

Mike Goldsmith

Ondas

Una breve introducción



Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *Waves: A Very Short Introduction*

Traducción de Miguel Paredes Larrucea

Waves. A Very Short Introduction ha sido publicada originalmente en inglés en 2018. Esta traducción se publica por acuerdo con Oxford University Press. Alianza Editorial es la única responsable de la traducción de la obra original y Oxford University Press no será responsable de ningún error, omisión, imprecisión o ambigüedad en dicha traducción ni de cualquier problema derivado de la confianza depositada en Alianza Editorial.

Diseño de colección: Estudio de Manuel Estrada con la colaboración de Roberto Turégano y Lynda Bozarth

Diseño de cubierta: Manuel Estrada

Ilustración de cubierta: *Vista de la laguna de Venecia. Olas.*

© Getty Images

Selección de imagen: Carlos Caranci Sáez

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagieren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.



© Mike Goldsmith 2018

© de la traducción: Miguel Paredes Larrucea, 2021

© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2021

Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15

28027 Madrid

www.alianzaeditorial.es

ISBN: 978-84-1362-074-9

Depósito legal: M. 23.653-2020

Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: alianzaeditorial@anaya.es

Índice

9	1. Las ondas, en esencia
46	2. Ondas de agua
63	3. Ondas sonoras
77	4. Ondas sísmicas
89	5. Ondas biológicas
101	6. Ondas electromagnéticas
143	7. Ondas cuánticas
165	8. Ondas gravitacionales
179	Lecturas suplementarias
183	Lista de ilustraciones
187	Índice analítico

1. Las ondas, en esencia

En febrero de 2016, los medios de comunicación internacionales anunciaron el descubrimiento de ondas gravitacionales, con titulares como «LIGO oye ondas gravitacionales», «Las ondas gravitacionales de Einstein, “vistas” en agujeros negros» o «Los agujeros negros chocan y la gravedad tiembla». La noticia tenía su importancia por dos razones. Las observaciones confirmaban una predicción hecha por Einstein en 1916 y aportaban así nuevas pruebas a favor de su teoría de la relatividad general, lo cual estaba muy bien, porque para los científicos que estudian el universo en su conjunto, o algunos de sus habitantes más exóticos como los agujeros negros, la relatividad general es casi la única posibilidad. El descubrimiento era igual de importante para la astronomía observacional, porque las ondas gravitacionales abren una nueva ventana al universo, al lejano en el espacio y también al lejano en el tiempo, y posiblemente nos

muestren cosas que nada más que ellas pueden mostrarnos. A pesar de los titulares, estas ondas no se pueden ni oír ni ver; su gran ventaja para los astrónomos del futuro estriba precisamente en el hecho de que son ondas de un tipo muy diferente del de las sonoras o las luminosas. Las ondas gravitacionales se tratan en el capítulo 8.

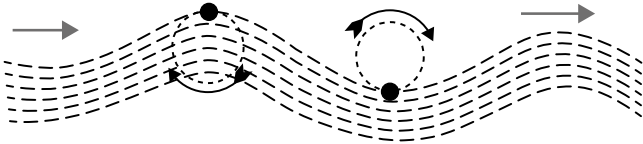
La tierra firme, los mares y el aire están todos ellos llenos de ondas de muy diferentes tipos, y más allá de la atmósfera hay muchos más. De hecho, cabría decir que en el universo no hay nada más que ondas y materia, e incluso que la materia también es ondas; en el capítulo 7 se explora esta interesante idea.

En el capítulo 2 se explica qué tienen de especiales las ondas de agua. Pero como estas ondas poseen al mismo tiempo muchas de las características esenciales compartidas por todas las demás ondas, vamos a zambullirnos sin más en ellas sin esperar al capítulo siguiente.

Ondas y medios

Imaginemos que estamos al borde de un acantilado, contemplando a nuestros pies el mar bañado por el sol en una tarde sin viento. Una sucesión constante y regular de olas se mueve rápidamente hacia la orilla... o eso es lo que parece, porque si observamos una pelota de tenis flotando en el agua, veremos que su principal movimiento es vertical, de subida y bajada al pasar cada ola. Por tanto está claro que el agua en la que flota no se mueve junto con las olas. Una observación más atenta revela que, además de hacia arriba y hacia abajo, la pelota se

mueve también hacia adelante y hacia atrás: hacia arriba y hacia adelante cuando la ola sube, y hacia abajo y hacia atrás cuando baja. Este movimiento circular es el de las propias moléculas de agua (Figura 1).



1. El movimiento de las moléculas de agua en una ola del mar.

Esta diferencia entre el movimiento de la ola y el de las partículas del medio por el que se mueve es típica de todas las ondas de esta clase: cada partícula ejecuta un determinado movimiento, y las partículas vecinas ejecutan el mismo movimiento pero con un ligero desfase. La ola mexicana que se hace en los estadios también es así; los únicos movimientos que ejecuta cada espectador son verticales, pero como cada cual empieza a moverse justo después de su vecina o vecino, se crea la ilusión de un movimiento lateral. Es el mismo efecto que produce la impresión de movimiento en las luces de los paneles luminosos de un cine o de un teatro. Para que funcione bien tiene que haber el mismo intervalo entre sucesos consecutivos, y todos los sucesos tienen que ser exactamente iguales.

No todos los medios pueden servir de soporte para un movimiento ondulatorio. La playa en la que mueren las olas puede que acabe esculpida en formas onduladas, pero, a menos que haya un terremoto, no puede realmente moverse en la forma de una onda. Para que

un medio participe de un movimiento ondulatorio tiene primero que ofrecer resistencia a ser movido, luego tiene que moverse y finalmente tiene que ofrecer resistencia a pararse al instante. El agua constituye un medio para las olas porque adopta de manera natural una posición plana, y cualquier intento de levantarla o de provocar una depresión en ella tropieza con resistencia. Si achicamos agua y creamos una depresión, esta se llenará al instante, pero (y esto es fundamental para generar una ola) el agua que entra para llenarla lo hará ligeramente en exceso, de manera que en lugar de volver a una superficie perfectamente lisa como al principio, la fugaz depresión irá seguida de un promontorio igual de efímero. El juego de depresión/promontorio continuará hasta que la resistencia del aire y la fricción entre las moléculas de agua hagan que la perturbación se extinga. Si nos lanzamos sobre un trampolín, lo experimentaremos directamente.

Este proceso explica por qué las olas rara vez aparecen solas; incluso en el caso de que provengan de un suceso singular (como la caída de una piedra en un estanque), el resultado suele ser una breve serie (un *tren*) de ondas.

La mayoría de las ondas se pueden definir con un número reducido de parámetros. Volviendo al ejemplo de la pelota que flota en un mar cubierto de olas, veremos enseguida que repite su movimiento cíclico una y otra vez, tardando siempre lo mismo en regresar al mismo punto (por ejemplo, de la cresta al valle y otra vez a la cresta). Este tiempo recibe el nombre de *periodo* de la onda. A menudo es más fácil medir la *frecuencia* de la onda que su periodo. Si un ciclo tiene un periodo de una dé-

cima de segundo, entonces su frecuencia es igual a diez ciclos por segundo, o diez hercios (matemáticamente, la frecuencia es la inversa del periodo). La frecuencia (en hercios) es también el número de crestas de onda que pasan por un punto en un segundo. La distancia entre crestas adyacentes, o de valles adyacentes, es la *longitud de onda*. La distancia entre la posición media y la parte más alta o la parte más baja de una onda es su *amplitud*. En el caso de las olas del mar se habla a veces de su altura, porque es más fácil de estimar que la amplitud; la altura es la distancia entre el valle y la cresta y por tanto es igual a dos veces la amplitud.

El concepto de velocidad es ligeramente más complicado: la velocidad con que las moléculas en una onda de agua se mueven a lo largo de su trayectoria es la *velocidad de una partícula* de la onda. Algo más sencilla de medir es la velocidad con que las crestas de las ondas se mueven hacia la orilla, que se denomina *velocidad de fase*. Si se habla de «velocidad», sin más, generalmente se está haciendo referencia a la velocidad de fase.

La velocidad de fase (v), la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) están relacionadas entre sí mediante la sencilla ecuación $v = f\lambda$.

La palabra *fase* se refiere aquí a la altura de la onda en un punto. La fase tiene importancia a la hora de comparar una onda con otra. Por ejemplo, si hay dos ondas de la misma forma, amplitud y longitud en las cuales las crestas de una de ellas coinciden con los valles de la otra, se dice que las dos ondas están *en oposición de fase*.

Un tercer tipo de velocidad es la *velocidad de grupo*. Si se tira una piedra en un estanque, se produce un tren

compuesto de varias ondulaciones concéntricas. Mientras el tren se va moviendo hacia afuera lentamente, dentro de él se forman en el borde interior ondulaciones individuales que viajan rápidamente hacia afuera a través del anillo y se disipan en su borde exterior. La velocidad de las ondulaciones es la velocidad de fase definida por la ecuación $v = f\lambda$, mientras que la velocidad del tren es la velocidad de grupo. Generalmente, como en este caso, la velocidad de grupo es menor que la de fase.

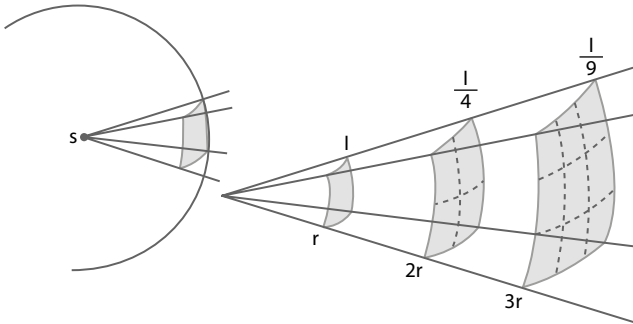
Propagación y atenuación

En casi todas las ondas la amplitud disminuye continuamente con la distancia a la fuente. Esta *atenuación* tiene dos causas.

El efecto de atenuación dominante es generalmente la propagación geométrica de la onda. Cuando un cohete explota en el aire, se propagan a partir de ese punto ondas sonoras y luminosas en todas las direcciones. Las ondas luminosas viajan a millones de metros por segundo, las sonoras a cientos de metros por segundo; como la esfera de sonido en expansión va rezagada respecto a la de luz, primero vemos el estallido y luego, al cabo de un tiempo, lo oímos.

Cuanto más lejos estamos del cohete, menos sonoro es el estallido y más débil es el fogonazo, porque la energía luminosa y la energía sonora de la explosión tienen que repartirse por una superficie esférica cada vez mayor (véase la Figura 2).

1. Las ondas, en esencia



2. Propagación esférica. Cuando la energía de una fuente (S) se difunde libremente en todas direcciones, se distribuye por una superficie cada vez mayor. La superficie aumenta proporcionalmente al cuadrado de la distancia (r) a la fuente, de manera que la intensidad (I) disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia ($I \propto \frac{1}{r^2}$).

La retina y el tímpano son superficies de captación de energía, y cuanto menor es la energía distribuida por ellas, más débil es la sensación percibida. En el caso del estallido hay una cierta cantidad de energía que se distribuye uniformemente por una porción esférica del espacio, y el radio de esta esfera aumenta a la velocidad del sonido, unos 330 metros por segundo (m/s). Un segundo después de aparecer el foganazo la esfera tendrá unos 330 metros de radio (r), lo que significa que la energía del estallido estará repartida por una superficie esférica de $4\pi r^2$, es decir, aproximadamente 1,4 millones de metros cuadrados. Si suponemos que la superficie del tímpano humano es de 1 cm^2 , es decir, $0,0001 \text{ m}^2$, se comprueba que, como mucho, podremos oír una fracción equivalente a $0,0001/1,4 \text{ millones} = 7,3 \times 10^{-11}$ (aproximadamente una billonésima parte, 10^{-12}) del sonido original.

Un segundo más tarde el radio de la esfera se ha doblado y la superficie se ha multiplicado por 4. A esa distancia oiríamos solo un cuarto de la billonésima parte (es decir, $0,25 \times 10^{-12}$) del sonido original. Tres segundos después del suceso el nivel sonoro habrá disminuido hasta un noveno de la billonésima parte, y así sucesivamente. Vemos así que, con un aumento lineal de la distancia, la intensidad del sonido disminuye proporcionalmente al cuadrado (una *ley del inverso del cuadrado*).

Lo anterior puede que parezca extraño, porque un rayo a un kilómetro de distancia no nos parece mucho más estruendoso ni luminoso que otro a dos kilómetros. La explicación es que nuestros sistemas sensoriales han evolucionado de manera que un gran aumento en la energía de un estímulo no provoca un aumento proporcional en la sensación producida. Un sonido dos veces más potente solo se percibe como aproximadamente un 10 % más fuerte, y lo mismo es cierto (de manera aproximada) para la luz. Y para los aromas, los gustos y otras sensaciones rigen leyes parecidas. Este maravilloso sistema nos permite percibir un amplio espectro de niveles de luz y de sonido sin que los más intensos nos cieguen o ensordezcan; pero, por otro lado, hace que el ojo y el oído sean instrumentos muy deficientes para medir los niveles absolutos de energía luminosa y sonora (lo cual tampoco resulta sorprendente, porque tales medidas no tienen ningún valor de supervivencia, salvo quizás para los físicos).

Hasta ahora no hemos sido muy precisos en el uso de los términos «sonido» y «sonoro», que pueden significar cosas muy diferentes. Un micrófono mide el *nivel*

de presión sonora o acústica del campo de energía, que está relacionado de una manera laxa y complicada con el *volumen* del sonido, que es la sensación que provoca en nosotros el campo de energía. Todos estos términos se explicarán en el capítulo 3.

En realidad la propagación esférica es poco frecuente. Primero, porque pocas fuentes emiten la luz o el sonido en todas las direcciones (las linternas son fuertemente direccionales, igual que las voces, como lo demuestra lo difícil que es oír lo que dice una persona cuando está vuelta de espaldas, sobre todo al aire libre, sin superficies delante que reflejen el sonido). Y segundo, en el caso de fuentes situadas al aire libre, la energía se propaga en hemisferios, no en esferas (debido a la reflexión en la superficie de la Tierra), y por tanto los niveles de brillo o de sonido disminuyen aproximadamente la mitad de deprisa que en la propagación esférica (*muy* aproximadamente; en la práctica, la mayoría de las superficies absorben bastante bien el sonido y la luz, lo cual aumenta la tasa de disminución).

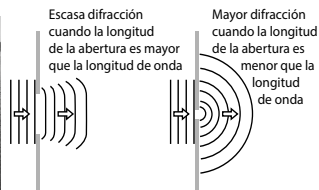
La propagación hemisférica es también característica de las ondas sonoras subacuáticas en aguas profundas, porque experimentan una fuerte reflexión en el fondo marino. En aguas poco profundas, las ondas sonoras están limitadas tanto por arriba como por abajo, por lo cual solo pueden propagarse en círculos. En este caso, por un argumento parecido al de las superficies esféricas, la tasa de disminución de la energía es proporcional solo a la distancia recorrida, no a su cuadrado. Además, la presencia de valores de temperatura casi constantes a diferentes profundidades oceánicas significa que esta

clase de efecto de emparedado ocurre en el interior de las aguas, no entre la superficie y el lecho oceánico.

En un tubo, en un pasillo o en una fibra, las ondas están aún más restringidas y solo pueden viajar en una o dos direcciones. En estos casos, la atenuación del sonido no se produce geoméricamente; el sonido solo se extingue debido a la *absorción* por el medio que atraviesa y por interacción con las paredes. La *absorción* es una cuestión compleja sobre la que volveremos al hablar de los diferentes tipos de ondas en capítulos posteriores.

Difracción e interferencia

La mayoría de los fenómenos complejos relacionados con las ondas surgen por su interacción con obstáculos, y uno de los fenómenos más conocidos es su tendencia a doblar las esquinas, principal razón de que podamos oír cosas que quedan fuera de la línea visual. Este efecto se llama *difracción* y lo exhiben la mayoría de las ondas. En presencia de una obstrucción, como puede ser un banco de arena, un observador en lo alto de un acantilado vería cómo las ondas se propagan alrededor de los bordes del banco, hacia la zona en calma situada detrás (véase la Figura 3).



3. Difracción de ondas.

1. Las ondas, en esencia

Aparte de con obstáculos, las ondas pueden interactuar también unas con otras; si las crestas de dos ondas de agua coinciden en un punto, el resultado será una cresta más alta (*interferencia constructiva*), mientras que si una cresta coincide con un valle, se producirá un efecto de cancelación (*interferencia destructiva*). Estos efectos de interferencia se pueden observar en el mar y son muy evidentes cuando las ondas se encuentran perpendicularmente. En ese caso se llaman *olas cuadradas* o *mar cruzado* (Figura 4).



4. Olas cuadradas.

En un *patrón de interferencia* como este, las crestas y valles reforzados y las zonas planas solo existen mientras las ondas progenitoras se están realmente cruzando; cuando las ondas se mezclan, no forman nuevas ondas per-

manentes sino que conservan su identidad original. Es lo que se denomina el *principio de superposición*, que es de gran importancia práctica: explica por qué, cuando oímos palabras o música, seguimos oyendo las notas, palabras o instrumentos individuales, aunque las ondas sonoras que las componen se encuentran en el mismo lugar (es decir, en el tímpano) en el mismo momento. Es algo muy diferente de lo que ocurre con los colores, al menos en lo que a la percepción se refiere: en la luz blanca no hay ningún indicio de que contiene todos los colores del arcoíris.

Ondas longitudinales

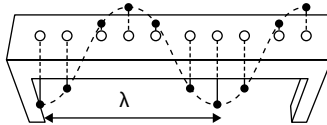
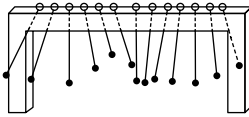
No todas las ondas están compuestas de partículas que describen trayectorias aproximadamente circulares, como ocurre en las olas. En las ondas *longitudinales* las partículas del medio se mueven hacia adelante y hacia atrás en la misma dirección que la onda. En las ondas *transversales* el medio se mueve perpendicularmente a la onda. En algunas ondas transversales el medio se mueve hacia arriba y hacia abajo, en otras de un lado a otro, o diagonalmente (desde el punto de vista de alguien que está mirando en la dirección de propagación de la onda). La dirección de oscilación del medio se denomina la *polarización* de la onda; una onda transversal en la que el medio se mueve hacia arriba y hacia abajo se dice que está polarizada verticalmente.

El ejemplo más familiar de una onda longitudinal es el sonido, pero para hacerse una idea más clara de cómo funcionan las ondas longitudinales lo más sencillo es pen-

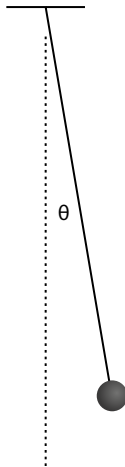
sar en una larga fila de péndulos, cada uno de ellos unido a sus vecinos por un muelle. Si se hace oscilar uno de los péndulos, este transferirá su movimiento a los vecinos. Si los muelles son poco rígidos (como una especie de *slinkys*), el movimiento de cada péndulo tardará bastante en transferirse a su vecino, porque el muelle tardará un tiempo en absorber la parte floja antes de que su extremo lejano empiece a moverse. Con un muelle muy rígido, el extremo lejano empezará a moverse casi al mismo tiempo que el extremo próximo, de manera que la transmisión del movimiento de un péndulo a otro será muy rápida (si los muelles fuesen completamente rígidos, al mover uno de los péndulos se moverían prácticamente al instante todos los demás). Estos ejemplos muestran que la velocidad de una onda aumenta con la rigidez del medio: por eso las ondas sonoras se propagan varias veces más deprisa en los metales que en los líquidos. En un medio poco rígido como la goma blanda, la velocidad del sonido puede llegar a ser tan baja como 40 m/s, aproximadamente la de un automóvil a buena velocidad.

En nuestra fila de péndulos podemos definir la longitud de onda como la distancia entre péndulos que se hallan en el mismo estado de movimiento. Ese estado podemos definirlo como la máxima posición a la izquierda, o la vertical, o la máxima posición a la derecha, o lo que queramos; en la Figura 5 se han seleccionado dos péndulos situados, dentro de su oscilación, en el punto más próximo al observador. La amplitud de la onda es la máxima distancia que se mueve el péndulo a partir de su posición de reposo (la vertical) (Figura 6).

Ondas



5. Una serie de péndulos en oscilación, vistos desde dos ángulos. La longitud de onda (λ) es la distancia entre dos péndulos que se encuentran en el mismo estado de movimiento.



6. La amplitud de un péndulo es el máximo ángulo formado por la varilla con la vertical.

Las partículas (moléculas, átomos o iones) de un sólido se comportan más o menos como péndulos: se pue-

den mover, pero no pueden cambiar de lugar. Si se las golpea, se desplazarán hacia un lado y volverán después al opuesto pasando por el punto de equilibrio, para luego volver al otro lado, y así sucesivamente.

En los líquidos y gases el efecto es muy parecido, a pesar de que las moléculas no están unidas permanentemente a sus vecinas. Es lo mismo que un saltador de trampolín que cae de plano en la piscina y comprueba con disgusto que el agua tarda un poco en dar paso a objetos que se mueven rápidamente: una molécula desplazada a un lado por un pulso de presión ve cómo su avance es detenido abruptamente, así que en lugar de desplazarse muy lejos pone brevemente en movimiento a sus vecinas. En la mayoría de los casos son grupos enteros de moléculas lo que se pone en movimiento, de manera que se puede hablar de ondas compuestas de regiones de alta y baja presión.

Pero hay una diferencia fundamental entre las ondas en sólidos y las ondas en fluidos. En los fluidos, una vez que las moléculas se ven desplazadas a un lado y rebotan luego hacia atrás, estas seguirán desplazándose en cualquier dirección. En los sólidos, una molécula desplazada a un lado tenderá a volver a su posición original (es como si «recordara» esa posición), lo cual significa que los sólidos pueden soportar oscilaciones laterales (*transversales*, o *de cizalla*), hecho que es de suma importancia para los sismólogos (capítulo 4).

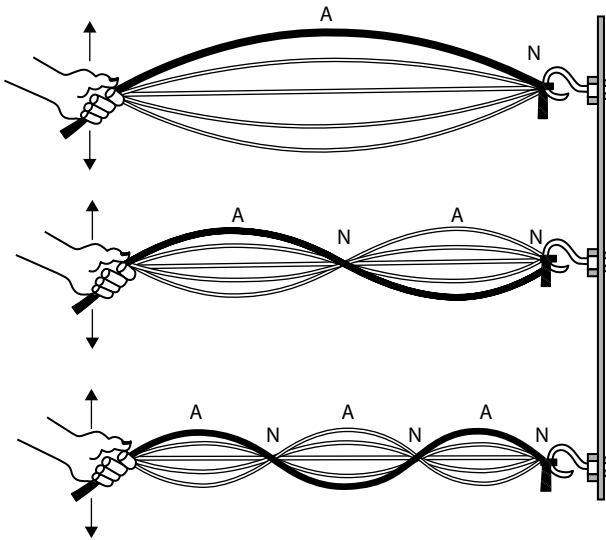
Ondas transversales

Con una cuerda tensa de algunos metros de longitud es fácil generar ondas transversales. Si atamos uno de los cabos a un palo vertical y sacudimos rápidamente el otro extremo hacia arriba y hacia abajo, podemos lograr un estado en el que el centro de la cuerda ejecuta un movimiento muy amplio mientras que el cabo que sostenemos en la mano apenas muestra tendencia a moverse. Si aumentamos la velocidad de sacudida, podemos llegar a crear un patrón diferente en el que el centro de la cuerda apenas se mueve mientras que los dos puntos situados a un cuarto y tres cuartos describen un amplio movimiento. Los puntos que describen movimientos amplios se llaman *antinodos*, y *nodos* los que son casi estacionarios (incluido el cabo que sostenemos en la mano y el que está atado al palo). Con suficiente esfuerzo y habilidad podemos llegar a formar tres antinodos (Figura 7). Como los antinodos ocupan posiciones fijas, las ondas que hemos creado se llaman *ondas estacionarias*. Su velocidad de fase es cero.

De estos tres ejemplos, el segundo, el de los dos antinodos, es una onda completa, cuya longitud es la longitud de la cuerda entera. En el primer caso la cuerda contiene solo la mitad de una onda, y en el tercero, una onda y media.

Las ondas estacionarias son importantes en muchos campos de la física. Ondas estacionarias de sonido se pueden producir cantando dentro de una habitación pequeña de paredes duras y paralelas, por ejemplo un cuarto de baño. Cantando tonos de diversas alturas se comprueba que algunos suenan especialmente fuertes y claros,

1. Las ondas, en esencia



7. Ondas, nodos y antinodos en una cuerda.

que es cuando las ondas sonoras correspondientes miden justo dos veces la distancia entre las paredes y/o el suelo, o alguna fracción simple de esa longitud. Si la habitación tiene tres metros de ancha, la frecuencia más baja (o *fundamental*) que es reforzada estará alrededor de 50 Hz, un tono que lo puede producir sin dificultad una voz de bajo. Las frecuencias de 100 Hz, 150 Hz, etc., también son reforzadas; se llaman *armónicos*.

Estas frecuencias privilegiadas se conocen con el nombre de *resonancias*. Los instrumentos musicales son fundamentalmente objetos con longitudes que, excitadas al golpearlas o al soplar en ellas, resuenan. Los problemas de diseño consisten en producir solamente las resonan-