 positivo 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 altoparlantes están bien conectados y en fase, ya que las ondas más largas se anulan por interferencia. Las ondas más cortas se anulan si las bocinas se acercan entre sí, y cuando un par de bocinas se ponen frente a

FIGURA 20.17

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 conexión y 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.



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.

La interferencia acústica destructiva es una propiedad que se usa en la *tecnología antirruído*. Unos micrófonos se instalan en dispositivos ruidosos, por ejemplo, los rotomartillos, 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 (o enrarecimientos) acústica(o)s del martillo se anulan con los enrarecimientos (o las 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 aeroplanos ahora son más silenciosas gracias a la tecnología antirruído.

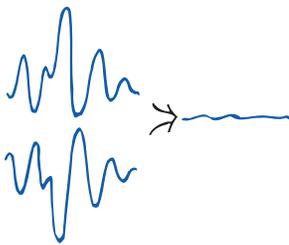


FIGURA 20.18

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



FIGURA 20.19

Ken Ford remolca planeadores en silenciosa comodidad cuando utiliza los audífonos antirruído.

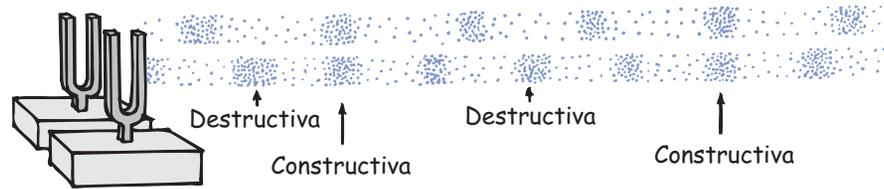
Pulsaciones



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, etcétera. A esta variación periódica de la intensidad del sonido se le llama **pulsaciones** y se debe a la interferencia. Golpea dos diapasones que no estén bien afinados y como 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

FIGURA 20.20

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



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.

Entenderemos mejor el trémolo si imaginamos el caso análogo de dos personas, de distinta estatura, que caminan lado a lado con trancos distintos. En algún momento conservarán el paso, y poco después lo perderán, después lo conservarán, y así sucesivamente. Imagina que una de ellas, quizá con piernas más largas, da exactamente 70 pasos en un minuto, y la persona más baja da 72 pasos en el mismo intervalo. La persona más baja da dos pasos más por minuto que la más alta. Si meditamos un poco veremos que guardarán momentáneamente el paso dos veces cada minuto. En general, si dos personas caminan juntas con ritmo distinto, la cantidad de veces que conservarán el paso en cada unidad de tiempo es igual a la diferencia entre las frecuencias de sus pasos. Eso también se aplica al par de diapasones. Si uno tiene 264 vibraciones por segundo, y el otro 262, dos veces cada segundo estarán en fase. Se escuchará una frecuencia de pulsación de 2 hertz. El tono general corresponderá a la frecuencia promedio, 263 hertz.



¿Por qué Hollywood insiste en reproducir sonidos de motores cuando las naves viajan en el espacio exterior? ¿Acaso no sería más dramático observarlas mientras flotan en silencio?

¡EUREKA!

EXAMÍNATE

¿Cuál será la frecuencia de pulsación cuando suenen juntos un diapason de 262 Hz y uno de 266 Hz? ¿Y uno de 262 Hz con otro de 272 Hz?

Si se enciman dos peines con distintos espacios entre los dientes, veremos una figura de *moiré*, que se parece a las pulsaciones (figura 20.21). La cantidad de pulsaciones por unidad de longitud será igual a la diferencia entre la cantidad de dientes por unidad de longitud, para los dos peines.

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. Te puedes ayudar con las pulsaciones para afinar diversos instrumentos musicales. Tan sólo escucha las

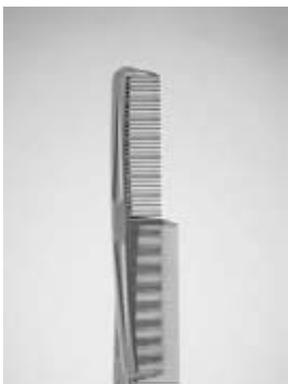


FIGURA 20.21

Las distancias desiguales entre los dientes de los dos peines producen una figura de moiré que corresponde a las pulsaciones con dos frecuencias parecidas.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Para los dos primeros diapasones, de 262 Hz y 266 Hz, se escucharán 264 Hz, que pulsarán a 4 Hz ($266 - 262$). Para los diapasones de 272 Hz y 262 Hz, se escucharán 267 Hz, y algunas personas escucharán que fluctúa 10 veces por segundo. Las frecuencias de pulsación mayores que 10 Hz son demasiado rápidas como para escucharlas con claridad.

EMISIÓN DE RADIO

Un radiorreceptor emite sonido, pero lo interesante es que no recibe ondas sonoras. Al igual que un aparato de TV, el radiorreceptor recibe *ondas electromagnéticas*, que en realidad son ondas luminosas de baja frecuencia. Estas ondas, que describiremos con detalle en la Parte Seis, difieren fundamentalmente de las ondas sonoras: ambas son de naturaleza diferente y sus frecuencias son extremadamente altas, mucho mayores que el límite de la audición humana.

Cada estación de radio tiene asignada una frecuencia, en la cual emite sus programas. La onda electromagnética que se trasmite a esa frecuencia es la *onda portadora*. La señal acústica con frecuencia relativamente baja que se va a comunicar se sobrepone a la onda portadora, de frecuencia mucho mayor, en dos formas principales: mediante pequeñas variaciones en la amplitud que coinciden con la audiofrecuencia, o mediante pequeñas variaciones de frecuencia. Esta impresión de la onda sonora sobre la onda de radio, de mayor frecuencia, es la *modulación*. Cuando se modula la *amplitud* de la onda portadora, se trata de la banda de AM, *amplitud modulada*. Las

estaciones de AM emiten entre los 535 y 1,605 kilohertz. Cuando se modula la *frecuencia* de la onda portadora, la banda se llama de FM, o *frecuencia modulada*. Las estaciones de FM transmiten entre los límites de 88 a 108 megahertz de frecuencia, bastante mayores que la AM. La modulación de amplitud es como cambiar rápidamente la luminosidad de una lámpara de color constante. La modulación de frecuencia es como cambiar rápidamente el color de una lámpara de luminosidad constante.

El hecho de girar la perilla de un radiorreceptor para seleccionar determinada estación es como ajustar masas móviles en las ramas de un diapasón, para hacerlo resonar con el sonido producido por otro diapasón. Al seleccionar una estación de radio ajustas la frecuencia de un circuito eléctrico dentro del aparato, para que coincida y resuene con la energía de la estación que deseas. Así, seleccionas una onda portadora entre muchas. Entonces, la señal impresa del sonido se separa de la onda portadora, se amplifica y se envía al altoparlante. ¡Lo bueno es que se escucha una sola estación a la vez!

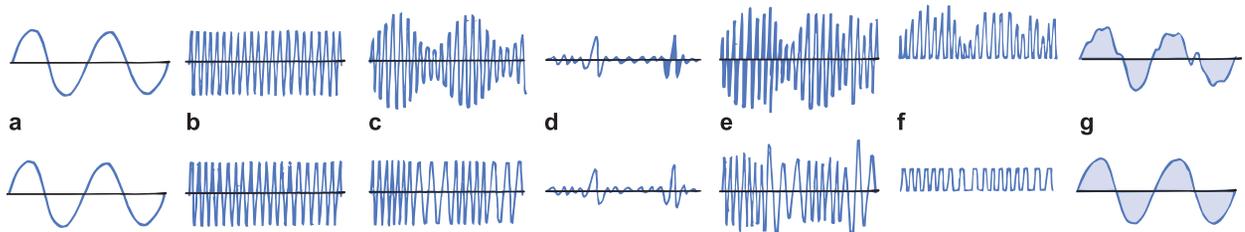


FIGURA 20.22

Señales de radio de AM y FM. a) Ondas sonoras que entran a un micrófono. b) Onda portadora de radiofrecuencia producida por el transmisor, sin señal de sonido. c) Onda portadora modulada por la señal. d) Interferencia por estática. e) Onda portadora y de señal afectada por la estática. f) El radiorreceptor recorta la mitad negativa de la onda portadora. g) La señal que queda es áspera en la AM, por la estática, pero es nítida para la FM, ya que los picos de la onda de interferencia se recortan sin pérdida de señal.

pulsaciones entre el tono de tu instrumento y la nota estándar producida por un piano o por algún otro instrumento.

Los delfines utilizan las pulsaciones para reconocer los movimientos de las cosas que los rodean. Cuando un delfín envía señales sonoras, se pueden producir pulsaciones cuando los ecos que recibe se interfieren con el sonido que manda. Cuando no hay movimiento relativo entre el delfín y el objeto que regresa el sonido, las frecuencias de emisión y de recepción son iguales, y no se producen pulsaciones. Pero cuando hay movimiento relativo, el eco tiene una frecuencia distinta por el efecto Doppler, y se producen pulsaciones cuando se combinan el eco y el sonido emitido. El mismo principio se aplica en las pistolas de radar que usa la policía. Las pulsaciones entre la señal que se manda y la que se refleja se usan para determinar con qué rapidez se mueve el automóvil que reflejó la señal.

EXAMÍNATE

¿Es correcto decir que en todos los casos, sin excepción, una onda de radio se propaga más rápidamente que una onda sonora?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sí, porque todas las ondas de radio se propagan con la rapidez de la luz. Una onda de radio es una onda electromagnética; en un sentido muy real es una onda luminosa de baja frecuencia (o se puede decir que ¡la onda luminosa es una onda de radio de alta frecuencia!). Una onda sonora, por otro lado, es una perturbación mecánica que se propaga a través de un medio material, por partículas materiales que vibran entre sí. En el aire, la rapidez del sonido es de unos 340 m/s, más o menos la millonésima parte de la rapidez de una onda de radio. El sonido se propaga con más rapidez en otros medios; pero en ningún caso a la rapidez de la luz. Ninguna onda sonora puede propagarse tan rápido como la luz.

Resumen de términos

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

Frecuencia natural Frecuencia a la cual naturalmente tiende a vibrar un objeto elástico, si se le perturba y se le quita la fuerza perturbadora.

Infrasónico Describe un sonido que tiene una frecuencia demasiado baja como para que la escuche el oído humano común.

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

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.

Rarefacción Región enrarecida, o región de menor presión, en el 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.

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

Reverberación Persistencia de un sonido, como el eco, debido a reflexiones múltiples.

Ultrasónico Describe un sonido que tiene una frecuencia demasiado alta como para que la escuche el oído humano común.

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

Lectura sugerida

Chiaverina, Chris y Tom Rossing. *Light Science: Physics for the Visual Arts*. Nueva York: Springer, 1999. Se trata

de un interesante escrito acerca de los dos físicos de la página 380 que juegan con el sonido.

Preguntas de repaso

1. ¿Cómo suele definir un físico el sonido?

Origen del sonido

2. ¿Cuál es la relación entre *frecuencia* y *tono*?
3. En una persona joven, ¿cuál es el intervalo promedio de audición?
4. Describe la diferencia entre las ondas sonoras *infrasónicas* y las *ultrasónicas*.

Naturaleza del sonido en el aire

5. Describe la diferencia entre una *compresión* y un *enrarecimiento*.
6. ¿Las compresiones y los enrarecimientos se propagan en la misma dirección que una onda? Proporciona evidencias para apoyar tu respuesta.

Medios que transmiten el sonido

7. En relación con los sólidos y los líquidos, ¿qué lugar ocupa el aire como conductor del sonido?
8. ¿Por qué el sonido no se propaga por el vacío?

Rapidez del sonido en el aire

9. ¿De qué factores depende la rapidez del sonido? ¿Cuáles son algunos factores de los cuales *no* depende la rapidez del sonido?
10. ¿Cuál es la rapidez del sonido en el aire seco a 0 °C?
11. ¿El sonido se propaga con más rapidez en el aire cálido que en el aire frío? Defiende tu respuesta.

Reflexión del sonido

12. ¿Qué es el *eco*?
13. ¿Qué es una *reverberación*?

Refracción del sonido

14. ¿Cuál es la causa de la refracción?
15. ¿El sonido tiende a desviarse hacia arriba o hacia abajo, cuando su rapidez es menor cerca del suelo?
16. ¿Por qué a veces el sonido se refracta bajo el agua?

Energía en las ondas sonoras

17. ¿Qué suele ser mayor, la energía en el sonido ordinario o la energía en la luz ordinaria?
18. A final de cuentas, ¿cuál es el destino de la energía del sonido en el aire?

Vibraciones forzadas

19. ¿Por qué suena más fuerte un diapasón cuando se golpea sujetándolo contra una mesa?

Frecuencia natural

20. Menciona al menos dos factores que determinen la frecuencia natural de un objeto.

Resonancia

21. ¿Qué tienen que ver las vibraciones forzadas con la resonancia?
22. Cuando escuchas tu radio, ¿por qué sólo escuchas una estación a la vez, y no todas al mismo tiempo?
23. ¿Cómo la resonancia generada por el viento afectó el Puente Tacoma Narrows en Washington, en 1940?

Interferencia

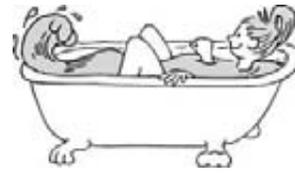
24. ¿Cuándo es posible que una onda anule a otra?
25. ¿Qué clase de ondas pueden mostrar interferencia?

Pulsaciones

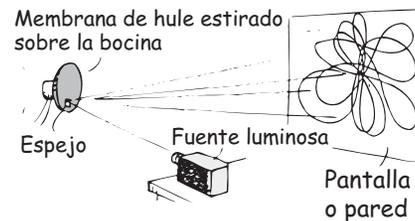
26. ¿Qué fenómeno físico es básico en la producción de pulsaciones?
27. ¿Qué frecuencia de pulsación se producirá cuando se hacen sonar al unísono fuentes de 370 Hz y 374 Hz?
28. ¿En qué difiere una onda de radio de una onda sonora?

Proyectos

1. En la tina de baño, sumerge la cabeza y escucha el sonido que haces cuando chasqueas las uñas o golpeas la tina bajo el agua. Compara el sonido con el que haces cuando la fuente y los oídos están sobre el agua. A riesgo de mojar el piso, deslízate hacia adelante y hacia atrás dentro de la tina con distintas frecuencias, y observa cómo la amplitud de las olas crece con rapidez cuando te deslizas al ritmo de las olas. (¡Haz esta práctica cuando estés solo en la tina!)



2. Estira un globo, no mucho, y colócalo sobre una bocina de radio. Pega un trozo pequeño, muy ligero, de espejo, papel de aluminio o de metal pulido cerca de una orilla. Ilumina el espejo con un haz de luz estrecho, mientras esté tocando tu música favorita, y observarás las bellas figuras que se reflejan en la pantalla o en la pared.



Ejercicios

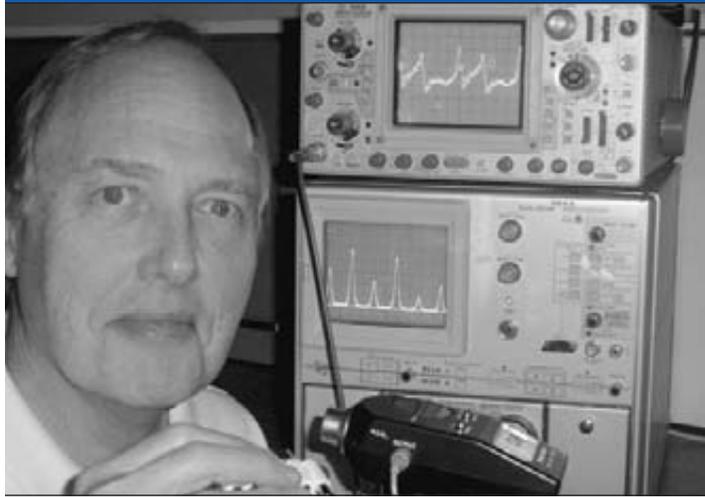
1. ¿Por qué no escuchas el sonido de los fuegos artificiales distantes, sino hasta después de que los viste?
2. ¿Si la Luna explotara por qué no escucharíamos la detonación?
3. ¿Por qué sería vano el intento de detectar sonidos de otros planetas, incluso si se contara con los mejores detectores de sonido?
4. Lanza una piedra al agua inmóvil y se formarán círculos concéntricos. ¿Qué forma tendrán las ondas, si la piedra se lanza cuando el agua fluye uniformemente?
5. ¿Por qué zumban las abejas al volar?
6. 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?
7. ¿Qué quiere decir que una estación de radio está “en el 101.1 de su radio FM”?
8. El sonido de la fuente A tiene el doble de frecuencia que el sonido de la fuente B. Compara las longitudes de las ondas sonoras de las dos fuentes.
9. Imagina que una onda sonora y una onda electromagnética tuvieran la misma frecuencia. ¿Cuál tendría la mayor longitud de onda?

10. ¿Qué sucede con la longitud de onda del sonido conforme se incrementa la frecuencia?
11. En los arrancadores de una pista de atletismo, observas el humo de la pistola de arranque antes de oír el disparo. Explica por qué.
12. 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?
13. Cuando una onda sonora pasa por un punto en el aire, ¿hay cambios de la densidad del aire en ese punto? Explica 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 está todo 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?
21. ¿Por qué el sonido se propaga con más rapidez en aire cálido?
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 rapidezces promedio de las moléculas de H_2O con las de las rapidezces de N_2 y de O_2 ?)
23. ¿Sería posible la refracción del sonido, si la rapidez de éste no se afectara con el viento, la temperatura y otras condiciones? Defiende tu respuesta.
24. ¿Por qué se puede sentir la vibración del suelo lejos de una explosión, antes que se oiga el sonido de ésta?
25. ¿Qué clase de condiciones de viento harían que el sonido se escuchara con más facilidad a grandes distancias? ¿Y con menos facilidad a grandes distancias?
26. Las ondas ultrasónicas tienen muchas aplicaciones en la tecnología y en la medicina. Una de sus ventajas es que se pueden usar grandes intensidades sin dañar los oídos. Menciona otra ventaja debida a su corta longitud de onda. (*Sugerencia:* ¿por qué los microscopistas usan luz azul y no roja para ver con mayor detalle?)
27. ¿Por qué el eco es más débil que el sonido original?
28. Si la distancia a la que se encuentra un clarín se triplicara, ¿por qué factor disminuiría la intensidad del sonido? Supón que el sonido no se ve afectado por reflexiones.
29. ¿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?
30. 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? Defiende tu respuesta.
31. Si una sola perturbación a cierta distancia manda ondas transversales y longitudinales al mismo tiempo, que se propagan con rapidezces bastante distintas en el medio, por ejemplo, en el suelo durante un terremoto, ¿cómo se podría determinar la distancia a la perturbación?
32. ¿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?
33. ¿Por qué los soldados rompen filas al cruzar por un puente?
34. ¿Por qué el sonido de un arpa es suave en comparación con el de un piano?
35. Los habitantes de los edificios de apartamentos son testigos de que las notas bajas se escuchan mejor cuando suena la música en los apartamentos más cercanos. ¿Por qué crees que los sonidos de menor frecuencia atraviesan con más facilidad las paredes, los pisos y los techos?
36. 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.
37. 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?
38. ¿Por qué un tablado de danza sólo se mueve cuando se ejecutan ciertos pasos de baile?
39. Un par de altavoces colocados a ambos lados de un escenario emiten tonos puros idénticos (tonos de

una frecuencia fija y con una longitud de onda fija en el aire). Cuando uno se sitúa en el pasillo central, a igual distancia de ambos altavoces, el sonido se escucha fuerte y claro. ¿Por qué la intensidad del sonido disminuye considerablemente cuando uno se coloca más cerca de un lado? *Sugerencia:* utiliza un diagrama para hacer tu planteamiento.

40. 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.
 41. Cuando un par de altoparlantes fuera de fase se acercan como se ve en la figura 20.17, ¿cuáles ondas son las que más se anulan, las largas o las cortas? ¿Por qué?
 42. ¿Cómo cierta nota emitida por un cantante puede provocar que se rompa un vaso de cristal?
 43. Un objeto resuena cuando la frecuencia de una fuerza vibratoria coincide con su frecuencia natural, o es un submúltiplo de esa frecuencia. ¿Por qué no resuena con múltiplos de su frecuencia natural? (Imagina que impulsas a un niño en un columpio.)
 44. ¿Las pulsaciones son el resultado de la interferencia, o del efecto Doppler, o de ambos?
 45. ¿Es posible decir, sin temor a equivocarse, que las pulsaciones de sonido son lo mismo que los “ritmos” de la música? Argumenta tu respuesta.
 46. Dos ondas sonoras de la misma frecuencia pueden interferir, pero para producir pulsaciones, las dos ondas sonoras deben tener distintas frecuencias. ¿Por qué?
 47. 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 el mismo paso?
 48. 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?
 49. Un afinador de pianos que utiliza un diapasón de 264 Hz escucha cuatro pulsaciones por segundo. ¿Cuáles son las dos frecuencias de vibración posibles de la cuerda del piano?
 50. Un ser humano no puede escuchar un sonido con 100 kHz de frecuencia, ni uno de 102 kHz. Pero si entra en un recinto donde haya dos fuentes que emiten ondas sonoras, una a 100 kHz y otra a 102 kHz, sí escuchará un sonido. Explica por qué.
- ## Problemas
1. ¿Cuál es la longitud de onda de un tono de 340 Hz en el aire? ¿Cuál es la longitud de una onda ultrasónica de 34,000 Hz en el aire?
 2. 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. ¿Cuál es la longitud de una onda característica T cuya frecuencia es 7 Hz? (La rapidez del sonido en el agua de mar es 1,530 m/s.)
 3. Un barco-sonda explora el fondo del mar con ondas ultrasónicas que se propagan a 1,530 m/s en el agua. ¿Qué profundidad tiene el agua directamente abajo del barco, si el tiempo entre la salida de la señal y el regreso del eco es de 6 segundos?
 4. Un murciélago, al volar en una caverna, emite un sonido y recibe el eco 0.1 s después. ¿A qué distancia está la pared de la caverna?
 5. Te fijas en una persona a lo lejos que está clavando tachuelas en el vestíbulo de su casa, dando un golpe por segundo. Escuchas el sonido de los golpes exactamente en sincronía con cada golpe del martillo. Y después que termina de martillar, escuchas un golpe de más. ¿A qué distancia está esa persona?
 6. 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 ocho horas después, y lo despierta. ¿A qué distancia está la montaña?
 7. Dos bocinas se conectan para emitir sonidos idénticos al unísono. La longitud de onda de los sonidos en el aire es 6 m. ¿Los sonidos interfieren constructiva o destructivamente, si está a una distancia de a) 12 m frente a las bocinas? b) 9 m de ambas bocinas? c) 9 m de una bocina y 12 m de la otra?
 8. ¿Cuál es la frecuencia del sonido emitido por las bocinas del problema anterior? ¿Es de un tono grave o de uno agudo, en relación con el rango de audición del oído humano?
 9. Una marsopa emite un sonido a 57 Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de este sonido en el agua, donde la rapidez del sonido es de 1,500 m/s?
 10. ¿Qué frecuencias de pulsaciones se pueden obtener con diapasones cuyas frecuencias sean de 256, 259 y 261 Hz?

Sonidos musicales



Norm Whitlatch muestra los primeros cinco armónicos (en azul) de un análisis de Fourier del sonido que produce un afinador de guitarra y que se describe en la gráfica del osciloscopio en la parte superior (en verde). (Véase la sección a color al final del libro)

La mayor parte 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 su vez por una vibración irregular en nuestro entorno. El sonido de la música es distinto; tiene tonos periódicos o “notas” musicales. Aunque el ruido no tiene esas características, la frontera entre la música y el ruido es tenue y subjetiva. Y para algunos compositores contemporáneos, tal frontera no existe.

Algunos consideran que la música contemporánea y la de otras culturas es ruido. La diferencia entre esas clases de música y el ruido constituye un problema de estética. Sin embargo, no hay dificultad para diferenciar el ruido de la música tradicional, es decir, de la música clásica occidental y la mayor parte de la música popular. Una persona que ha perdido por completo el oído puede hacer la distinción usando un osciloscopio. Recuerda que en la figura 20.5 vimos que cuando una señal proveniente de un micrófono llega al osciloscopio, se describe el patrón que producen las variaciones en la presión del aire respecto al tiempo, y en esas imágenes se distinguen claramente el ruido y la música tradicional (figura 21.1).

Los músicos comúnmente hablan de los tonos musicales en términos de tres características principales: altura, volumen y calidad.

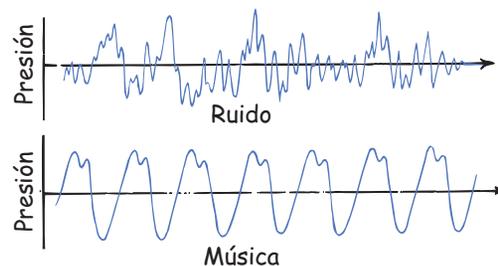


FIGURA 21.1

Representaciones gráficas del ruido y de la música.

Altura

La **altura** de un sonido se relaciona con su frecuencia. La mayor parte de los sonidos están formados por varias frecuencias, y la altura corresponde al componente con frecuencia más baja. Las vibraciones rápidas (de alta frecuencia) de la fuente sonora producen una nota alta, mientras que las lentas (de baja frecuen-

cia) producen una nota baja. La altura de un sonido se refiere a la posición de éste en la escala musical. Cuando en un piano se toca el “la natural”, un martinete golpea dos o tres cuerdas, cada una de las cuales vibra 440 veces en un segundo. La altura del “la natural” corresponde a 440 hertz.¹

Las diversas notas musicales se obtienen cambiando la frecuencia de la fuente sonora que vibra. Por lo general, esto se logra alterando el tamaño, la tensión o la masa del objeto que vibra. Por ejemplo, un guitarrista o un violinista ajusta la tensión de las cuerdas del instrumento cuando lo afina. Después, podrá tocar distintas notas alterando la longitud de cada cuerda “deteniéndola” con los dedos.

En los instrumentos de viento, la longitud de la columna de aire en vibración se puede alterar —como en el trombón o en la trompeta—, o bien, existen agujeros al lado del tubo, que se abren y se cierran en diversas combinaciones —como en el saxofón, el clarinete o la flauta— y así se modifica la altura de la nota producida.

Los sonidos musicales altos tienen casi siempre menos de 4,000 hertz, pero el oído humano promedio puede captar sonidos con frecuencias de hasta de 18,000 hertz. Algunas personas son capaces de escuchar tonos más altos, al igual que la mayoría de los perros. En general, el límite superior de audición en las personas disminuye al aumentar la edad. Es común que una persona mayor no escuche un sonido alto, mientras que un individuo más joven logra escucharlo con claridad. Por eso, para cuando tus finanzas te permitan comprar un equipo de alta fidelidad, tal vez ya no puedas apreciar la diferencia.



Intensidad y sonoridad del sonido



Los protectores de oídos normalmente reducen el sonido en unos 30 dB.

¡EUREKA!

La **intensidad** del sonido depende de la amplitud de las variaciones de la presión en la onda sonora. (Al igual que en todas las ondas, la intensidad es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.) La intensidad se mide en watts/metro². El oído humano responde a intensidades que abarcan el amplio intervalo que va desde 10^{-12} W/m² (el umbral de la audición) hasta más de 1 W/m² (el umbral del dolor). Por ser tan grande ese intervalo, las intensidades se escalan en factores de 10, y a la intensidad de 10^{-12} W/m² —que apenas es perceptible y que se considera la intensidad de referencia— se le asigna 0 *bel* (una unidad a la que se dio ese nombre en honor de Alexander Graham Bell). Un sonido 10 veces más intenso que éste tiene 1 *bel* de intensidad (10^{-11} W/m²) o 10 *decibeles*. En la tabla 21.1 aparece una lista de sonidos frecuentes con sus intensidades.

Un sonido de 10 decibeles es 10 veces más intenso que uno de 0 decibeles, que es el umbral de la audición. De acuerdo con esto, 20 decibeles es 100 veces, o 10^2 veces, la intensidad del umbral de audición; 30 decibeles es 10^3 veces el umbral de la audición y 40 decibeles es 10^4 veces del umbral. Entonces 60 decibeles representan una intensidad sonora un millón (10^6) de veces mayor que 0 decibeles; 80 decibeles representan 10^2 la intensidad de 60 decibeles.²

Cuando el nivel llega a 85 decibeles hay riesgo de sufrir daños fisiológicos en la audición, y el grado de daño depende de las características de tiempo de exposición y la frecuencia. Los daños provocados por sonidos fuertes pueden ser temporales o permanentes, según se dañen o se destruyan los órganos de Corti, que son los receptores del oído interno. Un solo impulso de sonido podría generar en



¹ Es interesante hacer notar que el “la natural” varía desde 436 Hz hasta 448 Hz en distintas orquestas sinfónicas.

² La escala de decibeles es una escala logarítmica. El valor en decibeles es proporcional al logaritmo de la intensidad.

TABLA 21.1
Fuentes frecuentes de sonido y sus intensidades

| Fuente del sonido | Intensidad (W/m ²) | Nivel de sonido (dB) |
|--|--------------------------------|----------------------|
| Avión a reacción a 30 m de distancia | 10 ² | 140 |
| Sirena de ataque aéreo, cercana | 1 | 120 |
| Música en reproductor de discos, amplificada | 10 ⁻¹ | 115 |
| Remachado | 10 ⁻³ | 100 |
| Tráfico intenso | 10 ⁻⁵ | 70 |
| Conversación en casa | 10 ⁻⁶ | 60 |
| Radio con bajo volumen en casa | 10 ⁻⁸ | 40 |
| Susurro | 10 ⁻¹⁰ | 20 |
| Murmullo de las hojas | 10 ⁻¹¹ | 10 |
| Umbral de la audición | 10 ⁻¹² | 0 |



FIGURA 21.2
 James hace que se despliegue una señal sonora en el osciloscopio.

esos órganos vibraciones suficientemente intensas como para romperlos. Un ruido menos intenso, pero fuerte, podría interferir con los procesos celulares en esos órganos y dañarlos. Por desgracia, las células de esos órganos no se regeneran.

La intensidad de un sonido es un atributo totalmente objetivo y físico de una onda sonora, y se mide con diversos instrumentos acústicos (y con un osciloscopio como el de la figura 21.2). Por otra parte, la **sonoridad** o el **volumen** es una sensación fisiológica. El oído percibe ciertas frecuencias mucho mejor que otras. Por ejemplo, para la mayoría de las personas, un sonido de 3,500 Hz a 80 decibeles parece sonar el doble de fuerte que uno de 125 Hz a 80 decibeles. Los humanos son más sensibles al rango de frecuencias de 3,500 Hz. Los sonidos más fuertes que podemos tolerar tienen intensidades un billón de veces mayores que los sonidos más débiles. Sin embargo, la diferencia en la sonoridad que se percibe es mucho menor que esta cantidad.

EXAMÍNATE

¿Se daña la audición en forma permanente al asistir a conciertos, clubes o presentaciones donde se toca música con volumen muy alto?

Calidad



No tenemos problemas para distinguir entre la nota de un piano y una de la misma altura de un clarinete. Cada uno de esos tonos tiene un sonido característico que difiere en **calidad** o timbre. La mayor parte 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 fundamen-

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sí, dependiendo de qué tan fuerte, por cuánto tiempo, qué tan cerca y con qué frecuencia. Algunos grupos musicales se fijan más en el volumen que en la calidad. En forma trágica, conforme el oído se daña cada vez más, los miembros del grupo (y sus admiradores) requieren sonidos cada vez más fuertes para estimularse. La pérdida auditiva causada por los sonidos es muy común en el intervalo de frecuencias de 2,000 a 5,000 Hz. En general, la audición humana es más sensible alrededor de los 3,000 Hz.

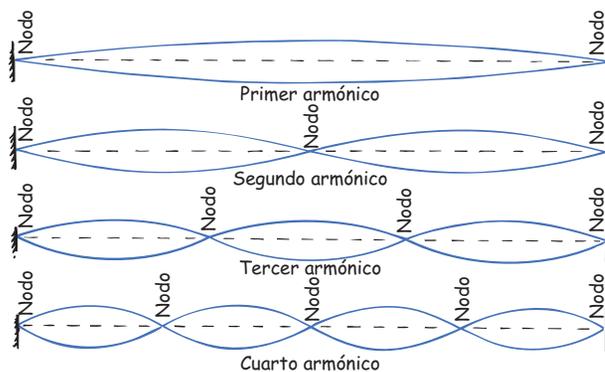


FIGURA 21.3
Modos de vibración de una cuerda de guitarra.



tal 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 21.3).³ 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. Los sintetizadores electrónicos producen tonos puros y la mezcla de ellos produce 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.

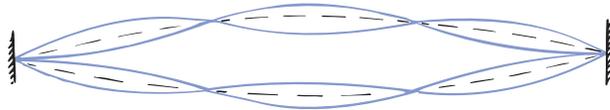


FIGURA 21.4
Vibración compuesta por el modo fundamental y el tercer armónico.

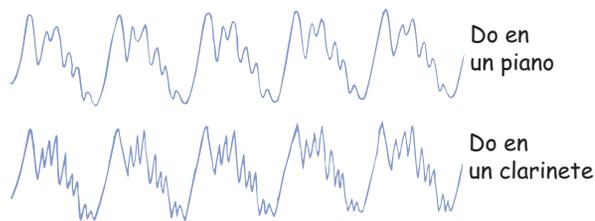


FIGURA 21.5
Los sonidos del piano y del clarinete difieren en su timbre.

³ En la terminología que se usa en música, al segundo armónico se le llama primer *sobretono*, al tercer armónico, segundo *sobretono*, y así sucesivamente.

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. Éste es un factor importante en la afinación de los pianos, y se presenta porque la rigidez de las cuerdas aporta una pequeña fuerza de restitución a la tensión.

Instrumentos musicales

Los instrumentos musicales convencionales se clasifican en tres categorías: los que producen el sonido con cuerdas vibratorias; los que lo producen mediante columnas de aire vibratorias, y aquellos en los que el sonido se genera por *percusión*, que es la vibración de una superficie bidimensional.

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 de longitud, o aumentando la longitud del tubo.⁴ 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 de la superficie. Los cambios de altura se producen modificando la tensión de la superficie vibratoria; una forma de lograrlo es 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 lugar de cuerdas que frotar, pulsar o golpear, o de lengüetas sobre las que se debe soplar aire, o de diafragmas que se deben golpear para producir los sonidos, en algunos instrumentos electrónicos se usan los electrones para generar las señales que forman los sonidos emitidos. Otros comienzan con el sonido de un instrumento acústico y lo modifican. La música electrónica requiere que el compositor y el ejecutante tengan vastos conocimientos de musicología, pues constituye una herramienta nueva y poderosa en las manos del músico.



Análisis de Fourier

¿Viste alguna vez de cerca a los surcos de un antiguo disco fonográfico, del tipo de los que tenían los abuelitos? Las variaciones en su anchura, que se aprecian en

⁴ Un clarín no tiene válvulas ni longitud variable. Quien lo toca debe saber cómo crear distintos sobretonos para obtener distintas notas.



FIGURA 21.6
Una vista microscópica de los surcos de un disco fonográfico.



la figura 21.6, hacen vibrar a la aguja del fonógrafo (estilete) que se desliza por los surcos. A su vez, estas vibraciones mecánicas se transforman en vibraciones eléctricas, y producen el sonido del disco. ¿No es sorprendente que todas las vibraciones diferentes que salieron de los diversos instrumentos de una orquesta estén capturadas en el surco de un disco? El sonido de un oboe impreso en el surco de un disco, tal y como se despliega en la pantalla de un osciloscopio, aparece en la figura 21.7a. Esta onda corresponde a la señal eléctrica producida por la aguja en vibración. También corresponde a la señal amplificada que activa la bocina del sistema de sonido, y a la amplitud del aire que vibra contra el tímpano. En la figura 21.7b se observa la onda del sonido de un clarinete. Cuando un oboe y un clarinete se tocan juntos, se hace evidente el principio de superposición, pues las ondas individuales se combinan para producir la onda que se ve en la figura 21.7c.

La forma de la onda de la figura 21.7c es el resultado neto de sobreponer (interferir) las ondas con las formas *a* y *b*. Si conocemos *a* y *b*, es sencillo obtener *c*. Pero un problema muy distinto es descomponer *c* en las ondas *a* y *b* que la constituyen. Si sólo se observa *c*, no se es posible separar el oboe del clarinete.

Pero si se reproduce el disco en el fonógrafo, de inmediato se sabe qué instrumentos participan, qué notas se tocan y cuáles son sus sonoridades relativas. Los oídos descomponen la señal total en sus componentes de forma automática.

Joseph Fourier, matemático francés, descubrió en 1822 una regularidad matemática de las partes que integran un movimiento ondulatorio periódico. Encontró que hasta el movimiento ondulatorio periódico más complejo se puede descomponer en ondas senoidales sencillas que se suman. Una onda senoidal es la más



Evidencia reciente confirma que los loros, al igual que los humanos, utilizan su lengua para producir y dar forma al sonido. Leves cambios en la posición de la lengua de un loro producen grandes diferencias en el sonido que se genera en la siringe, el órgano vocal que se encuentra entre la tráquea y los pulmones.

¡EUREKA!

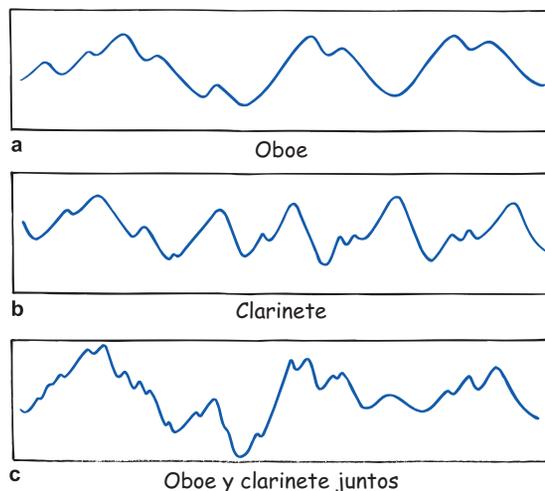


FIGURA 21.7
Formas de las ondas de *a*) un oboe, *b*) un clarinete y *c*) el oboe y el clarinete tocando juntos.

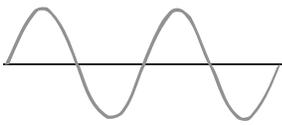


FIGURA 21.8
Una onda senoidal.



FIGURA 21.9
¿Todos los oyentes escuchan la misma música?

sencilla de las ondas y tiene una sola frecuencia (figura 21.8). 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, mediante ese 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 4,200 hertz, pero 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 automático de Fourier. 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.



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

¡EUREKA!

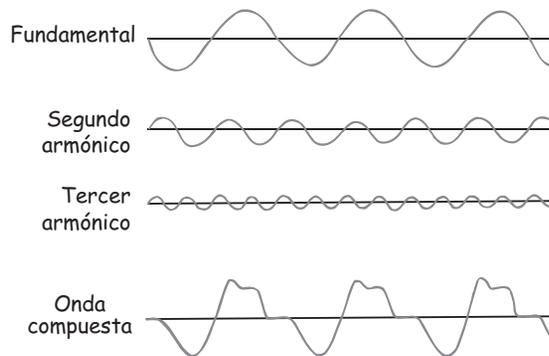


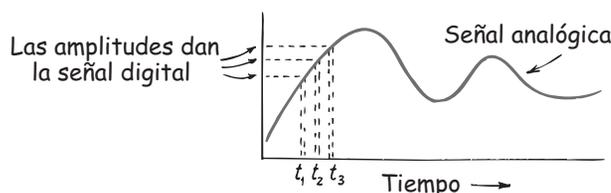
FIGURA 21.10
El tono fundamental y sus armónicos se combinan para producir una onda compuesta.

Discos compactos

Los discos de fonógrafo o tornamesa del pasado requerían de una aguja convencional que los hacía vibrar al deslizarse por los tortuosos surcos, y su tamaño era el doble del diámetro de los discos compactos (CD) de la actualidad. La salida de los discos de fonógrafo era una señal como las que aparecen en la figura 21.7. Este tipo de onda continua se llama señal *analógica* y puede transformarse en una señal *digital* midiendo el valor numérico de su amplitud cada fracción de segundo

FIGURA 21.11

La amplitud de la forma de onda analógica se mide en instantes sucesivos para obtener información digital, que se graba en forma binaria sobre la superficie reflectora del disco láser.



(figura 21.11). Este valor numérico se expresa en un sistema numérico adecuado para las computadoras, que se llama *binario*. En el código binario, cualquier número se puede expresar como una sucesión de unos y ceros; por ejemplo, el número 1 es 1, el 2 es 10, el 3 es 11, el 4 es 100, el 5 es 101, el 17 es 10001, etcétera. Así, es posible traducir la forma de la onda analógica a una serie de impulsos de “encendido” y “apagado” que equivalen a una serie de unos y ceros en código binario. Aquí es donde entra el disco compacto láser o CD.

Los reproductores digitales de CD utilizan un rayo láser que se dirige hacia el disco de plástico reflector, que tiene una serie de agujeros microscópicos (o *pits*). Estos últimos miden apenas 1/30 del diámetro de un cabello humano (figura 21.12). Cuando el rayo láser incide sobre una parte plana de la superficie reflectora, se refleja directamente hacia el sistema óptico del reproductor; así se obtiene un impulso “encendido”. Cuando el rayo incide sobre un agujero que pasa, al sensor óptico llega una fracción muy pequeña de él y entonces se obtiene un impulso de “apagado”. Una serie de impulsos “encendido” y “apagado” generan los dígitos “uno” y “cero” del código binario.

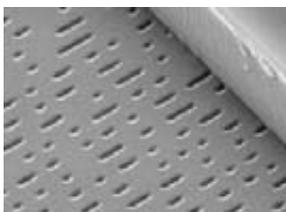


FIGURA 21.12

Una vista microscópica de los agujeros (o *pits*) de un disco láser.

La rapidez con la que se reconocen esos agujeros diminutos en el CD es de 44,100 veces por segundo. Si se pudieran reunir todos esos diminutos agujeros sin traslaparlos, tendrían el tamaño del punto al final de esta oración. Miles de millones de bits de información están codificados en una superficie reflectora, que a su vez se cubre con una capa protectora de plástico transparente.

Discos digitales de video (DVD) del mismo tamaño que los CD tienen 6 veces la capacidad para almacenar información de estos últimos, es decir, 4.7 GB frente a 700 MB. Los DVD tienen agujeros más pequeños, lo que, en efecto, hace que la longitud de la pista espiral tenga más del doble de largo que una de un CD. Los diminutos agujeros del DVD se leen con una luz láser de longitud de onda más corta y también por medio de lentes de enfoque más potentes. Mientras que los agujeros en un CD se encuentran en una sola superficie reflectante, un DVD tiene múltiples capas. Mediante un enfoque de precisión, la luz láser lee los agujeros en la capa deseada.

Habrà que estar pendientes del lanzamiento del reproductor DVD de láser azul. La longitud de onda más corta de la luz azul lee todavía más agujeros almacenados en un disco. Esta característica dará por resultado la disponibilidad de DVD de alta definición (HD), que permitirán reproducir imágenes extraordinariamente definidas.

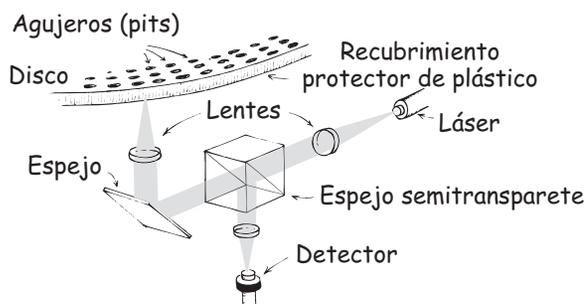


FIGURA 21.13

Un rayo láser enfocado con precisión lee la información digital representada por una serie de agujeros en el disco láser.

Resumen de términos

Altura La agudeza o gravedad (“alto” o “bajo”) de un tono, como en una escala musical, determinada principalmente por la frecuencia. Una fuente que vibra con alta frecuencia produce un sonido alto o agudo; una fuente vibratoria con baja frecuencia produce un sonido bajo o grave.

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

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.

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

Frecuencia fundamental La frecuencia más baja de vibración, o primer armónico, en un tono musical.

Intensidad La potencia por metro cuadrado que porta una onda sonora; a menudo se mide en decibeles.

Sonoridad La sensación fisiológica relacionada directamente con la intensidad del sonido o volumen.

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*.

Preguntas de repaso

1. Describe la diferencia entre ruido y música.
2. ¿Cuáles son las tres características principales de los tonos musicales?

Altura

3. ¿Cómo se compara una nota musical aguda con una grave, en términos de frecuencia?
4. ¿Cómo varía el tono más alto que uno puede escuchar en función de la edad?

Intensidad y sonoridad del sonido

5. ¿Qué es un decibel y cuántos decibeles tiene el sonido de menor intensidad que es posible oír?
6. El sonido de 30 dB, ¿es 30 veces más intenso que el umbral de audición, o 103 (mil) veces más intenso?
7. Describe la diferencia entre intensidad y sonoridad del sonido.
8. ¿Cómo se comparan los sonidos más intensos que podemos tolerar, con los más débiles que logramos escuchar?

Calidad

9. ¿Qué determina la altura de una nota?

10. Si la frecuencia fundamental de una nota es de 200 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Y del tercer armónico?
11. Exactamente, ¿qué determina la calidad o timbre de una nota?
12. ¿Por qué las mismas notas pulsadas en un banjo y en una guitarra tienen sonidos tan distintos?

Instrumentos musicales

13. ¿Cuáles son las tres clases principales de instrumentos musicales?
14. ¿Por qué en general hay más instrumentos de cuerda que instrumentos de viento en las orquestas?

Análisis de Fourier

15. ¿Qué descubrió Fourier acerca de los patrones de las ondas periódicas complejas?
16. Un sistema de sonido de alta fidelidad puede tener un intervalo de frecuencias que llega hasta los 20,000 hertz o incluso más. ¿De qué sirve este intervalo tan amplio?

Discos compactos

17. ¿Cómo se grababa la señal sonora en un disco fonográfico convencional del siglo xx? ¿Cómo se graba en un CD?

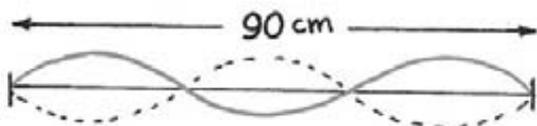
Proyectos

1. Trata de ver cuál de tus oídos tiene mejor audición; cúbrete uno y determina a qué distancia tu oído descubierto puede captar el tictac 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.
2. Canta la nota más grave o baja que puedas alcanzar. A continuación duplica la altura para ver cuántas octavas abarca tu voz. Si eres cantante, ¿cuál es tu tesitura?
3. En una hoja de papel milimétrico, traza un ciclo completo (un periodo del fundamental) de la onda compuesta de la figura 21.9, sobreponiendo varios desplazamientos verticales respecto al fundamental y los dos primeros tonos parciales. El profesor te indicará cómo se hace esto. A continuación, determina las ondas compuestas con los tonos parciales que elijas.

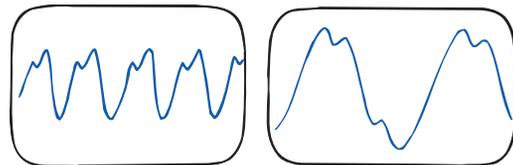
Ejercicios

1. Un amigo tuyo afirma que la frecuencia es una medida cuantitativa de la altura. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
2. Conforme la altura de un sonido se incrementa, ¿qué sucede con la frecuencia?

3. La luz amarillo-verdosa que emite el alumbrado público coincide con el color amarillo verdoso al cual el ojo humano es más sensible. En consecuencia, una luminaria de 100 watts emite luz que se puede ver mejor de noche. De igual manera, las intensidades del sonido de los comerciales de televisión tienen mayor volumen que los sonidos de la programación normal, aunque no exceden las intensidades reglamentarias. ¿En cuáles frecuencias se concentran los anunciantes en el sonido de los comerciales?
4. Las frecuencias más altas que pueden escuchar los humanos son de unos 20,000 Hz. ¿Cuál es la longitud de la onda sonora en el aire a esta frecuencia? ¿Cuál es la longitud de la onda más grave que podemos escuchar, con unos 20 Hz?
5. Explica cómo puedes bajar la altura de una nota en una guitarra alterando *a)* la longitud de la cuerda, *b)* la tensión de la cuerda, o *c)* el grosor o la masa de la cuerda.
6. ¿Por qué es conveniente tocar las guitarras antes de llevarlas al escenario en un concierto? (*Pista:* piensa en la temperatura.)
7. Si el sonido se vuelve más fuerte, ¿qué característica de la onda es más probable que se incremente: la frecuencia, la longitud de onda, la amplitud o la rapidez?
8. La altura de una nota, ¿depende de la frecuencia, la sonoridad o la calidad de un sonido, o de las tres cosas?
9. Una guitarra y una flauta están afinadas una con la otra. Explica cómo es que un cambio en la temperatura podría alterar esta situación.
10. Cuando se golpea la cuerda de una guitarra se produce una onda estacionaria que oscila con una gran amplitud, empujando de aquí para allá al aire para generar sonido. ¿Cómo se compara la frecuencia del sonido resultante con la de la onda estacionaria en la cuerda?
11. Cuando un guitarrista disminuye la tensión en una cuerda de su guitarra, ¿ésta producirá un sonido más alto o más bajo?
12. Las cuerdas de un arpa son de distintas longitudes y producen diferentes notas. ¿Cómo es que una guitarra, cuyas cuerdas tienen la misma longitud, puede tocar diferentes notas?
13. Si se acorta una cuerda que vibra (por ejemplo, oprimiéndola con un dedo), ¿qué efecto tiene esto sobre la frecuencia de la vibración y sobre la altura del tono?
14. Una cuerda de nylon para guitarra vibra produciendo la onda estacionaria que se ilustra abajo. ¿Cuál es su longitud de onda?



15. ¿Por qué los diapasones con ramas largas vibran con menor frecuencia que los de ramas cortas? (*Pista:* esta pregunta también se podría haber hecho en el capítulo 8.)
16. ¿Por qué las cuerdas graves de una guitarra tienen mayor diámetro que las cuerdas agudas?
17. Dos cuerdas de guitarra tienen la misma tensión y la misma longitud; una es gruesa y la otra delgada. ¿Cuál de las dos vibrará con la frecuencia más alta?
18. ¿Por qué una cuerda de guitarra que vibra no suena tan fuerte cuando está montada en un banco de trabajo que cuando está montada en una guitarra?
19. Si una guitarra carece de caja de resonancia, ¿una de sus cuerdas en tensión vibrará más o menos tiempo? ¿Por qué?
20. Si tocas muy levemente la cuerda de una guitarra en su punto medio, podrás escuchar un tono que está una octava arriba del fundamental para esa cuerda. (Una octava es un factor de dos en la frecuencia.) Explica por qué.
21. Si una cuerda de guitarra vibra formando dos segmentos, ¿dónde debería colocarse un pequeño trozo de papel doblado para que no salga despedido? ¿Cuántos trozos de papel doblado podrían fijarse de modo parecido si la forma de onda tuviera tres segmentos?
22. Una cuerda de violín toca la nota *la*, y vibra a 440 Hz. ¿Cuál es el periodo de oscilación de esa cuerda?
23. La cuerda de un violonchelo que toca la nota *do* oscila a 264 Hz. ¿Cuál es el periodo de oscilación de esa cuerda?
24. ¿Por qué las mismas notas en una trompeta y en un saxofón suenan diferente cuando las dos se tocan con la misma altura y sonoridad?
25. La amplitud de una onda transversal en una cuerda estirada es el desplazamiento máximo de esa cuerda con respecto a su posición de equilibrio. ¿A qué corresponde la amplitud de una onda sonora longitudinal en el aire?
26. ¿Cuál de las dos notas musicales que se representan una a la vez en una pantalla de osciloscopio es más alta?



27. En los osciloscopios de arriba, ¿cuál describe el sonido más intenso (suponiendo que se detectan con micrófonos iguales)?
28. Un altavoz produce un sonido musical por medio de la oscilación de un diafragma. El volumen del sonido producido, ¿depende de la frecuencia, de la amplitud o de la energía cinética de la oscilación? ¿O de todo lo anterior?

29. En un sistema de bocinas de alta fidelidad, ¿por qué el woofer (la bocina de bajos) es mayor que el tweeter (la bocina de agudos)?
30. ¿Cuál es una medida más objetiva: la intensidad del sonido o su sonoridad? Argumenta tu respuesta.
31. Una persona tiene su umbral de audición en 5 dB, y otra en 10 dB. ¿Cuál de ellas tiene la audición más fiel?
32. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 40 dB que uno de 0 dB?
33. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 110 dB que uno de 50 dB?
34. ¿Por qué un órgano electrónico puede imitar los sonidos producidos por diversos instrumentos musicales?
35. Una persona que habla después de inhalar helio gaseoso tiene la voz aguda. Una de las razones de este fenómeno es la mayor rapidez del sonido en el helio que en el aire. ¿Por qué el sonido se propaga con mayor rapidez en el helio que en el aire?
36. ¿Por qué tu voz suena más llena en la regadera?
37. El intervalo de frecuencias de un teléfono está entre 500 y 4,000 Hz. ¿Por qué un teléfono no es bueno para transmitir la música?
38. ¿Cuántas octavas abarca la audición humana normal? ¿Cuántas octavas hay en un teclado común de piano? (Si no lo sabes, invéstigalo.)
39. El do central en un piano tiene una frecuencia fundamental de 262 Hz. ¿Cuál es la frecuencia del segundo armónico de esta nota?
40. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de guitarra es de 220 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Y la del tercer armónico?
41. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de violín es de 440 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Y la del tercer armónico?
42. ¿Cuántos nodos, sin incluir los extremos, hay en una onda estacionaria que tiene tres longitudes de onda de largo? ¿Cuántos hay en una onda estacionaria que tiene cuatro longitudes de onda de largo?
43. ¿Cómo podrías afinar la nota A_3 en un piano a su frecuencia correcta de 220 Hz con la ayuda de un diapasón cuya frecuencia es de 440 Hz?
44. En un concierto al aire libre, la altura de las notas musicales no se afecta cuando hace viento. Explica por qué.
45. Una trompeta tiene pistones y válvulas con las que el trompetista cambia la longitud de la columna vibratoria de aire y la posición de los nodos. Un clarín no tiene pistones ni válvulas, pero puede tocar distintas notas. ¿Cómo crees que el ejecutante logra tocar notas distintas?
46. En ocasiones, al oído humano se le llama analizador de Fourier. ¿Qué quiere decir esto y por qué es una descripción correcta?
47. El ancho de un rayo láser es fundamental en la lectura de los CD y DVD. Cuanto más delgado sea el rayo, más juntas podrán estar las series de agujeros o pits. ¿Por qué el láser azul permite que los agujeros estén más juntos que el láser rojo?
48. ¿Todas las personas de un grupo escuchan la misma música cuando ponen atención? (¿Ven todos lo mismo cuando miran una pintura? ¿Perciben todos el mismo sabor cuando beben el mismo vino? ¿Perciben todos el mismo aroma cuando huelen el mismo perfume? ¿Sienten la misma textura cuando tocan la misma tela? ¿Llegan a la misma conclusión cuando escuchan una exposición lógica de ideas?)
49. ¿Por qué es seguro predecir que tú, que en este momento lees estas líneas, perderás bastante más capacidad auditiva en la vejez que la que sufrieron tus abuelos?
50. Redacta una pregunta de opción múltiple para diferenciar entre cualesquiera de los términos del Resumen de términos.

Problemas

1. ¿Cuántas veces más intenso que el umbral de audición es un sonido de 10 dB? ¿De 30 dB? ¿De 60 dB?
2. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 40 dB que uno de 30 dB?
3. Cierta nota tiene 1,000 Hz de frecuencia. ¿Cuál es la frecuencia de una nota que está una octava más alta? ¿Dos octavas más alta? ¿Una octava más baja? ¿Dos octavas más baja?
4. Si se inicia con un tono fundamental, ¿cuántos armónicos hay entre la primera y la segunda octava? ¿Entre la segunda y la tercera octava? (Véase la figura 21.3 para comenzar.)
5. Una cuerda de violonchelo tiene 0.75 m de longitud y su frecuencia fundamental es de 220 Hz. Calcula la rapidez de la onda a lo largo de la cuerda cuando vibra.