

Vibraciones y ondas



Diane Riendeau muestra como una vibración produce una onda.



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

Oscilación de un péndulo

Si colgamos una piedra de un cordón tendremos un péndulo simple. Los péndulos se balancean, y van y vienen con tal regularidad que, durante mucho tiempo, se usaron para controlar el movimiento de la mayoría de los relojes. Se encuentran en los relojes de los abuelos y en los relojes de cucú. Galileo descubrió que el tiempo que tarda un péndulo en ir y venir en distancias cortas sólo depende de la *longitud del péndulo*.¹ Es sorprendente que el tiempo de una oscilación de ida y vuelta, llamado *periodo*, no depende de la masa del péndulo ni del tamaño del arco en el cual oscila.

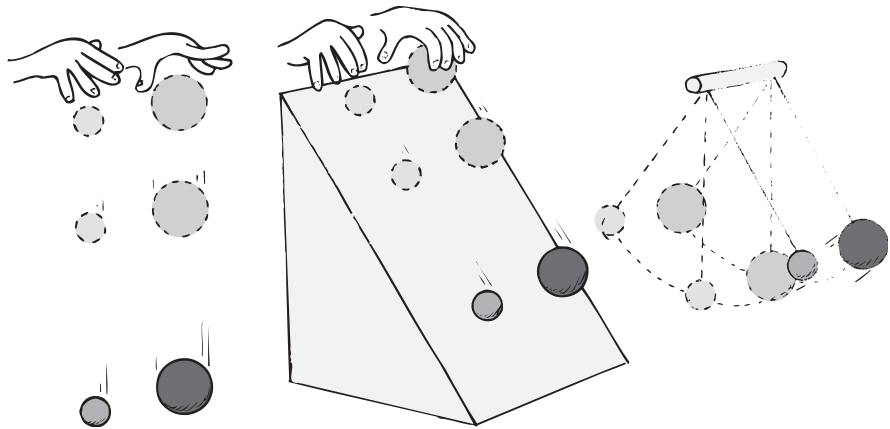
Un péndulo largo tiene un periodo más largo que un péndulo corto; esto es, oscila de ida y vuelta con menos frecuencia que un péndulo corto. El péndulo del reloj del abuelo, con una longitud aproximada de 1 m, por ejemplo, oscila con un serenado periodo de 2 s; en tanto que el péndulo mucho más corto de un reloj de cucú oscila con un periodo menor que 1 segundo.

Además de la longitud, el periodo de un péndulo depende de la aceleración de la gravedad. Los buscadores de petróleo y de minerales usan péndulos muy

¹ La ecuación exacta para calcular el periodo de un péndulo simple, para arcos pequeños, es $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, donde T es el periodo, l es la longitud del péndulo y g es la aceleración de la gravedad.

FIGURA 19.1

Deja caer dos esferas de masa distinta y aceleran con g . Déjalas deslizar sin fricción por el mismo plano inclinado y bajarán juntas a la misma fracción de g . Amárralas a cordones de la misma longitud, para formar péndulos, y oscilarán al unísono. En todos los casos, los movimientos son independientes de la masa.



sensibles para detectar pequeñas diferencias de esa aceleración. La aceleración de la gravedad varía debido a la densidad de las formaciones subterráneas.

Descripción de una onda

El movimiento vibratorio de ir y venir (a menudo también conocido como *movimiento oscilatorio*) de un péndulo que describe un arco pequeño se llama *movimiento armónico simple*.² La lenteja de un péndulo, llena de arena, que se observa en la figura 19.2, tiene movimiento armónico simple sobre una banda

FIGURA 19.2

Frank Oppenheimer, en el Exploratorium de San Francisco, demuestra *a)* una recta trazada por un péndulo que deja escapar arena, sobre la banda transportadora inmóvil. *b)* Cuando la banda transportadora se mueve uniformemente, se traza una curva senoide.

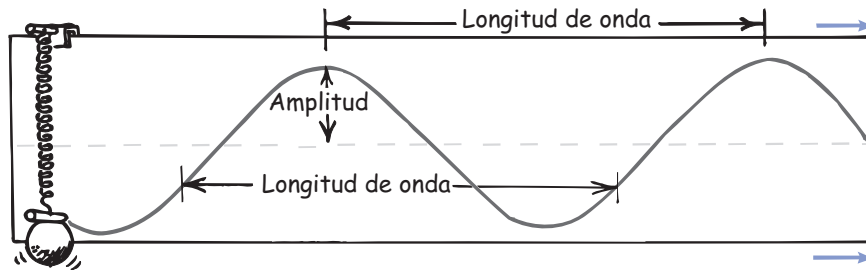
**a****b**

² La condición para que haya movimiento armónico simple es que la fuerza de restitución sea proporcional al desplazamiento respecto al equilibrio. Esta condición la cumplen, al menos en forma aproximada, la mayoría de las vibraciones. El componente del peso que restituye un péndulo desplazado a su posición de equilibrio es directamente proporcional al desplazamiento del péndulo (para ángulos pequeños), y de igual manera para un peso fijado a un resorte. Recuerda que, en la página 234, en el capítulo 12, la ley de Hooke para un resorte es $F = k\Delta x$, donde la fuerza para estirar (o comprimir) un resorte es directamente proporcional a la distancia que esté estirado (o comprimido).

FIGURA 19.3

Figura interactiva

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



transportadora. Cuando esa banda no se mueve (izquierda), la arena que suelta traza una recta. Lo más interesante es que cuando la banda transportadora se mueve a rapidez constante (derecha), la arena que sale traza una curva especial, llamada **senoide** o **sinusoide**.

También un contrapeso que esté fijo a un resorte, que tenga movimiento armónico simple vertical, describe una curva senoide (figura 19.3), la cual es una representación gráfica de una onda. Al igual que con una onda de agua, a los puntos altos de una senoide se les llama *crestas*; y a los puntos bajos, *valles*. La línea recta punteada representa la posición “inicial”, o el “punto medio” de la vibración. Se aplica el término **amplitud** para indicar la distancia del punto medio a la cresta (o valle) de la onda. Así, la amplitud es igual al desplazamiento máximo respecto al equilibrio.

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

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

La unidad de frecuencia se llama **hertz** (Hz), en honor a Heinrich Hertz, quien demostró la existencia de las ondas de radio en 1886. Una vibración por segundo es 1 hertz; dos vibraciones por segundo son 2 hertz, etcétera. Las frecuencias mayores se miden en kilohertz (kHz, miles de hertz), e incluso las frecuencias todavía mayores en megahertz (MHz, millones de hertz) o gigahertz (GHz, miles de millones de hertz). Las ondas de radio AM se miden en kilohertz; en tanto que las de radio FM en megahertz; el radar y los hornos de microondas funcionan con frecuencias de gigahertz. Una estación de radio de AM de 960 kHz, por ejemplo, transmite ondas cuya frecuencia es de 960,000 vibraciones por segundo. Una estación de radio de FM de 101.7 MHz transmite a 101,700,000 de hertz. Estas frecuencias de las ondas de radio son las que tienen los electrones que son forzados a vibrar en la antena de una torre emisora de una estación de radio. La fuente de todas las ondas es algo que vibra. La frecuencia de la fuente vibratoria y la de la onda que produce son iguales.

El **periodo** de una vibración o una onda es el tiempo que tarda en completar una vibración. Si se conoce la frecuencia de un objeto, se puede determinar su periodo, y viceversa. Por ejemplo, imagina que un péndulo hace dos oscilaciones en un segundo. Su frecuencia de vibración es 2 Hz. El tiempo necesario para terminar una vibración, es decir, el periodo de vibración, es de $\frac{1}{2}$ segundo. O bien, si

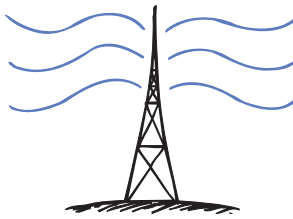


FIGURA 19.4

Los electrones de la antena transmisora vibran 940,000 veces cada segundo y producen ondas de radio de 940 kHz.



La frecuencia de una onda “clásica” —como una onda de sonido, de agua o de radio— es igual a la frecuencia de su fuente vibratoria. (En el mundo cuántico de los átomos y fotones, las reglas son diferentes.)

¡EUREKA!

la frecuencia de vibración es 3 Hz, entonces, el periodo es $\frac{1}{3}$ de segundo. La frecuencia y el periodo son recíprocos entre sí:

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

o viceversa,

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

EXAMÍNA TE

1. ¿Cuál es la frecuencia de una onda, dado que su periodo es aproximadamente de 0.01667 segundos?
2. Las ráfagas de aire hacen que el edificio de Sears en Chicago oscile con una frecuencia aproximada de vibración de 0.1 Hz. ¿Cuál es el periodo de esta vibración?

Movimiento ondulatorio

La mayoría de la información acerca de lo que nos rodea nos llega en alguna forma de ondas. Es a través del movimiento ondulatorio que el sonido llega a nuestros oídos, la luz a nuestros ojos, y las señales electromagnéticas a los radios y televisores. A través del *movimiento ondulatorio* se puede transferir energía de una fuente hacia un receptor, sin transferir materia entre esos dos puntos.

Entenderemos mejor el movimiento ondulatorio, si primero examinamos el caso sencillo de una cuerda horizontal estirada. Si se sube y baja un extremo de esa cuerda, a lo largo de ella viaja una perturbación rítmica. Cada partícula de la cuerda se mueve hacia arriba y hacia abajo; en tanto que al mismo tiempo la perturbación recorre la longitud de la cuerda. El medio, que puede ser una cuerda o cualquier otra cosa, regresa a su estado inicial después de haber pasado la perturbación. Lo que se propaga es la perturbación, y no el medio mismo.

Quizás un ejemplo más familiar del movimiento ondulatorio sea una onda en el agua. Si se deja caer una piedra en un estanque tranquilo, las ondas viajarán hacia afuera, formando círculos cada vez mayores cuyos centros están en la fuente de la perturbación. En este caso pensaríamos que se transporta agua con las ondas, porque cuando éstas llegan a la orilla, salpican agua sobre terreno que antes estaba seco. Sin embargo, debemos darnos cuenta de que si las ondas encuentran barreras impasables, el agua regresará al estanque y las cosas serían casi como estaban al principio: la superficie del agua habrá sido perturbada, pero el agua misma no habrá ido a ninguna parte. Una hoja sobre la superficie subirá y bajará cuando pase la onda por ella, pero terminará donde estaba antes. De nuevo, el medio regresará a su estado inicial después de que pasó la perturbación, incluso en el caso extremo de un tsunami.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Frecuencia = $1/\text{periodo} = 1/0.01667 \text{ s} = 60 \text{ Hz}$. ($0.01667 = 1/60$). De manera que la onda oscila 60 veces por segundo y tiene un periodo de $1/60$ segundo.
2. El periodo es igual a $1/\text{frecuencia} = 1/(0.1 \text{ Hz}) = 1/(0.1 \text{ vibración/s}) = 10 \text{ s}$. Cada oscilación, en consecuencia, ocupa 10 segundos.

Ejemplos de ondas
[https://
www.acs.psu.edu/
drussell/Demos/waves-
intro/waves-intro.html](https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html)

Ripple Tank
[https://
youtu.be/-8a61G8Hvi0](https://youtu.be/-8a61G8Hvi0)

FloWave Ocean Energy
Research Facility
[https://youtu.be/
WffR6HrEqTA](https://youtu.be/WffR6HrEqTA)

Ahora veamos otro ejemplo de una onda, para ilustrar que lo que se transporta de una parte a otra es una perturbación en un medio, y no el medio en sí. Si contemplas un campo con el césped crecido desde un punto elevado, en un día ventoso, verás que las ondas viajan por el césped. Los tallos individuales de césped no dejan sus lugares, en vez de ello sólo se balancean. Además, si te paras en una vereda angosta, el césped que está en la orilla del sendero, que llega a tocar tus piernas, se parece mucho al agua que salpica sobre la orilla de nuestro ejemplo anterior. Si bien el movimiento ondulatorio continúa, el césped oscila, “vibrando” entre límites definidos, pero sin ir a ningún lado. Cuando cesa el movimiento ondulatorio, el césped regresa a su posición inicial.

Rapidez de una onda



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

¡EUREKA!

La rapidez del movimiento ondulatorio periódico se relaciona con la frecuencia y la longitud de onda de las ondas. Entenderemos bien esto si imaginamos el caso sencillo de las ondas en el agua (figuras 19.5 y 19.6). Si fijáramos los ojos en un punto estacionario de la superficie del agua y observáramos las olas que pasan por él, podríamos medir cuánto tiempo pasa entre la llegada de una cresta y la llegada de la siguiente cresta (el periodo), y también observaríamos la distancia entre las crestas (la longitud de onda). Sabemos que la rapidez se define como una distancia dividida entre un tiempo. En este caso, la distancia es una longitud de onda y el tiempo es un periodo, por lo que la **rapidez de la onda** = longitud de onda/periodo.

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

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

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

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



FIGURA 19.5
Ondas en el agua.

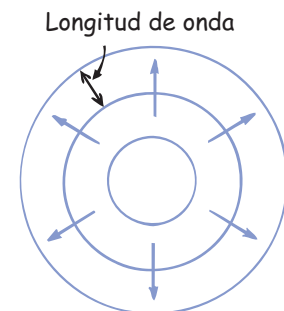
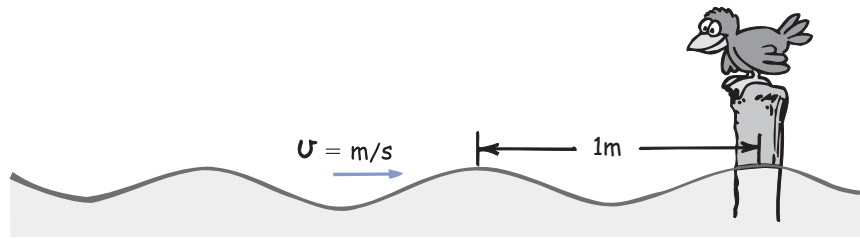


FIGURA 19.6
Vista superior de las ondas en el agua.

FIGURA 19.7

Figura interactiva

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



EXAMÍNATE

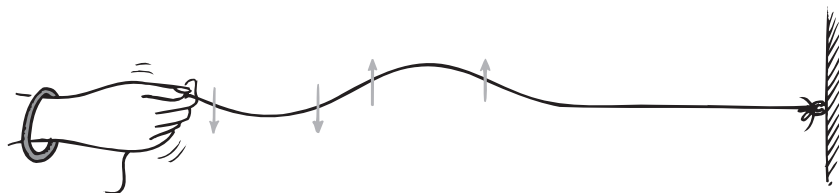
1. Si frente a ti pasa un tren de carga, y cada furgón tiene 10 m de longitud, y ves que cada segundo pasan tres furgones, ¿cuál será la rapidez del tren?
2. Si una ola en el agua sube y baja tres veces cada segundo, y la distancia entre las crestas de las olas es 2 m, ¿cuál es la frecuencia del oleaje? ¿Cuál es la longitud de onda? ¿Cuál es la rapidez de la ola?

Ondas transversales

Sujeta un extremo de un cordón a la pared, y con la mano sujeta el otro extremo. Si de repente agitas tu mano hacia arriba y hacia abajo, se formará un impulso que viajará a lo largo de la cuerda de ida y vuelta (figura 19.8). En este caso, el movimiento del cordón (hacia arriba y hacia abajo) forma un ángulo recto con la dirección de la rapidez de la onda. El movimiento perpendicular, o hacia los lados, en este caso, se llama *movimiento transversal*. Ahora mueve el cordón con un movimiento de subida y bajada periódico y continuo, y la serie de impulsos producirán una onda. Como el movimiento del medio (que en este caso es el cordón) es transversal respecto a la dirección hacia donde viaja la onda, a esta clase de onda se le llama **onda transversal**.

FIGURA 19.8

Una onda transversal.



COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. 30 m/s. Se puede llegar a esto en dos formas. a) Según la definición de rapidez del capítulo 2, $v = d/t = (3 \times 10 \text{ m})/1 \text{ s} = 30 \text{ m/s}$, ya que frente a ti pasan 30 m del tren en 1 s. b) Si se compara el tren con un movimiento ondulatorio, donde la longitud de onda corresponde a 10 m y la frecuencia es 3 Hz, entonces $\text{rapidez} = \text{longitud de onda} \times \text{frecuencia} = 10 \text{ m} \times 3 \text{ Hz} = 10 \text{ m} \times 3/\text{s} = 30 \text{ m/s}$.
2. La frecuencia de la ola es 3 Hz, su longitud es 2 m y su rapidez de onda = $\text{longitud de onda} \times \text{frecuencia} = 2 \text{ m} \times 3/\text{s} = 6 \text{ m/s}$. Se acostumbra expresar lo anterior en la ecuación $v = \lambda f$ donde v es la rapidez de la onda, λ (letra griega lambda) es la longitud de onda y f es la frecuencia de la onda.

PRÁCTICA DE FÍSICA

Aquí vemos una curva senoide que representa una onda transversal. Con una regla mide la longitud de onda y la amplitud de esa onda.

Longitud de onda = _____
Amplitud = _____



Las ondas en las cuerdas tensas de los instrumentos musicales y sobre la superficie de los líquidos son transversales. Después veremos que las ondas electromagnéticas, que pueden ser de radio o de luz, también son transversales.

Ondas longitudinales

Ondas longitudinales y transversales
<https://youtu.be/sB8w2FvPsBA>



Ondas longitudinales
contra transversales



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

¡EUREKA!

No todas las ondas son transversales. A veces las partes que forman un medio van y vienen en la misma dirección en la que viaja la onda. El movimiento es *a lo largo* de la dirección de la onda, y no en ángulo recto con ella. Esto produce una **onda longitudinal**.

Se pueden demostrar tanto las ondas transversales como las longitudinales con un *slinky* o resorte flexible y largo, estirado como en la figura 19.9. Una onda transversal se forma subiendo y bajando el extremo del *slinky* o moviéndolo de un lado a otro. Una onda longitudinal se forma si se tira y empuja con rapidez el extremo del *slinky*, hacia uno o alejándose de él. En este caso se ve que el medio vibra en dirección paralela a la de la transferencia de energía. Una parte del resorte se comprime, y una onda de *compresión* viaja por él. Entre las compresiones sucesivas está una región estirada, llamada *rarefacción*. Las compresiones y las rarefacciones viajan en la misma dirección, a lo largo del resorte. Las ondas sonoras son ondas longitudinales.

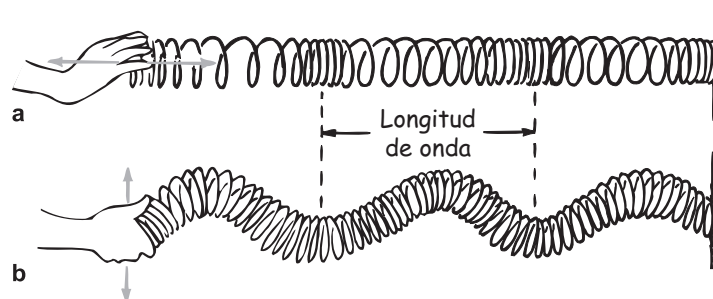
Las ondas que viajan por el suelo, generadas por los terremotos, son de dos clases principales: ondas P longitudinales y ondas S transversales. Las ondas S no pueden propagarse por la materia líquida; mientras que las ondas P pueden transmitirse tanto por las partes fundidas como por las partes sólidas del interior de la Tierra. Al estudiar esas ondas se deduce mucho acerca del interior de la Tierra.

La longitud de onda de una onda longitudinal es la distancia entre las compresiones sucesivas o, lo que es equivalente, entre las rarefacciones sucesivas. El ejemplo más común de ondas longitudinales es el sonido en el aire. Las moléculas del aire vibran hacia adelante y hacia atrás, respecto a una posición de equilibrio, cuando pasan las ondas. En el siguiente capítulo estudiaremos con detalle las ondas sonoras.

FIGURA 19.9

Figura interactiva

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



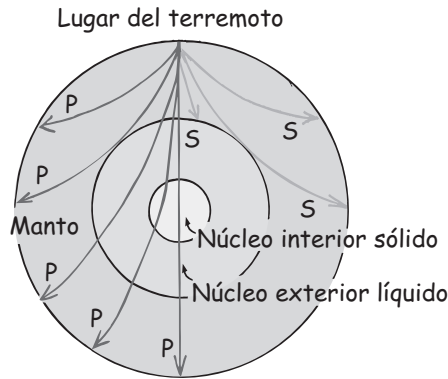


FIGURA 19.10

Ondas generadas por un terremoto. Las ondas P son longitudinales y atraviesan materiales tanto fundidos como sólidos. Las ondas S son transversales y sólo se propagan por materiales sólidos. Las reflexiones y las refracciones de las ondas proporcionan información sobre el interior de la Tierra.

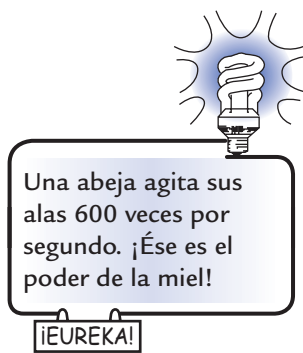
Interferencia

Mientras que un objeto, como una piedra, no comparte su espacio con otro (otra piedra), podría haber más de una vibración u onda al mismo tiempo y en el mismo espacio. Si dejamos caer dos piedras en el agua, las ondas que produce cada una pueden traslaparse y formar un **patrón de interferencia**. Dentro del patrón, los efectos ondulatorios aumentarían, disminuirían o se anularían.

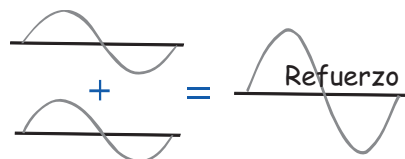
Cuando más de una onda ocupa el mismo espacio en el mismo tiempo, en cada punto del espacio se suman los desplazamientos. Es el *principio de superposición*. Así, cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra onda, sus efectos individuales se suman y producen una onda de mayor amplitud. A esto se le llama *interferencia constructiva* (figura 19.11). Cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra onda, se reducen sus efectos individuales. Simplemente, la parte alta de una onda llena la parte baja de otra. A esto se le llama *interferencia destructiva*.

La forma de entender mejor la interferencia entre ondas es en el agua. En la figura 19.12 se muestra el patrón de interferencia que se produce cuando dos objetos vibratorios tocan la superficie del agua. Se observa que las regiones donde se traslapa una cresta de una onda, con el valle de otra onda, producen regiones cuya amplitud es cero. En los puntos de esas regiones, las ondas llegan con las fases opuestas. Se dice que están *desfasadas* entre sí.

La interferencia es característica de todo movimiento ondulatorio, aunque las ondas sean de agua, sonoras o luminosas. En el próximo capítulo describiremos la interferencia en el sonido, y en el capítulo 29 la interferencia en la luz.



Interferencia constructiva de ondas
<https://youtu.be/ypcX1LdmMPM>



Interferencia destructiva de ondas
<https://youtu.be/IU8xeJIJ0mk>

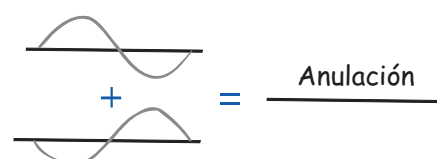
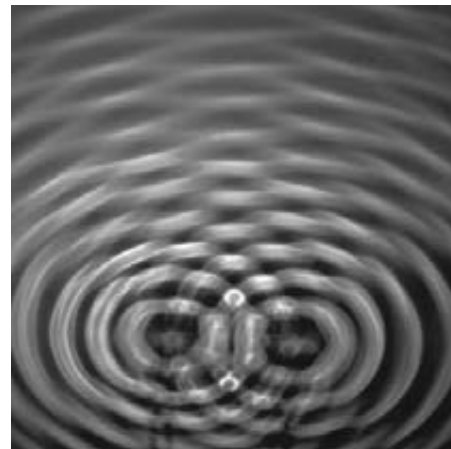
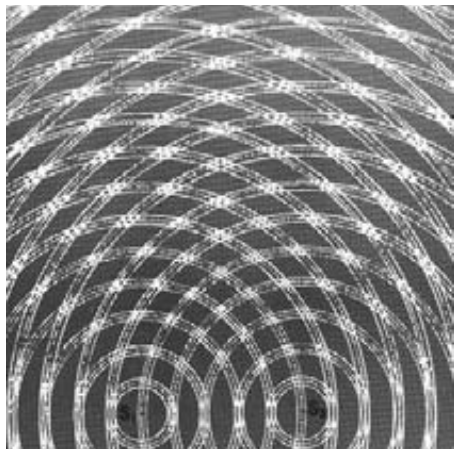


FIGURA 19.11

Interferencias constructiva y destructiva en una onda transversal.

FIGURA 19.12

Dos conjuntos de ondas en agua que se traslapan producen un patrón de interferencia. El diagrama de la izquierda es un dibujo idealizado de las ondas que se propagan desde dos fuentes. A la derecha se observa una imagen con un patrón de interferencia real.



Ondas estacionarias

Si sujetamos una cuerda a un muro, y agitamos hacia arriba y hacia abajo el otro extremo, se producirá un tren de ondas en la cuerda. El muro es demasiado rígido para moverse, por lo que las ondas se reflejan y regresan por la cuerda. Si se mueve el extremo de la cuerda en forma adecuada, se puede hacer que las ondas incidente y reflejada formen una **onda estacionaria**, en la cual unas partes de la cuerda, llamadas **nodos**, queden estacionarias. Los nodos son las regiones de desplazamiento mínimo o cero, cuya energía es mínima o cero. Por otro lado, los **antinodos** (que no se identifican en la figura 19.13) son las regiones de desplazamiento máximo y con energía máxima. Puedes acercar los dedos precisamente arriba o abajo de los nodos, y la cuerda no los tocará. Otras partes de ella, en especial los antinodos, sí los tocarían. Los antinodos están a media distancia entre los nodos.

FIGURA 19.13

Figura interactiva

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

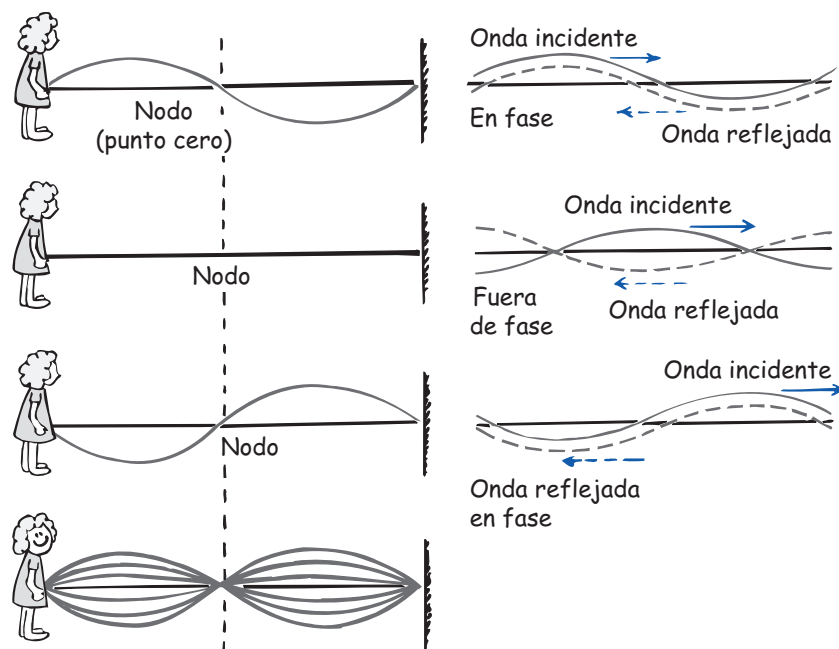
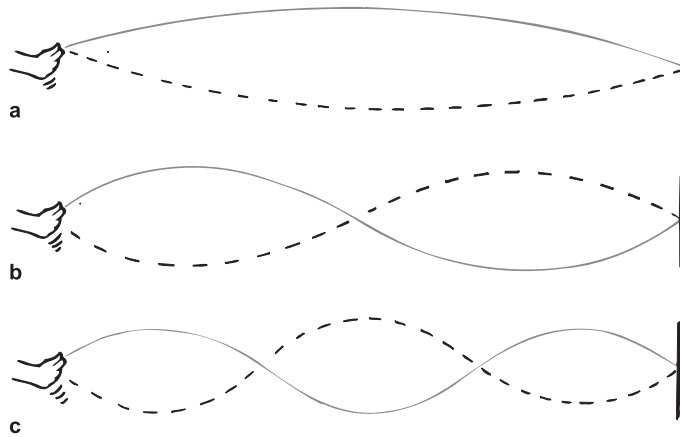


FIGURA 19.14

Figura interactiva

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



Las ondas estacionarias son el resultado de la interferencia (y como veremos en el siguiente capítulo, de la *resonancia*). Cuando dos conjuntos de ondas de igual amplitud y longitud pasan uno a través del otro en direcciones contrarias, las ondas están dentro y fuera de fase entre sí, en forma permanente. Esto sucede con una onda que se refleja sobre sí misma. Se producen regiones estables de interferencia constructiva y destructiva.

Es posible hacer ondas estacionarias con facilidad. Amarra una cuerda, o mejor aún, una manguera de caucho, a un soporte firme. Agita la manguera de un lado a otro cerca de uno de los soportes. Si agitas la manguera con la frecuencia correcta, establecerás una onda estacionaria, como la que observa en la figura 19.14a. Mueve la manguera con el doble de frecuencia y se formará una onda estacionaria con la mitad de la longitud de onda anterior, que tiene dos arcos. (La distancia entre los nodos sucesivos es la mitad de la longitud de onda; dos arcos forman la onda completa.) Si triplicas la frecuencia se formará una onda estacionaria con un tercio de la longitud de la onda original, y tendrá tres arcos; y así sucesivamente.

Las ondas estacionarias se forman en las cuerdas de los instrumentos musicales, por ejemplo, cuando se puntean (con una uña), se tocan (con un arco) o se percuten (en un piano). Se forman en el aire de los tubos de un órgano, de las trompetas o de los clarinetes, y en el aire de una botella, cuando se sopla sobre la boca de ésta. Se pueden formar ondas estacionarias en una tina llena de agua o en una taza de café, al moverla hacia delante y atrás con la frecuencia adecuada. Se pueden producir con vibraciones tanto transversales como longitudinales.

EXAMÍNATE

1. ¿Es posible que una onda se anule con otra y que no quede amplitud alguna?
2. Imagina que estableces una onda estacionaria de tres segmentos, como la de la figura 19.14c. Si agitas la mano con el doble de frecuencia, ¿cuántos segmentos de onda habrá en tu nueva onda estacionaria? ¿Y cuántas longitudes de onda?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. Es lo que se llama interferencia destructiva. En una onda estacionaria de una cuerda, por ejemplo, partes de la cuerda no tienen amplitud: los nodos.
2. Si impartes el doble de frecuencia a la cuerda, producirás una onda estacionaria con el doble de segmentos. Tendrás seis segmentos. Como una onda completa tiene dos segmentos, tendrás tres longitudes de onda completas en tu onda estacionaria.

Reflexión de ondas y ondas estacionarias

<https://youtu.be/-n1d1rycvj4>

Efecto Doppler

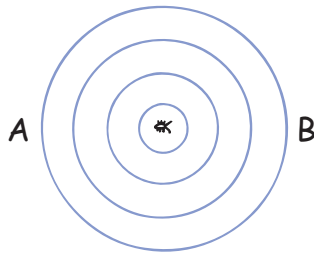


FIGURA 19.15

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

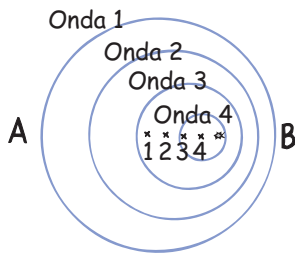


FIGURA 19.16

Figura interactiva

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



La distinción entre frecuencia y rapidez debe quedar clara. La frecuencia con que vibra la onda es totalmente diferente de la rapidez con que se mueve de un lugar a otro.

¡EUREKA!

En la figura 19.15 se ve el patrón de las ondas de agua que produce un insecto al agitar las patas y agitarse de arriba abajo en el centro de un estanque tranquilo. El insecto no va a ninguna parte; más bien, mueve el agua en una posición fija. Las ondas que provoca son círculos concéntricos, porque la rapidez de la onda es igual en todas las direcciones. Si agita las patas a una frecuencia constante, la distancia entre las crestas de las ondas (la longitud de onda) es igual en todas direcciones. Las ondas llegan al punto A con la misma frecuencia con la que llegan al punto B. Esto quiere decir que la frecuencia del movimiento ondulatorio es igual en los puntos A y B, o en cualquier lugar próximo al insecto. Esta frecuencia de las ondas es la misma que la frecuencia de pataleo del insecto.

Imagina que el insecto se mueve por el agua, con una rapidez menor que la de las ondas. De hecho, el insecto va tras una parte de las ondas que produjo. El patrón de las ondas se distorsiona y ya no está formado por círculos concéntricos (figura 19.16). La onda más exterior se produjo cuando el insecto estaba en su centro. La siguiente onda fue producida cuando el insecto estaba también en su centro, pero en un lugar distinto al centro de la primera onda, y así sucesivamente. Los centros de las ondas circulares se mueven en la misma dirección que el insecto. Aunque ese insecto mantiene la misma frecuencia de pataleo que antes, un observador en B observaría que le llegan ondas más a menudo. Mediría una frecuencia mayor. Esto se debe a que cada onda sucesiva tiene menor distancia por recorrer y, por lo tanto, llega a B con más frecuencia que si el insecto no se moviera acercándose a B. Por otro lado, un observador en A, mide que hay *menor* frecuencia, por el mayor tiempo entre las llegadas de las crestas de las ondas. Se debe a que para llegar a A, cada cresta debe viajar más lejos que la que le precedía, debido al movimiento del insecto. A este cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente (o al receptor) de las ondas se llama **efecto Doppler** (en honor al científico austriaco Christian Doppler, 1803-1853).

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

El efecto Doppler es evidente al oír cómo cambia el tono de la sirena de una ambulancia conforme ésta se acerca, pasa a un lado y se aleja. Al acercarse el vehículo, el tono sonoro es mayor que el normal (como si fuera una nota musical más alta). Esto se debe a que las crestas de las ondas sonoras llegan al oído con más frecuencia. Y cuando el vehículo pasa y se aleja, se oye una disminución en el tono porque las crestas de las ondas llegan a los oídos con menor frecuencia.

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

FIGURA 19.17

Figura interactiva

El tono (la frecuencia) del sonido aumenta cuando una fuente se mueve hacia ti y disminuye ésta cuando se aleja.



EXAMÍNATE

Cuando una fuente sonora se mueve hacia ti, que estás en reposo, ¿mides un aumento o una disminución de la rapidez de la onda?

Ondas de proa

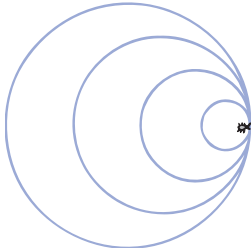


FIGURA 19.18

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

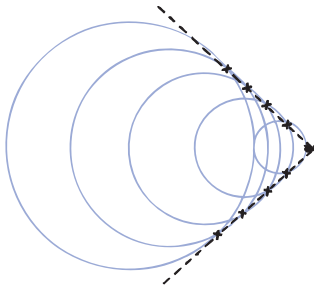


FIGURA 19.19

Una onda de proa es el patrón causado por un insecto que se mueve con más rapidez que la de las ondas. Los puntos en los que se traslapan las ondas adyacentes (x) producen la forma de V.

Cuando la rapidez de una fuente ondulatoria es igual a la de las ondas que produce, sucede algo interesante. Las ondas se apilan frente a la fuente. Imagina el insecto de nuestro ejemplo anterior, cuando nada con la misma rapidez que la de las ondas. ¿Puedes visualizar si se empareja con las ondas que produce? En vez de que las ondas se alejen frente a él, se superponen y se apilan una sobre otra, directamente frente al insecto (figura 19.18). El insecto se mueve con la orilla delantera de las ondas que está produciendo.

Sucede algo parecido cuando un avión viaja a la rapidez del sonido. En los albores de la aviación a reacción se creía que este apilamiento de ondas sonoras frente al avión formaba una “barrera de sonido” y que para avanzar más rápido que la rapidez del sonido, el avión debería “romper la barrera del sonido”. Lo que sucede en realidad es que las crestas de las ondas se apilan y perturban el flujo del aire sobre las alas, lo cual dificulta controlar la nave. Sin embargo, la barrera no es real. Así como un bote fácilmente puede viajar con más rapidez que las ondas que produce, un avión con la potencia suficiente viaja fácilmente con más rapidez que la del sonido. Se dice entonces que es *supersónico*. Un avión supersónico vuela en forma constante y no perturbada, porque ninguna onda sonora se puede propagar frente a él. Asimismo, un insecto que nade con mayor rapidez que las ondas en el agua se siente siempre como que entra al agua con una superficie lisa y sin ondulaciones.

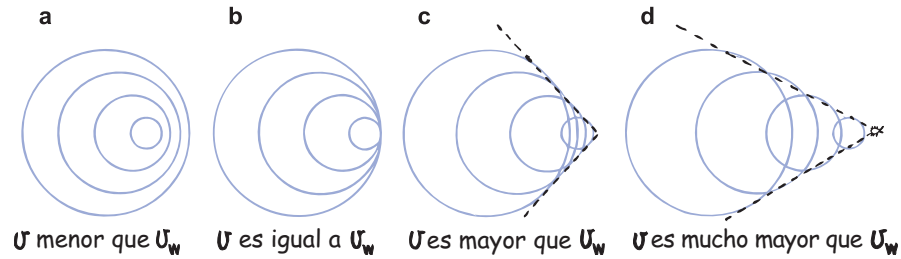
Cuando el insecto nada con más rapidez que la de las ondas, produce, en el caso ideal, un patrón ondulatorio como el que se presenta en la figura 19.19. Deja atrás las ondas que produce. Las ondas se traslapan en las orillas y el patrón que forman esas ondas que se traslapan tiene la forma de V, y se llama **onda de proa**, la cual parece que es arrastrada por el insecto. La conocida onda de proa que genera una lancha rápida que corta el agua no es una onda oscilatoria normal. Más bien es una perturbación producida cuando se enciman muchas ondas circulares.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

¡Ninguna de las dos cosas! La *frecuencia* de una onda es la que cambia cuando hay movimiento de la fuente, y no la *rapidez de la onda*. Entiende con claridad la diferencia entre frecuencia y rapidez. La frecuencia con que vibra una onda es totalmente distinta de lo rápido que la perturbación pasa de un lugar a otro.

FIGURA 19.20

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



En la figura 19.20 se muestran algunos patrones de ondas producidas por fuentes que se mueven con diversas rapidezces. Observa que después de que la rapidez de la fuente rebasa la rapidez de la onda, al aumentar la rapidez de la fuente se produce una V de forma más angosta.³

Ondas de choque

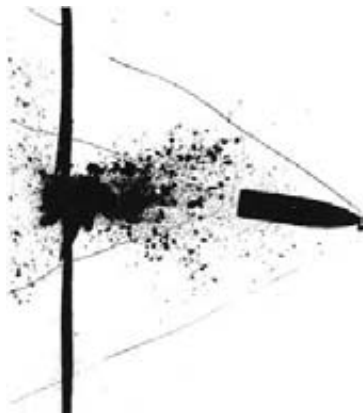
**FIGURA 19.21**

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

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

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

No se escucha ningún estampido sónico cuando los aviones son más lentos que el sonido, es decir, son subsónicos, porque las ondas sonoras que llegan a los oídos se perciben como un tono continuo. Sólo cuando el avión se mueve con más rapidez que el sonido se traslapan las ondas, y llegan a una persona en un

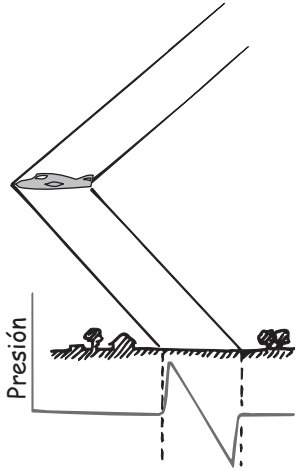
**FIGURA 19.22**

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

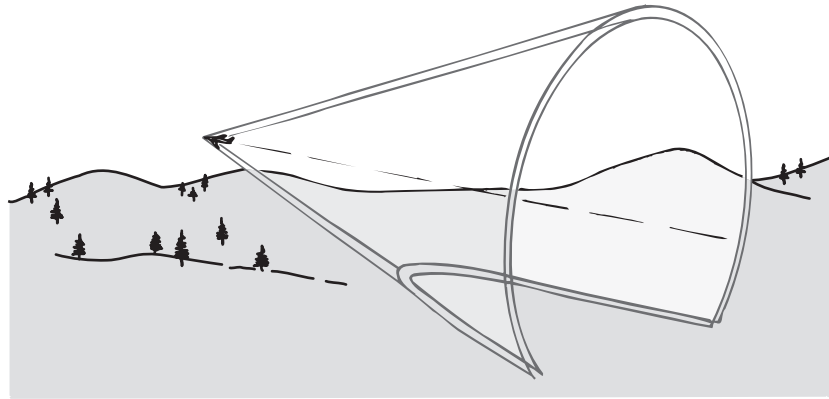
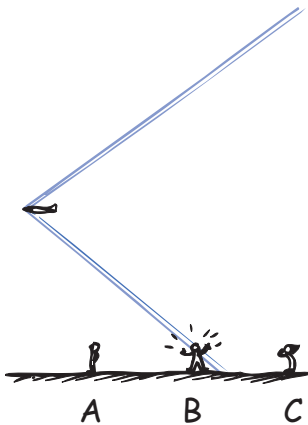
³ Las ondas de proa generadas por las lanchas en el agua son más complicadas de lo que se explicó aquí. Nuestra descripción ideal sirve como analogía para la producción de las ondas de choque en el aire, que son menos complejas.

FIGURA 19.23

Una onda de choque.

**FIGURA 19.24**

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



solo estallido. El aumento repentino de presión tiene el mismo efecto que la expansión súbita de aire que produce una explosión. Ambos procesos dirigen una ráfaga de aire con alta presión hacia una persona. El oído es presionado mucho, y no distingue si la alta presión se debe a una explosión o a muchas ondas encimadas.

Un esquiador acuático sabe bien que junto a la alta joroba de la onda de proa en forma de V, hay una depresión en forma de V. Lo mismo sucede con una onda de choque, que suele consistir en dos conos: uno de alta presión generado por la nariz del avión supersónico; y otro de baja presión, que sigue la cola de la nave.⁴ Las superficies de esos conos se observa en la imagen de la bala supersónica de la figura 19.22. Entre esos dos conos, la presión del aire sube repentinamente y es mayor que la presión atmosférica, y luego baja y es menor que la presión atmosférica; después sólo regresa a su valor normal, atrás del cono interior de la cola (figura 19.24). Esta alta presión seguida inmediatamente de menor presión es el estampido sónico.

Una idea errónea común es creer que los estampidos sónicos se producen cuando un avión atraviesa la “barrera del sonido”, esto es, sólo cuando la rapidez del avión pasa de menor a mayor que la del sonido. Es igual que decir que un bote produce una onda de proa al atravesar por primera vez sus propias ondas. Esto no es así. El hecho es que una onda de choque, y el estampido sónico que produce, barren en forma continua hacia atrás y por debajo de un avión que viaje más rápido que el sonido, así como una onda de proa barre continuamente atrás de una lancha rápida. En la figura 19.25 se ve que el escucha B está captando un estampido sónico. El escucha C ya lo oyó, y el escucha A lo oír en unos instantes. Puede ser que el avión que generó esa onda de choque ¡haya atravesado la barrera del sonido varios minutos antes!

No es necesario que la fuente en movimiento sea “ruidosa” para producir una onda de choque. Una vez que cualquier objeto se mueva con más rapidez que el sonido, *producirá* ruido. Una bala supersónica que pase sobre uno produce un crujido, que es un estampido sónico pequeño.

FIGURA 19.25

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

⁴ Con frecuencia, las ondas de choque son más complicadas y producen varios conos.

Si la bala fuera mayor y perturbara más aire en su trayectoria, el crujido se parecería más a un estampido. Cuando un domador restalla su látigo en el circo, el crujido que se oye es en realidad un estampido sónico que produce el extremo del látigo al moverse con más rapidez que la del sonido. Ni la bala ni el látigo son en sí mismos fuentes de sonido. Pero cuando se mueven con rapidez supersónicas, producen su propio sonido al generar ondas de choque.

Resumen de términos

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

Curva senoide Forma de una onda que se genera en el movimiento armónico simple; se puede ver en una banda transportadora que se mueva bajo un péndulo que oscile en ángulo recto a la dirección de movimiento de la banda.

Efecto Doppler Corrimiento de la frecuencia recibida, debido al movimiento de la fuente vibratoria hacia el receptor, o alejándose de él.

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

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

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

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

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

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

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

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

Onda transversal Onda en la cual el medio vibra en dirección perpendicular (transversal) a la dirección de propagación de la onda. Las ondas luminosas y las ondas en la superficie del agua son transversales.

Patrón de interferencia Patrón que forma la superposición de distintos conjuntos de ondas, que producen refuerzos en algunas partes y anulaciones en otras.

Periodo Tiempo en que se completa una vibración.

El periodo de una onda es igual al periodo de la fuente, y también es igual a 1 frecuencia.

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

Rapidez de la onda = longitud de onda $\times$ frecuencia

Preguntas de repaso

1. ¿Cómo se llama un *vaivén en el tiempo*? ¿Y un *vaivén en el espacio y en el tiempo*?

2. ¿Cuál es la fuente de todas las ondas?

Oscilación de un péndulo

3. ¿Qué quiere decir *periodo* de un péndulo?

4. ¿Qué tiene mayor periodo, un péndulo corto o uno largo?

Descripción de una onda

5. ¿En qué se relaciona una senoide con una onda?

6. Describe lo siguiente acerca de las ondas: periodo, amplitud, longitud de onda y frecuencia.

7. ¿Cuántas vibraciones por segundo representa una onda de radio de 101.7 MHz?

8. ¿Cómo se relacionan entre sí *frecuencia y periodo*?

Movimiento ondulatorio

9. En una palabra, ¿qué es lo que se mueve de la fuente al receptor en el movimiento ondulatorio?

10. ¿El medio en el cual se propaga una onda se mueve con ella? Describe un ejemplo que respalde tu respuesta.

Rapidez de una onda

11. ¿Cuál es la relación entre frecuencia, longitud de onda y rapidez de onda?

Ondas transversales

12. ¿Qué dirección tienen las vibraciones en relación con la dirección de propagación de una onda transversal?

Ondas longitudinales

13. ¿Qué dirección tienen las vibraciones en relación con la dirección de propagación de una onda longitudinal?

14. La longitud de onda en una onda transversal es la distancia entre crestas (o valles) sucesiva(o)s. ¿Cuál es la longitud de onda en una onda longitudinal?

Interferencia

15. ¿Qué entendemos por *principio de superposición*?
16. Explica la diferencia entre *interferencia constructiva* e *interferencia destructiva*.
17. ¿Qué clase de ondas pueden mostrar interferencia?

Ondas estacionarias

18. ¿Qué es un *nodo*? ¿Qué es un *antinodo*?
19. ¿Las ondas estacionarias pertenecen a las ondas transversales, a las longitudinales o a ambas?

Efecto Doppler

20. ¿En el efecto Doppler cambia la frecuencia? ¿Cambia la longitud de onda? ¿Cambia la rapidez de la onda?
21. ¿Puede observarse el efecto Doppler en las ondas longitudinales, en las ondas transversales o en ambas?
22. ¿Qué significa corrimiento hacia el azul y corrimiento hacia el rojo de la luz?

Ondas de proa

23. ¿Con qué rapidez debe nadar un insecto para emparejarse con las ondas que produce? ¿Con qué rapidez debe nadar para producir una onda de proa?
24. ¿Cuál es la rapidez con que avanza un avión supersónico, en comparación con la del sonido?
25. ¿Cómo varía la forma en V de una onda de proa, en función de la rapidez de la fuente?

Ondas de choque

26. Una onda de proa sobre la superficie del agua es bidimensional. ¿Y una onda de choque en el aire?
27. ¿Cierto o falso? El estampido sónico sólo se produce cuando un avión rompe la barrera del sonido. Defiende tu respuesta.
28. Para producir un estampido sónico un objeto debe ser “ruidoso”. ¿Cierto o falso? Da dos ejemplos que respalden tu respuesta.

Proyectos

1. Ata una manguera de caucho, un resorte o una cuerda a un soporte fijo, y produce ondas estacionarias. Observa cuántos nodos puedes producir.
2. Moja el dedo y frótalo en torno a la boca de una copa de vidrio de pared delgada y con pie, mientras con la otra mano sujeta la base de la copa, firmemente contra la mesa. La fricción del dedo producirá ondas estacionarias en la copa, son similares a las

ondas que se producen en un violín por la fricción del arco contra las cuerdas. Haz la prueba con un plato o una cacerola de metal.

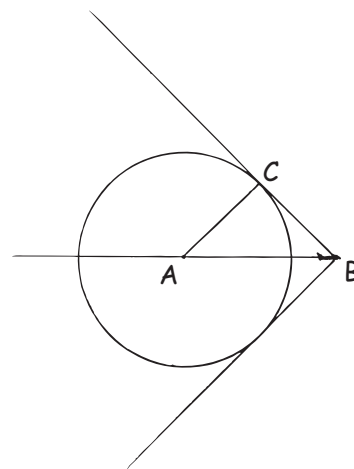
3. Escribe una carta a tu abuelita, donde le cuentes cómo las ondas se pueden anular entre sí y le digas cuáles son, en la actualidad, algunas de las aplicaciones de este fenómeno de la física.

Ejercicios

1. ¿El periodo de un péndulo depende de la masa que cuelga de él? ¿Del largo de la cuerda?
2. Una persona pesada y una liviana se balancean de un lado a otro en columpios de la misma longitud. ¿Cuál de las dos tiene el mayor periodo?
3. Cierta reloj antiguo de péndulo funciona con mucha exactitud. A continuación se pasa a una casa de veraneo, en unas montañas altas. ¿Se adelantará, se atrasará o quedará igual? Explica por qué.
4. Si se acorta un péndulo, ¿su frecuencia aumentará o disminuirá? ¿Y su periodo?
5. Puedes hacer balancear una maleta vacía con su frecuencia natural. Si estuviera llena de libros, ¿su frecuencia sería menor, mayor o igual que antes?
6. ¿El tiempo necesario para oscilar y regresar (el periodo) de un columpio es mayor o menor cuando te paras en él en vez de estar sentado? Explica por qué.
7. ¿Por qué tiene sentido el hecho de que la masa que cuelga de un péndulo simple no afecta la frecuencia de éste?
8. ¿Qué sucede con el periodo de una onda cuando disminuye la frecuencia?
9. ¿Qué sucede con la longitud de onda cuando disminuye la frecuencia?
10. Si la rapidez de una onda se duplica mientras su frecuencia permanece constante, ¿qué sucede con la longitud de onda?
11. Si la rapidez de una onda se duplica mientras la longitud de onda permanece constante, ¿qué sucede con la frecuencia?
12. Si sujetas un extremo de una segueta en un tornillo de banco y golpeas el extremo libre, oscilará. Ahora repítelo, pero con una bola de arcilla o plastilina en el extremo libre. ¿Cómo difiere, si es que lo hace, la frecuencia de vibración en ambos casos? ¿Sería distinto si la bola se pegara a la mitad? Explica por qué. (¿Por qué no se incluyó esta pregunta en el capítulo 8?)
13. La aguja de una máquina de coser sube y baja, y su movimiento es armónico simple. Lo que la impulsa es una rueda giratoria, movida a la vez por un motor eléctrico. ¿Cómo crees que se relacionan el periodo de subida y bajada de la aguja con el periodo de la rueda giratoria?

14. Si agitas el extremo de un resorte para generar una onda, ¿cómo se compara la frecuencia de la onda con la frecuencia de tu mano al realizar la sacudida? ¿Tu respuesta depende de si produces una onda transversal o una longitudinal? Argumenta tu respuesta.
15. ¿Qué clase de movimiento debes impartir a la boquilla de una manguera en el jardín para que el chorro que salga tenga aproximadamente una forma senoidal?
16. ¿Qué clase de movimiento debes impartir a un resorte helicoidal estirado (un *slinky*) para generar una onda transversal? ¿Y para generar una onda longitudinal?
17. ¿Qué clase de onda es cada una de las siguientes?
a) Una ola del mar que se dirige hacia la playa Waikiki. b) El sonido de una ballena que llama a otra bajo el agua. c) Un impulso mandado por una cuerda tensa, al golpear uno de sus extremos.
18. Si se abre una llave de gas durante pocos segundos, alguien que esté a un par de metros oír el escape del gas, mucho antes de captar su olor. ¿Qué indica esto acerca de la rapidez del sonido y del movimiento de las moléculas en el medio que lo transporta?
19. Si sube al doble la frecuencia de un objeto en vibración, ¿qué sucederá con su periodo?
20. ¿Los términos *rapidez de onda* y *frecuencia de onda* se refieren a lo mismo? Argumenta tu respuesta.
21. La longitud de onda de la luz roja es mayor que la de la luz violeta. ¿Cuál de ellas es la que tiene mayor frecuencia?
22. Considera una onda que viaja a lo largo de una cuerda gruesa atada a una cuerda delgada. ¿Cuál de estas tres características de las ondas *no* tiene cambios: la rapidez, la frecuencia o la longitud de onda?
23. ¿Cuál es la frecuencia del segundero de un reloj? ¿Y la del minuterio? ¿La de la manecilla de las horas?
24. ¿Cuál es la fuente del movimiento ondulatorio?
25. Si sumerges repetidamente el dedo en un plato lleno de agua formas ondas. ¿Qué sucede con la longitud de las ondas si sumerges el dedo con más frecuencia?
26. ¿Cómo se compara la frecuencia de vibración de un objeto pequeño que flota en el agua, con la cantidad de ondas que pasan por él cada segundo?
27. ¿Hasta dónde llega una onda en un periodo, en términos de longitud de onda?
28. ¿Cuántos nodos, sin incluir los extremos, hay en una onda estacionaria que tiene dos longitudes de onda de largo? ¿Y una con tres longitudes de onda?
29. Se deja caer una piedra al agua, y las ondas se difunden por la superficie plana del agua. ¿Qué sucede con la energía de esas ondas cuando desaparecen?
30. Las distribuciones de las ondas que se ven en la figura 19.6 están formadas por círculos. ¿Qué te indica eso acerca de la rapidez de las ondas que se mueven en distintas direcciones?
31. ¿Por qué se ve primero el rayo y después se escucha el trueno?
32. Un músico toca el banjo pulsando una cuerda en la mitad. ¿Dónde están los nodos de la onda estacionaria en la cuerda? ¿Cuál es la longitud de onda de la cuerda vibratoria?
33. A veces, los violinistas pasan el arco sobre una cuerda para producir una cantidad máxima de vibración (antinodos) a la cuarta parte y a las tres cuartas partes de la longitud de la cuerda, y no a la mitad de ella. Entonces, la cuerda vibra con una longitud de onda igual a la longitud de la cuerda, y no del doble de esa longitud (véase las figuras 19.14 a y b). Cuando esto sucede, ¿qué efecto tiene sobre la frecuencia?
34. Un murciélago emite su sonido característico (gorjea) al volar con dirección a un muro. ¿La frecuencia del eco del sonido que recibe es mayor, menor o igual que la del sonido emitido?
35. ¿Por qué hay un efecto Doppler cuando la fuente sonora es estacionaria y la persona que escucha está en movimiento? ¿En qué dirección debe moverse la persona para escuchar una frecuencia mayor? ¿Y para escuchar una frecuencia menor?
36. Una locomotora está parada, y suena el silbato; a continuación se acerca hacia ti. a) ¿La frecuencia que escuchas aumenta, disminuye o queda igual? b) ¿Y la longitud de onda que llega al oído? c) ¿Y la rapidez del sonido en el aire que hay entre tú y la locomotora?
37. Cuando suenas el claxon al manejar hacia una persona que está parada, ella escucha un aumento de su frecuencia. ¿Escucharía un aumento en la frecuencia del claxon si estuviera también dentro de un automóvil que se mueve con la misma rapidez y en la misma dirección que el tuyo? Explica por qué.
38. ¿Hay efecto Doppler apreciable cuando el movimiento de la fuente es perpendicular al escucha? Explica por qué.
39. ¿Cómo ayuda el efecto Doppler a que la policía determine quiénes son los infractores por exceso de rapidez?
40. Los astrónomos dicen que la luz emitida por determinado elemento en una de las orillas del Sol tiene una frecuencia un poco mayor que la que proviene del lado opuesto. ¿Qué indican esas determinaciones acerca del movimiento del Sol?
41. ¿Sería correcto decir que el efecto Doppler es el cambio aparente de la rapidez de una onda, debido

- al movimiento de la fuente? (¿Por qué esta pregunta es para comprobar la comprensión en la lectura y también el conocimiento de física?)
42. ¿Cómo interviene el fenómeno de la interferencia en la producción de ondas de proa o de ondas de choque?
 43. ¿Qué puedes decir acerca de la rapidez de un bote que produce una onda de proa?
 44. ¿El ángulo del cono de una onda de choque se abre, se cierra o permanece constante cuando un avión supersónico aumenta su rapidez?
 45. Si el sonido de un avión no proviene de la parte del cielo donde se ve, ¿significa eso que el avión viaja con más rapidez que la del sonido? Explica.
 46. ¿Se produce estampido sónico en el momento en el que el avión atraviesa la barrera del sonido? Explica por qué.
 47. ¿Por qué un avión subsónico, por más ruidoso que sea, no puede producir un estampido sónico?
 48. Imagina un pez súper rápido, que puede nadar a una rapidez mayor que la del sonido en el agua. ¿Ese pez produciría un “estampido sónico”?
 49. Redacta una pregunta de opción múltiple para probar la comprensión de un compañero de clase acerca de la diferencia entre una onda transversal y una longitudinal.
 50. Redacta dos preguntas de opción múltiple para probar la comprensión de un compañero de clase acerca de los términos que describen una onda.
6. Un mosquito bate sus alas 600 veces por segundo, lo cual produce el molesto zumbido de 600 Hz. ¿Cuánto avanza el sonido entre los batidos del ala? En otras palabras, calcula la longitud de onda del zumbido del mosquito.
 7. En un teclado, la frecuencia del “do” central es 256 Hz. *a)* ¿Cuál es el periodo de una vibración con este tono? *b)* Al salir este sonido del instrumento con una rapidez de 340 m/s, ¿cuál será su longitud de onda en el aire?
 8. *a)* Si fueras tan ingenuo como para tocar el teclado bajo el agua, donde la rapidez del sonido es 1,500 m/s, ¿cuál sería la longitud de onda del “do” central en el agua? *b)* Explica *por qué* el “do” central (o cualquier otra nota) tiene mayor longitud de onda en el agua que en el aire.
 9. La longitud de onda del canal 6 de la TV es 3.42 m. ¿El canal 6 transmite con una frecuencia mayor o menor que la banda de radio FM, que es de 88 a 108 MHz?
 10. Como se observa en la figura, el medio ángulo del cono de la onda de choque generada por un transporte supersónico es 45° . ¿Cuál será la rapidez del avión en relación con la del sonido?



Problemas

1. ¿Cuál es la frecuencia en hertz que corresponde a cada uno de los siguientes periodos? *a)* 0.10 s, *b)* 5 s, *c)* 1/60 s.
2. ¿Cuál es el periodo, en segundos, que corresponde a cada una de las siguientes frecuencias? *a)* 10 Hz, *b)* 0.2 Hz, *c)* 60 Hz?
3. Un marinero en una lancha observa que las crestas de las olas pasan por la cadena del ancla cada 5 segundos. Estima que la distancia entre las crestas es 15 metros. También estima en forma correcta la rapidez de las olas. ¿Cuál es esa rapidez?
4. Un peso colgado de un resorte sube y baja una distancia de 20 centímetros, dos veces cada segundo. ¿Cuáles serán su frecuencia, su periodo y su amplitud?
5. Las ondas de radio viajan a la rapidez de la luz, a 300,000 km/s. ¿Cuál es la longitud de las ondas de radio que se reciben de la estación de 100.1 MHz en tu radio de FM?