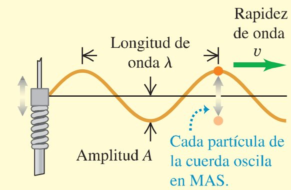
# CAPÍTULO 15 RESUMEN

**Ondas y sus propiedades:** Una onda es cualquier perturbación con respecto a una condición de equilibrio que se propaga de una región a otra. Una onda mecánica siempre viaja dentro de un material llamado medio. La perturbación ondulatoria se propaga con la rapidez de onda $v$, que depende del tipo de onda y de las propiedades del medio.

En una onda periódica, el movimiento de cada punto del medio es periódico. Una onda senoidal es una onda periódica especial, donde todos los puntos tienen movimiento armónico simple. La frecuencia $f$ de cualquier onda periódica es el número de ciclos por unidad de tiempo, el periodo $T$ es el tiempo que dura un ciclo, la longitud de onda $\lambda$ es la distancia en la que se repite el patrón de la onda, y la amplitud $A$ es el desplazamiento máximo de una partícula en el medio. El producto de $\lambda$ y $f$ es igual a la rapidez de la onda. (Véase el ejemplo 15.1.)

$$v = \lambda f \qquad (15.1)$$




**Funciones de onda y dinámica de onda:** La función de onda y($x$, $t$) describe los desplazamientos de partículas individuales del medio. Las ecuaciones (15.3), (15.4) y (15.7) dan la ecuación de una onda senoidal que viaja en la dirección $+x$. Si la onda se mueve en la dirección $-x$, el signo menos de las funciones coseno se cambia por un signo más. (Véase el ejemplo 15.2.)

La función de onda debe obedecer una ecuación diferencial parcial llamada ecuación de onda, ecuación (15.12).

La rapidez de una onda transversal en una cuerda depende de la tensión $F$ y de la masa por unidad de longitud $\mu$. (Véase el ejemplo 15.3.)

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(\frac{x}{v} - t\right)\right]$$

$$= A\cos 2\pi f\left(\frac{x}{v} - t\right) \qquad (15.3)$$

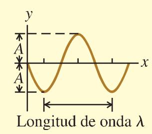
$$y(x,t) = A\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) \qquad (15.4)$$

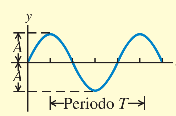
$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t) \qquad (15.7)$$

donde $k = 2\pi/\lambda$ y $\omega = 2\pi f = vk$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \qquad (15.12)$$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{(ondas en una cuerda)} \qquad (15.13)$$




**Potencia de onda:** El movimiento ondulatorio transporta energía de una región a otra. En el caso de una onda mecánica senoidal, la potencia media $P_{med}$ es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda y al cuadrado de la frecuencia. En el caso de ondas que se propagan en tres dimensiones, la intensidad de la onda $I$ es inversamente proporcional a la distancia de la fuente. (Véanse los ejemplos 15.4 y 15.5.)

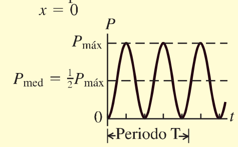
$$P_{med} = \frac{1}{2}\sqrt{\mu F}\,\omega^2 A^2 \qquad (15.25)$$

(potencia media, onda senoidal)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad (15.26)$$

(ley del inverso del cuadrado para la intensidad)

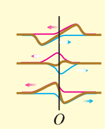
Potencia de onda contra tiempo $t$ en la coordenada $x = 0$




**Superposición de ondas:** Una onda que llega a una frontera del medio de propagación se refleja. El principio de superposición indica que el desplazamiento de onda total en cualquier punto donde se traslapan dos o más ondas es la suma de los desplazamientos de las ondas individuales.

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) \qquad (15.27)$$

(principio de superposición)



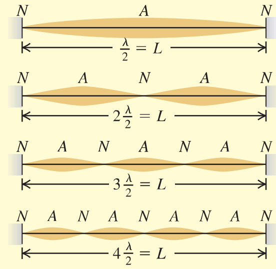
**Ondas estacionarias sobre una cuerda:** Cuando una onda senoidal se refleja de un extremo fijo o libre de una cuerda estirada, las ondas incidente y reflejada se combinan para formar una onda senoidal estacionaria que contiene nodos y antinodos. Dos nodos adyacentes están separados una distancia $\lambda/2$, lo mismo que dos antinodos adyacentes. (Véase el ejemplo 15.6.)

Si ambos extremos de una cuerda con longitud $L$ están fijos, sólo puede haber ondas estacionarias si $L$ es un múltiplo entero de $\lambda/2$. Cada frecuencia y su patrón de vibración asociado se denomina modo normal. La frecuencia más baja $f_1$ es la frecuencia fundamental. (Véanse los ejemplos 15.7 y 15.8.)

$$y(x, t) = (A_{SW}\,\mathrm{sen}\,kx)\,\mathrm{sen}\,\omega t \qquad (15.28)$$
(onda estacionaria en una cuerda, extremo fijo en $x = 0$)

$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1 \;\; (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (15.33)$$

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (15.35)$$
(cuerda fija en ambos extremos)




## Términos clave

onda mecánica, *488*
medio, *488*
onda transversal, *488*
onda longitudinal, *488*
rapidez de la onda, *489*
onda periódica, *489*
onda senoidal, *489*
longitud de onda, *490*
función de onda, *492*
número de onda, *493*
fase, *494*
ecuación de onda, *497*
intensidad, *504*
interferencia, *505*
condición de frontera, *506*
principio de superposición, *506*
nodo, *508*
antinodo, *508*
onda estacionaria, *508*
onda viajera, *508*
interferencia destructiva, *509*
interferencia constructiva, *509*
frecuencia fundamental, *512*
armónicos, *512*
serie armónica, *512*
sobretono, *512*
modo normal, *512*
contenido armónico, *513*

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

La potencia de una onda mecánica depende de su frecuencia y su amplitud [véase la ecuación (15.25)].

## Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

**15.1 Respuesta: i)** La “ola” viaja horizontalmente de un espectador al siguiente en cada fila del estadio, pero el desplazamiento de cada espectador es verticalmente hacia arriba. Puesto que el desplazamiento es perpendicular a la dirección en que viaja la onda, la onda es transversal.

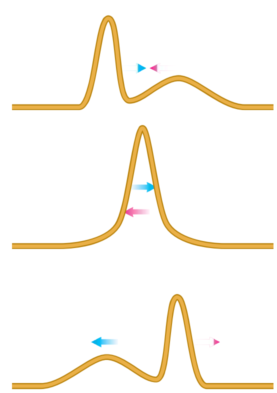
**15.2 Respuesta: iv)** La rapidez de las ondas en una cuerda, $v$, no depende de su longitud de onda. Podemos rescribir la relación $v = \lambda f$ como $f = v/\lambda$, la cual nos indica que si se duplica la longitud de onda $\lambda$, la frecuencia $f$ se reduce a la mitad.

**15.3 Respuestas: a. $\frac{2}{8}\,T$, b. $\frac{4}{8}T$, c. $\frac{5}{8}T$** Puesto que la onda es senoidal, cada punto en la cuerda oscila en movimiento armónico simple (MAS). Puesto que podemos aplicar todas las ideas del capítulo 13 acerca del MAS a la onda descrita en la figura 15.8. *a*) Una partícula en MAS tiene su rapidez máxima cuando pasa por la posición de equilibrio ($y = 0$ en la figura 15.8). La partícula en el punto $A$ se mueve hacia arriba por tal posición en $t = \frac{2}{8}T$. *b*) En MAS vertical la aceleración máxima *hacia arriba* ocurre cuando una partícula está en su desplazamiento máximo *hacia abajo*. Esto sucede para la partícula en el punto $B$ en $t = \frac{4}{8}T$. *c*) Una partícula en MAS vertical tiene una aceleración *hacia abajo* cuando su desplazamiento es *hacia arriba*. La partícula en $C$ tiene un desplazamiento hacia arriba y se mueve hacia abajo en $t = \frac{5}{8}T$.

**15.4 Respuesta: iii)** La relación $v = \sqrt{F/\mu}$ [ecuación (15.13)] indica que la rapidez de onda es máxima en una cuerda con densidad lineal de masa mínima. Ésa es la cuerda más delgada, que tiene menor masa $m$ y, por lo tanto, menor densidad lineal de masa $m = \mu/L$ (todas las cuerdas tienen la misma longitud).

**15.5 Respuesta: iii), iv), ii), i)** La ecuación (15.25) indica que la potencia media es una onda senoidal en una cuerda es $P_{med} = \frac{1}{2}\sqrt{\mu F}\,\omega^2 A^2$. Las cuatro cuerdas son idénticas, así que todas tienen la misma masa, la misma longitud y la misma densidad de masa lineal $\mu$ la frecuencia $f$ es la misma para cada onda, como la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$. Por lo tanto, la potencia de onda media para cada cuerda es proporcional a la raíz cuadrada de la tensión de la cuerda $F$ y el cuadrado de la amplitud $A$. En comparación con la cuerda i) la potencia media en cada cuerda es iii) $\sqrt{4} = 2$ veces mayor; ii) $4^2 = 16$ veces mayor; y iv) $\sqrt{2}\,(2)^2 = 4\sqrt{2}$ veces mayor.

**15.6 Respuesta:**



# CAPÍTULO 16 RESUMEN

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

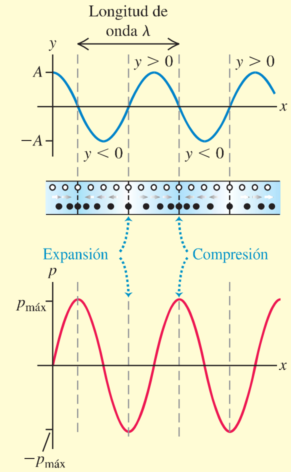
La rapidez de una onda sonora en un fluido depende del módulo volumétrico $B$ y densidad $\rho$. Si el fluido es un gas ideal, la rapidez puede expresarse en términos de la temperatura $T$, la masa molar $M$ y la razón de las capacidades caloríficas $\gamma$ del gas. La rapidez de las ondas longitudinales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

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

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad (16.7)$$
(onda longitudinal en un fluido)

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \qquad (16.10)$$
(onda sonora en un gas ideal)

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \qquad (16.8)$$
(onda longitudinal en una varilla sólida)

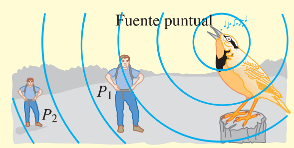



**Intensidad y nivel de intensidad de un sonido:** La intensidad $I$ de una onda sonora es la rapidez media con que transporta energía por unidad de área. Para una onda senoidal, la intensidad puede expresarse en términos de la amplitud de desplazamiento $A$ o la amplitud de presión $p_{\text{máx}}$.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

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

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\rho B}\,\omega^2 A^2 = \frac{p_{\text{máx}}^{\,2}}{2\rho v} = \frac{p_{\text{máx}}^{\,2}}{2\sqrt{\rho B}} \qquad (16.12), (16.14)$$
(intensidad de una onda sonora senoidal)

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

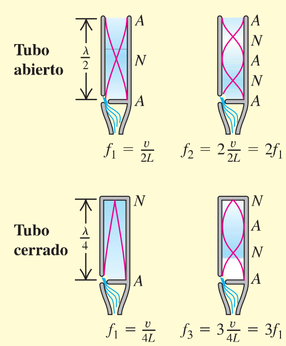



**Ondas sonoras estacionarias:** Se pueden establecer ondas sonoras estacionarias en un tubo. Un extremo cerrado es un nodo de desplazamiento y un antinodo de presión; un extremo abierto es un antinodo de desplazamiento y un nodo de presión. En el caso de un tubo de longitud $L$ abierto por ambos extremos,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

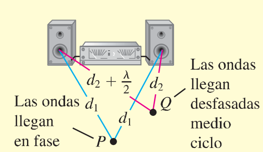
Se puede forzar al aire en un tubo, o a cualquier sistema de modos normales, a oscilar con cualquier frecuencia. Se presenta una respuesta máxima, o resonancia, si la frecuencia impulsora es cercana a una de las frecuencias de modo normal del sistema. (Véase el ejemplo 16.13.)

$$f_n = \frac{nv}{2L} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (16.18)$$
(tubo abierto)

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



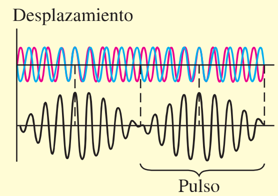

**Interferencia:** Si dos o más ondas se traslapan en la misma región del espacio, los efectos resultantes se llaman interferencia. La amplitud resultante puede ser mayor o menor que la de cada onda individual, dependiendo de si las ondas están en fase (interferencia constructiva) o desfasadas (interferencia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



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

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

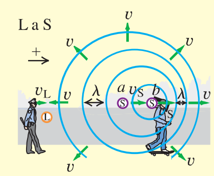
(frecuencia del pulso)




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

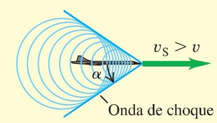
$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_S} f_S \qquad (16.29)$$

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




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

$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{v}{v_S} \qquad (16.31)$$




## Términos clave

sonido, *527*
gama audible, *527*
ultrasónico, *528*
infrasónico, *528*
amplitud de desplazamiento, *528*
amplitud de presión, *529*
volumen, *531*
tono, *531*
timbre, *532*
ruido, *532*
nivel de intensidad de sonido, *539*
decibel, *539*
nodo de desplazamiento, *541*
antinodo de desplazamiento, *541*
nodo de presión, *542*
antinodo de presión, *542*
resonancia, *546*
curva de resonancia, *547*
pulsos, *551*
frecuencia del pulso, *551*
efecto Doppler, *552*
*supersónico, *558*
*onda de choque, *558*
*número de Mach, *558*

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

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

## Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

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

**16.2 Respuesta: i)** Por la ecuación (16.7), la rapidez de las ondas longitudinales (sonido) en un fluido es $v = \sqrt{B/\rho}$. Podemos rescribir esto para obtener una expresión del módulo de volumen $B$ en términos de la densidad de fluido $\rho$ y la rapidez del sonido $v$: $B = \rho v^2$. A 20 °C la rapidez del sonido en el mercurio es ligeramente menor que en el agua (1451 m/s contra 1482 m/s); sin embargo, la densidad del mercurio es mayor que la del agua por un factor grande (13.6). De esta manera, el módulo de volumen del mercurio es mayor que el del agua en un factor de $(13.6)(1451/1482)^2 = 13.0$.

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

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

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