UNIDAD 2

Las ondas

Temas de la unidad

1. Propagación de las ondas
2. Fenómenos ondulatorios

Para pensar…

Es muy probable que alguna vez hayas estado largo tiempo observando las ondas producidas sobre la superficie del agua en un estanque, al lanzar un objeto o caer una gota sobre ella; o quizás el movimiento de las olas del mar. Un espectáculo entre mágico y misterioso que sin importar la edad nos atrae.

La mayoría de los fenómenos físicos, como el sonido, la luz y los sismos, se producen porque algo que vibra en algún lugar, genera ondas que viajan por un medio material o por el espacio. En este mismo instante miles de ondas de radio, de televisión, de radiación ultravioleta y pequeñas vibraciones sísmicas circulan a nuestro alrededor.

Las comodidades con las que contamos en nuestra cotidianidad, como la Internet, la telefonía móvil, la televisión por cable, el horno microondas, los teléfonos inalámbricos, entre otras, se deben a la aplicación, comprensión y buen uso que el hombre ha logrado del movimiento ondulatorio.

Por ello, en esta unidad estudiaremos la propagación de las ondas y los fenómenos que suceden cuando estas cambian de medio, encuentran obstáculos o se superponen con otras ondas.

Para responder…

- ¿Qué fenómenos físicos generan ondas?
- ¿Qué otros fenómenos conoces que producen ondas?
- ¿Cómo puedes producir una onda? Nombra un ejemplo.

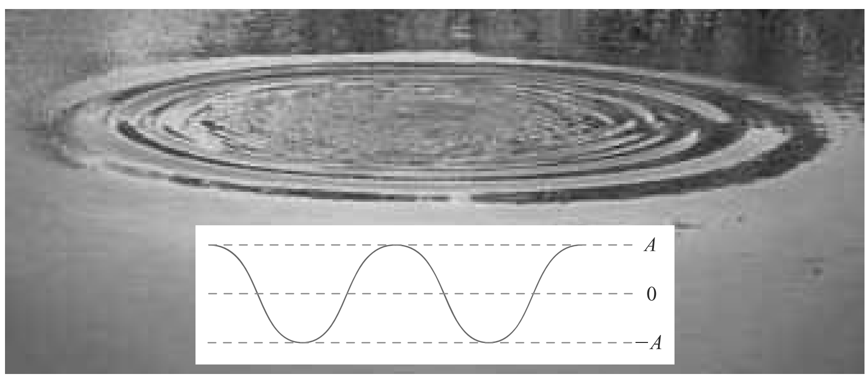
Figura 1. En el estadio las personas son el medio a través del cual se propaga la onda.

1. Propagación de las ondas

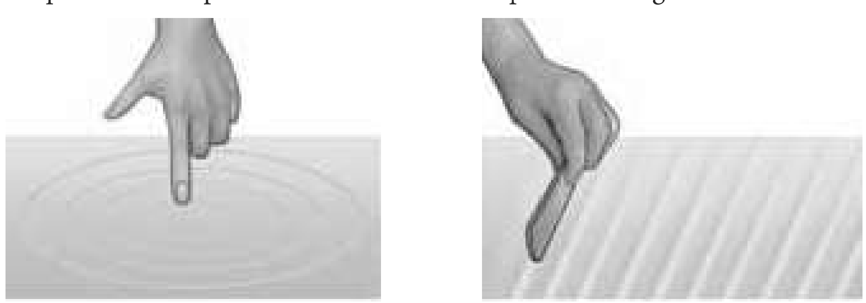
1.1 Formación de las ondas

En la figura 1 se aprecia una ola realizada por los espectadores de un partido de fútbol. Al levantarse una persona de su silla y volverse a sentar, realiza un movimiento vertical, que es imitado por las personas situadas a su alrededor. Este movimiento, que es propagado por los asistentes al estadio, se transfiere perpendicularmente al movimiento que realiza cada persona. El movimiento que realiza cada persona en el estadio se denomina *pulso*.

Un caso similar a esta situación ocurre con la caída de una gota sobre la superficie del agua en un estanque. La gota produce una perturbación en el agua, que se propaga hasta la orilla del estanque, en círculos concéntricos. Aunque esta propagación se mueve con determinada velocidad, las partículas de agua no avanzan, simplemente se mueven hacia arriba y hacia abajo con respecto al punto de equilibrio. En la siguiente figura se puede observar la propagación de una perturbación en la superficie del agua (a) y un corte transversal de la misma (b).



De manera similar se pueden producir perturbaciones en la cuales las ondas se propagan en pulsos rectos; por ejemplo, al golpear suavemente la superficie del estanque con el borde de una regla. En la siguiente figura se ilustra una manera simplificada de representar las ondas en la superficie del agua.



Las líneas que se observan en la figura unen todos los puntos de la superficie del agua que se encuentran, en ese instante, en el mismo estado de vibración. Cada una de estas líneas se denomina *frente de onda*. Cuando la propagación sucede a lo largo de la superficie del medio, se producen *frentes de onda planos*. Si se presenta una perturbación en un punto de la superficie del medio, se generan *frentes de onda circulares*.

Estos movimientos que se producen a través de un medio material de propagación se denominan *movimientos ondulatorios*. En un movimiento ondulatorio se difunde energía entre dos puntos del medio sin que haya transporte de materia.

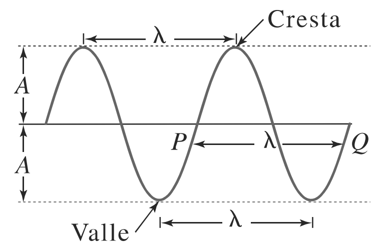


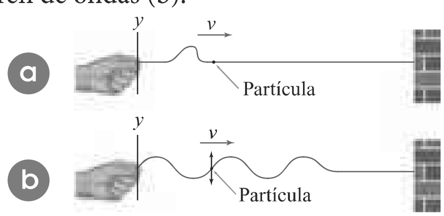
Figura 2. Los puntos *P* y *Q* de la onda están en fase.

Según el medio de propagación, las ondas se clasifican en ondas mecánicas y ondas electromagnéticas.

- *Ondas mecánicas:* las ondas mecánicas difunden energía a través de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso). Por ejemplo, las ondas en las cuerdas, en el agua y las sonoras.
- *Ondas electromagnéticas:* las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío. Difunden energía por las oscilaciones de campos eléctricos y campos magnéticos. Por ejemplo, la luz, la radiación ultravioleta y los rayos X.

1.2 Ondas periódicas

Al tomar una cuerda estirada y aplicarle un movimiento vertical en uno de sus extremos, se genera un pulso que viaja a través de la cuerda. Cada partícula de la cuerda permanece en reposo hasta cuando el pulso llega hasta ella, donde se mueve durante un instante y regresa al reposo (como se muestra a continuación en la parte a de la figura). Si se mantiene constante el movimiento en el extremo de la cuerda, la propagación a lo largo de la cuerda será periódica y producirá un tren de ondas (b).



Cuando la perturbación local que origina la onda se produce en ciclos repetitivos, se dice que la onda es *periódica*. Si el movimiento de la perturbación es armónico simple y no existe amortiguamiento, la onda que se propaga se denomina *onda armónica.*

Para estudiar los fenómenos relacionados con movimientos ondulatorios se pueden hacer representaciones de las ondas, como la que se muestra en la figura 2.

En ella se observan las siguientes características:

- *La longitud de onda (λ)*: es la distancia entre dos puntos en los que empieza a repetirse al movimiento; por ejemplo, entre dos crestas (puntos altos de la onda) o entre dos valles (puntos bajos de la onda). Cuando la onda se propaga, hay puntos, como *P* y *Q* (figura 2), que en todo instante tienen el mismo estado de vibración, es decir, están en fase.
- *La amplitud de onda (A):* es la distancia máxima que alcanza una partícula con respecto a su posición de equilibrio.
- *La frecuencia (f):* es el número de ondas generadas en la unidad de tiempo. Al igual que en el movimiento armónico simple, su unidad en el SI es el hercio (Hz).
- *El período (T):* es el tiempo en el cual se produce una onda, que coincide con el tiempo que tarda un punto en dar una vibración completa.
- La *velocidad de propagación (v):* es la velocidad con la que se desplaza la perturbación por el medio. Depende de la elasticidad y de la rigidez del medio.

EJERCICIO

Si la velocidad de una onda es de 36 km/h y su frecuencia es de 2 Hz, determina la longitud de onda en centímetros.

Como la onda se desplaza una longitud de onda λ en el tiempo de un período T, la velocidad de propagación es constante y se expresa:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

En todos los movimientos periódicos el período y la frecuencia se relacionan de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{f}$$

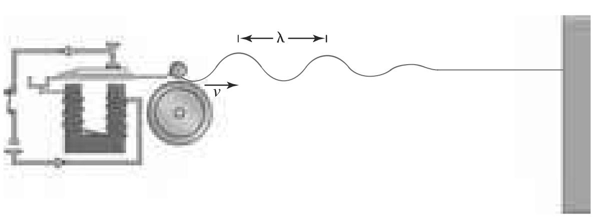
Al remplazar esta expresión en la ecuación de velocidad de propagación, obtenemos que la velocidad de propagación es:

$$v = \lambda \cdot f$$

Por lo tanto, la velocidad de propagación de las ondas, en todas las direcciones, tiene el mismo valor y su magnitud depende del medio de propagación. Por ejemplo, las ondas sonoras se propagan en el agua a una velocidad de 1.500 m/s y en el aire a 340 m/s.

EJEMPLOS

1. **Una placa vibrante de un timbre eléctrico está unida a una cuerda por su extremo libre, tal como se muestra en la figura. Al sonar la campanilla, la placa empieza a vibrar con una frecuencia de 20 Hz, dando origen a una onda de amplitud 1 cm. Si la onda se propaga en la cuerda con una longitud de onda de 44 cm, determinar:**
   a. La velocidad de propagación de la onda.
   b. Esta velocidad si su amplitud se reduce a la mitad.
   c. ¿Qué condiciones deben cambiar para que en la cuerda se produzca una longitud de onda de 22 cm?



Solución:

a. La velocidad de propagación se calcula por:

$v = 0{,}44\ \text{m} \cdot 20\ \text{s}^{-1}$ *Al remplazar*

$v = 8{,}8\ \text{m/s}$ *Al calcular*

El movimiento ondulatorio se propaga con una velocidad de 8,8 m/s.

b. Al analizar la ecuación de velocidad de propagación notamos que, para un mismo medio, la amplitud de la onda no influye. Cada parte de la cuerda vibrará con menos energía, pero se propagará con la misma velocidad, es decir, $v = 8{,}8$ m/s.

c. Como el medio de propagación de la onda es la misma cuerda, su velocidad no cambia. Por lo tanto:

$v = \lambda \cdot f$

$f = \frac{v}{\lambda}$ *Al despejar f*

$f = \frac{8{,}8\ \text{m/s}}{0{,}22\ \text{m}} = 40\ \text{Hz}$ *Al remplazar y calcular*

En un mismo medio de propagación, la longitud de la onda se reduce a la mitad si la fuente de vibración duplica la frecuencia, para este caso: 40 Hz.

2. **La emisora de radio favorita de Gustavo tiene una frecuencia de 88,9 MHz. Calcula la longitud de onda si esta se propaga en el aire con velocidad igual a 300.000 km/s.**

Solución:

La longitud de onda se calcula por medio de la ecuación $v = \lambda \cdot f$; se despeja: $\lambda = \frac{v}{f}$

Por lo tanto: $l = \frac{3\ 3\ 10^{8}\ \text{m/s}}{88{,}9\ 3\ 10^{6}\ \text{s}^{-1}} = 3{,}38\ \text{m}$

La longitud de onda de la emisora es 3,38 metros.

1.3 Ondas longitudinales y transversales

La dirección de propagación de una onda puede ser paralela o perpendicular a la dirección del movimiento de las partículas del medio en el que se propaga. De acuerdo con esto, existen dos tipos de ondas: longitudinales y transversales.

Figura 3. Onda longitudinal producida en un resorte al hacer oscilar uno de sus extremos en la misma dirección del resorte.

Definición

Las ondas longitudinales son aquellas en las que las partículas del medio oscilan en dirección paralela a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio.

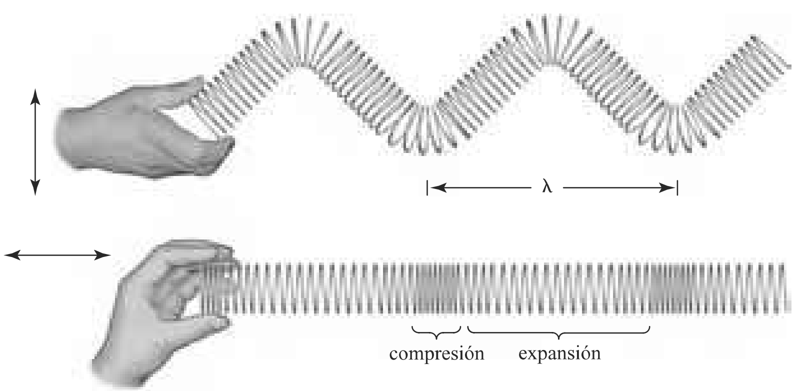
Una onda longitudinal siempre es mecánica y se debe a las sucesivas compresiones (estados de máxima densidad y de presión) y expansiones (estados de mínima densidad y de presión) del medio. Son ejemplos de ondas longitudinales las producidas por un resorte cuando se hace oscilar uno de sus extremos en la misma dirección del resorte (figura 3) y las de sonido.

Definición

Las ondas transversales son aquellas en las que las partículas del medio oscilan en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio.

Las ondas generadas en un estanque de agua, las generadas en la cuerda, o las ondas electromagnéticas son ejemplos de las ondas transversales.

En la siguiente figura se indica la asociación entre las compresiones y las expansiones de una onda longitudinal en relación con las crestas y los valles de una onda transversal.



Algunos movimientos ondulatorios, como las olas marinas y las ondas sísmicas son combinaciones de ondas longitudinales y transversales. Por ejemplo, cuando una onda marina viaja sobre la superficie del agua, las moléculas de agua se mueven en trayectorias casi circulares, dibujando una serie de crestas y valles. Cuando la onda pasa, las moléculas de agua en las crestas se mueven en la dirección de la onda y las moléculas en los valles se mueven en dirección contraria. Por lo tanto, no hay desplazamientos de las moléculas de agua después de pasar cierto número de ondas completas.

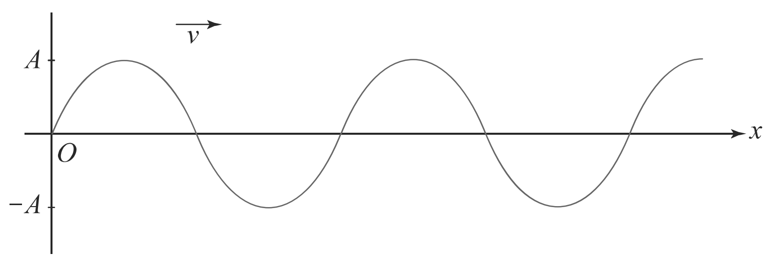
1.4 Función de onda

Hasta el momento se han analizado muchas características de las ondas, como la rapidez, el período, la frecuencia y la longitud de onda, pero es necesario hacer una descripción más detallada de las posiciones y movimientos de las partículas. Para ello realizaremos un análisis matemático de las mismas por medio de una función denominada función de onda.

Definición

La función de onda es una expresión que permite obtener la posición (y) de una partícula del medio con respecto a su posición de equilibrio (x), para cualquier instante de tiempo (t), es decir, $y = f(x, t)$.

La siguiente figura representa una cuerda larga y tensa, en la dirección del eje Ox, por medio de la cual se propaga una onda.



Cada partícula de la cuerda oscila con un MAS de la misma amplitud y frecuencia, pero las oscilaciones de las partículas en diferentes puntos no se coordinan entre sí.

El desplazamiento de una partícula en el extremo izquierdo de la cuerda ($x = 0$), donde se origina la onda, está dado por la expresión:

$$y = A \cdot \text{sen}\ \omega \cdot t$$

como, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, al remplazar tenemos que:

$$y = A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot t$$

donde A es la amplitud del MAS. Como la onda se ha propagado con velocidad v, el tiempo transcurrido empleado en este recorrido es x/v. Así, el movimiento del punto x en un instante t es el mismo que el movimiento del punto $x = 0$ en el instante anterior $t - x/v$. En consecuencia, el desplazamiento del punto x en el instante t es:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[\left(\frac{2\pi}{T}\right)\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$$

Esta ecuación puede expresarse así:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v \cdot T}\right)\right]$$

como $vT = \lambda$, tenemos:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

o bien:

$$y = A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

En esta expresión podemos interpretar las cantidades $\frac{2\pi}{T}$ y $\frac{2\pi}{\lambda}$, en efecto:

- $\frac{2\pi}{T} = \omega$, es decir, es la frecuencia angular del MAS de cada punto.
- $\frac{2\pi}{\lambda} = \kappa$, denominado número de onda o constante de propagación.

Por lo tanto, la función de onda se expresa como:

$$y = A \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t - \kappa \cdot x)$$

Siempre que la onda viaje de izquierda a derecha, la función de onda se expresa con signo negativo. Cuando la onda se propaga de derecha a izquierda, la función de onda se expresa como:

$$y = A \cdot \text{sen}\,(\omega \cdot t + \kappa \cdot x)$$

Al valor del ángulo $\omega \cdot t \pm \kappa \cdot x$ se le denomina ángulo de fase.

Estas expresiones para la función de onda describen cómo se propaga una perturbación. El análisis de su significado físico nos revela una doble periodicidad. Así, la cantidad T de la fase indica que, para un valor de x dado, los valores de la función se repiten con periodicidad temporal T.

Por otra parte, el primer término del ángulo de fase nos indica que, para un tiempo t dado, los valores de la función también se repiten con periodicidad espacial λ.

EJEMPLO

Una cuerda tensa y atada en uno de sus extremos a la pared vibra con un movimiento armónico simple de amplitud 2 cm, frecuencia 8 Hz y una velocidad 20 m/s. Determinar:

a. La frecuencia angular, la amplitud, el período, la longitud y el número de onda.

b. La función de onda para un instante de tiempo $t = 0{,}05$ s.

Solución:

a. La amplitud A de la onda es la del movimiento del extremo de la cuerda, es decir, $A = 2$ cm.

La frecuencia angular es:

$$\omega = 2\pi \cdot f = (2\pi \text{ rad/ciclo})(8 \text{ Hz}) = 50{,}26 \text{ rad/s}$$

El período es $\quad T = \frac{1}{f} = 0{,}125$ s.

La longitud de onda se obtiene así: $v = \lambda \cdot f$

$$\frac{v}{f} = \lambda$$ *Al despejar λ*

$$\lambda = \frac{2.000 \text{ cm/s}}{8 \text{ Hz}} = 250 \text{ cm}$$ *Al remplazar y calcular*

El número de onda se obtiene mediante la expresión:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{250 \text{ cm}} = 0{,}025 \text{ rad/cm}$$ *Al remplazar y calcular*

b. Para hallar la función de onda en el $t = 0{,}05$ s, se utiliza la función de onda:

$$y = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \kappa \cdot x) = (2 \text{ cm}) \cdot \text{sen}[(50{,}26 \text{ rad/s})\, t - (0{,}025 \text{ rad/cm}) \cdot x]$$

Al remplazar $t = 0{,}05$ s se tiene que:

$$y = (2 \text{ cm}) \cdot \text{sen}[(50{,}26 \text{ rad/s})(0{,}05 \text{ s}) - (0{,}025 \text{ rad/cm}) \cdot x]$$

Así, la función de onda es $y = (2 \text{ cm}) \cdot \text{sen}[(2{,}513 \text{ rad}) - (0{,}025 \text{ rad/cm}) \cdot x]$

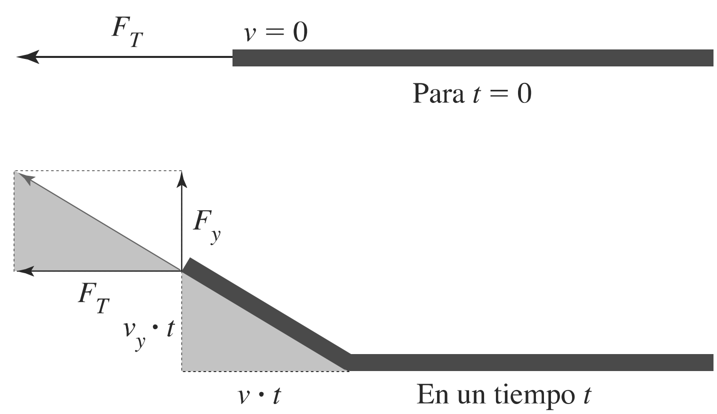
1.5 Velocidad de una onda transversal

Alguna vez habrás observado que, en el proceso de afinación de una guitarra se hace girar la clavija para aumentar o disminuir la tensión en la cuerda. Si la tensión aumenta, todo pulso generado en ella tendrá una mayor velocidad de propagación.

Pero, como no todas la cuerdas tienen el mismo grosor, dicha velocidad también dependerá de este factor, ya que entre mayor sea el grosor de la cuerda, menor será la velocidad de propagación. Por lo tanto, se puede afirmar que la velocidad de propagación de una onda en una cuerda es:

- Directamente proporcional a la tensión de la misma.
- Inversamente proporcional al grosor de la cuerda.

Para determinar los factores de los cuales depende la velocidad de propagación de las ondas en una cuerda, supongamos que una cuerda es sometida a una tensión F_T y que en un instante de tiempo $t = 0$ se produce, en su extremo, una fuerza en dirección vertical F_y con el fin de hacerla oscilar, tal como se muestra en la siguiente figura.



Para una sección corta de cuerda, de masa m, en el instante $t = 0$, la velocidad en dirección vertical es cero. En la figura se observa que las partículas de la cuerda se mueven hacia arriba con velocidad constante v_y hasta el instante t, es decir que el impulso de la fuerza F_T es $F_y \cdot t$.

Según la segunda ley de Newton, tenemos que:

$$F_y = m \cdot \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$$

Pero dado que $\Delta t = t - 0 = t$ y que $\Delta v_y = v_y - 0 = v_y$, entonces:

$$F_y \cdot t = m \cdot v_y$$

que corresponde a la cantidad de movimiento total en el instante t, la cual aumenta proporcionalmente con el tiempo.

Como las partículas de la cuerda, una vez empiezan su movimiento lo hacen con velocidad constante v_y, la distancia que recorren en el tiempo t es $v_y \cdot t$.

Si la velocidad con la cual se propaga la onda es v, en el mismo tiempo en que el extremo de la cuerda recorre una distancia vertical $v_y \cdot t$, la onda recorre una distancia horizontal $v \cdot t$.

En la figura se observan dos triángulos rectángulos semejantes sombreados en su interior; en el primero sus catetos son $v_y t$ y vt, y en el segundo son F_y y F_T. Por tanto:

$$\frac{F_y}{F_T} = \frac{v_y \cdot t}{v \cdot t}$$

De donde: $v \cdot F_y \cdot t = F_T \cdot v_y \cdot t$

Como $F_y \cdot t = m \cdot v_y$, entonces al remplazar tenemos que:

$$v \cdot m \cdot v_y = F_T \cdot v_y \cdot t$$

Al simplificar v_y se obtiene la expresión: $v \cdot m = F_T \cdot t$

Si entre el intervalo $t = 0$ y t, el pulso se propaga una distancia l con velocidad v, $t = \frac{l}{v}$, entonces:

$$v \cdot m = F_T \cdot \frac{l}{v}$$

Lo cual se puede expresar como: $v^2 = F_T \cdot \frac{l}{m}$, o, $v^2 = \frac{F_T}{m/l}$

La masa de las partículas en movimiento de la cuerda es la masa por unidad de longitud (m/l) o densidad lineal (μ). Luego v es:

$$v^2 = \frac{F_T}{\mu}$$

Igual a: $$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

EJERCICIO

Una cuerda de densidad lineal 0,001 kg/m está sometida a una tensión de 100 N. Calcula la velocidad de propagación de la onda.

EJEMPLOS

1. **Una cuerda de un arpa sinfónica de 2 m de longitud se somete a una tensión de 500 N. Si su masa es de 60 g, calcular:**
   a. La densidad lineal de la cuerda.
   b. La velocidad de una onda en dicha cuerda.

Solución:

a. La densidad lineal está dada por la expresión:

$$\mu = \frac{m}{l}$$

$$\mu = \frac{0{,}06\ \text{kg}}{2\ \text{m}} = 0{,}03\ \text{kg/m}$$ *Al remplazar y calcular*

b. Para calcular el valor de la velocidad de propagación en la cuerda se utiliza la ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

$$v = \sqrt{\frac{500\ \text{N}}{0{,}03\ \text{kg/m}}} = 129{,}1\ \text{m/s}$$ *Al remplazar y calcular*

La velocidad de propagación de la onda en la cuerda es 129,1 m/s

2. **La densidad de masa lineal de una cuerda es de 0,25 kg/m. ¿Qué tensión deberá aplicarse para producir una velocidad de onda de 20 m/s?**

Solución:

Para calcular el valor de la tensión que se debe despejar F_T de la ecuación de velocidad:

$$F_T = \mu v^2 = (0{,}25\ \text{kg/m})(20\ \text{m/s})^2 = 100\ \text{N}$$ *Al remplazar y calcular*

La tensión que se debe aplicar para producir una velocidad de onda de 20 m/s es 100 N.

1.6 La energía y la potencia que transmiten las ondas

Todo movimiento ondulatorio tiene energía asociada, por ejemplo, la energía recibida del Sol o los efectos destructivos del oleaje. Para producir un movimiento ondulatorio es necesario aplicar una fuerza a un sector del medio, efectuando así un trabajo sobre el sistema. Al propagarse la onda, cada partícula del medio ejerce fuerza sobre las otras y por ende, trabajo en todo el sistema. De esta manera, se puede transportar energía de una región a otra.

En todos los casos en los que se produce una onda armónica nos encontramos con partículas, de mayor o menor tamaño, que están vibrando. Es decir, en ningún caso hay desplazamiento de materia desde el foco hacia los puntos materiales. En esta propagación, punto a punto, la cantidad de movimiento y la energía se propagan. Por ejemplo, considera la espira de un resorte que vibra con movimiento armónico simple; la energía potencial asociada en el punto de su máxima elongación A es:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

Si la espira es el foco, la energía se transmitirá de espira a espira, por lo tanto:

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

Como $k = m \cdot \omega v^2$, tenemos que:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

Siendo $\omega = \frac{2\pi}{T}$, por tanto:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{4\pi^2}{T^2}\right) \cdot A^2$$

Es decir:

$$E = 2\pi^2 \cdot m \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^2 \cdot A^2$$

$$E = 2\pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot A^2$$

Al difundirse la energía por el medio, queda almacenada en cada partícula en forma de una combinación de energía cinética de movimiento y energía potencial de deformación. La energía es absorbida por rozamiento interno y efectos viscosos, transformándose en calor.

Para una onda unidimensional y considerando un medio homogéneo, de densidad lineal μ, la ecuación de energía se transforma así:

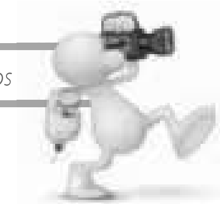
$$E = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot l \cdot f^2 \cdot A^2$$

Si se considera un punto de dimensiones muy pequeñas, Δl, y masa, Δm, la densidad lineal será $\mu = \frac{\Delta m}{\Delta l}$, por tanto:

$$E = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot \Delta l \cdot f^2 \cdot A^2$$

Como Δl corresponde a la distancia lineal Δx, podemos escribir $\Delta l = v \cdot \Delta t$, es decir:

$$E = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot \Delta t$$



Ahora, teniendo en cuenta que $P = \frac{E}{\Delta t}$, podemos calcular la potencia transmitida:

$$P = \frac{E}{\Delta t} = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2$$

EJEMPLO

En el extremo de una cuerda tensa muy larga, de masa 0,04 kg y densidad lineal 0,08 kg/m, se produce un MAS, perpendicular a la dirección de la cuerda, de amplitud 0,02 m y frecuencia 8 Hz. Si esta perturbación se propaga a lo largo de la cuerda con velocidad 20 m/s, determinar:

a. La amplitud, la frecuencia y la longitud de onda de las ondas generadas.
b. La energía que transmiten estas ondas.
c. La potencia que transmiten las ondas producidas a lo largo de la cuerda.

Solución:

a. Teniendo en cuenta el enunciado, se pueden determinar los valores de la amplitud y de la frecuencia, así:

$A = 0{,}02$ m $\qquad f = 8$ Hz

La longitud de onda se calcula por medio de la ecuación de velocidad de propagación así:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$\frac{v}{f} = \lambda \qquad \textit{Al despejar } \lambda$$

$$\lambda = \frac{20 \text{ m/s}}{8 \text{ Hz}} = 2{,}5 \text{ m} \qquad \textit{Al remplazar y calcular}$$

b. La energía transmitida se calcula por medio de la ecuación de energía:

$$E = 2\pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot A^2 = 2\pi^2 \cdot (0{,}04 \text{ kg}) \cdot (8 \text{ Hz})^2 \cdot (0{,}02 \text{ m})^2 = 0{,}02 \text{ J} \qquad \textit{Al calcular}$$

La energía transmitida por las ondas en la cuerda es 0,02 J.

c. La potencia transmitida se calcula por medio de la ecuación:

$$P = 2\pi^2 \cdot \mu \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2$$

Al remplazar tenemos:

$$P = 2\pi^2 \cdot (0{,}08 \text{ kg/m}) \cdot (20 \text{ m/s}) \cdot (8 \text{ Hz})^2 \cdot (0{,}02 \text{ m})^2 = 0{,}8 \text{ W}$$

La potencia transmitida por las ondas en la cuerda es 0,8 W.

1.7 Las ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son la propagación de perturbaciones temporales generadas por pequeños movimientos en un medio. Estas ondas que se originan en el interior de la corteza terrestre, debido a repentinos desplazamientos en fallas o hendiduras en la tierra, se propagan hacia la superficie terrestre originando terremotos o movimientos sísmicos de baja intensidad. Lo cual nos indica que dichas perturbaciones generan energía que es difundida hacia fuera en forma de ondas sísmicas.

La velocidad de las ondas depende, como ocurre en todas las manifestaciones ondulatorias, de las propiedades del medio; fundamentalmente de la elasticidad y densidad de los materiales por los cuales se propaga.

En el interior de la corteza terrestre se producen dos tipos de ondas sísmicas que viajan a través de la tierra, y que son conocidas como ondas de cuerpo u ondas internas, las cuales pueden ser compresionales (ondas *P*) o de corte (ondas *S*).

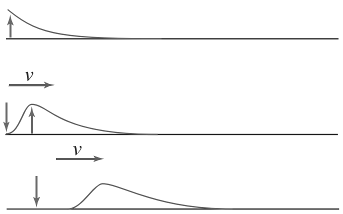
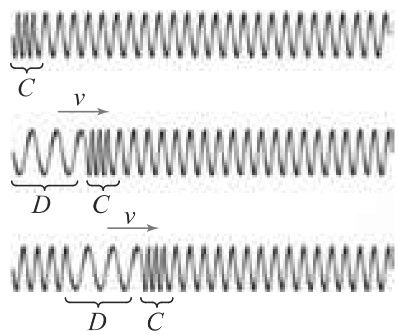


Figura 4. Onda secundaria, en la que las partículas se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.

- *Las ondas P, o primarias*, son ondas que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Por ejemplo, si se comprime un extremo del resorte y luego se suelta, el material comprimido se extiende, comprimiendo las partículas que se encuentran a su alrededor, tal como se muestra en la siguiente figura (*C* indica la compresión y *D* la dilatación):



Este tipo de onda es la más veloz de todas las ondas sísmicas (alcanza más de 11 km/s en el interior de la Tierra) y, por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada en los sismogramas.

- *Las ondas S, o secundarias*, son ondas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por ello están asociadas con deformaciones del terreno.

Las ondas que viajan por una cuerda, producidas por el movimiento de uno de sus extremos perpendicularmente a ella, como se muestra en la figura 4, es un ejemplo de este tipo de ondas.

En la figura 5 se puede observar el sismograma del arribo de una onda *P*, denotada como P_g, seguida por la onda *S* (S_g) en un punto muy cercano al epicentro (foco que irradia ondas sísmicas superficiales) del movimiento telúrico.

Además de las ondas que viajan a través del terreno, existen otras que lo hacen por la superficie terrestre. Estas ondas también se dividen en dos categorías: las ondas de Rayleigh y las ondas de Love.

- *Las ondas de Rayleigh* se originan por la interacción entre las ondas *P* y la componente vertical de las ondas *S*. Son las ondas más lentas, con velocidades que van de 1 a 4 km/s. Estas ondas hacen emerger algunas zonas de la superficie terrestre y hundir a otras.
- *Las ondas de Love* se comportan de manera muy parecida a las ondas de Rayleigh, pero se originan por la interferencia constructiva de la componente horizontal de las ondas *S*. Aunque más lentas que las ondas internas, las ondas de Love tienen velocidades de 1 a 4,5 km/s, siendo más veloces que las de Rayleigh. Estas ondas provocan cortes en la superficie terrestre.

La energía asociada a las ondas sísmicas depende de la amplitud de las ondas. Cuando la onda avanza, se amortigua y su amplitud disminuye. Así, el movimiento sísmico es menor cuando el hipocentro (centro en el cual se produce la onda sísmica) se encuentra a mayor profundidad. El aparato usado para la detección de ondas sísmicas se llama *sismógrafo*.

Las ondas sísmicas también son utilizadas en la explotación del petróleo y de otros combustibles.

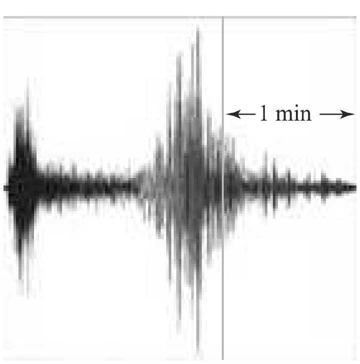


Figura 5. La onda primaria alcanza velocidades de más de 11 km/s por lo que es la primera onda sísmica en ser registrada por el sismógrafo, luego arriba la onda secundaria.

2. Fenómenos ondulatorios

2.1 Reflexión de las ondas

Hasta el momento hemos estudiado las ondas como si el medio fuese de extensión infinita y homogénea. Pero ¿qué sucede cuando una onda choca contra un obstáculo?

Cuando una onda llega a un obstáculo o al final del medio material donde se propaga, una parte de la onda se devuelve, es decir, se refleja. Este cambio de dirección que experimenta la onda depende de la diferencia de elasticidad de los medios. Por ejemplo, al arrojar un objeto pequeño a la superficie del agua de un estanque, se generan frentes de ondas circulares, cuando las ondas generadas chocan contra las paredes del estanque experimentan un cambio de dirección con la misma amplitud, lo cual indica que la onda se reflejó y no hubo transmisión.

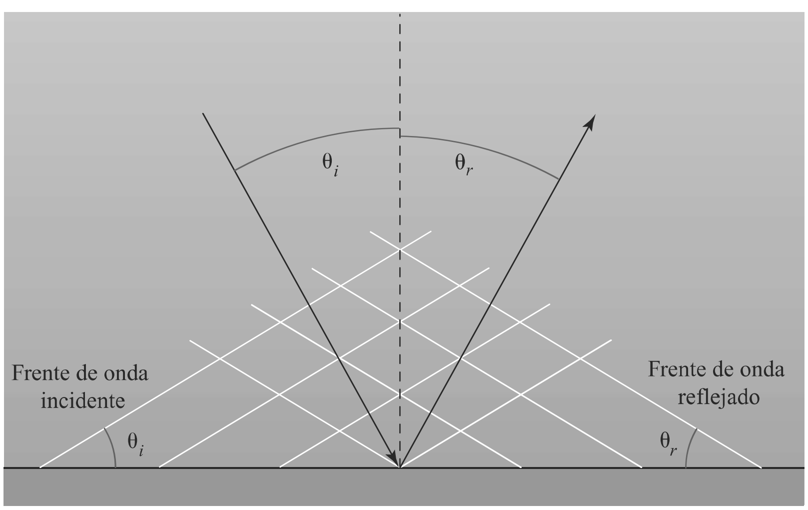
A este fenómeno de las ondas se le denomina *reflexión*.

Definición

La reflexión consiste en el cambio de dirección que experimenta una onda cuando choca contra un obstáculo. La onda que se dirige hacia el obstáculo se denomina onda incidente, mientras que la onda que se aleja del obstáculo después de haber chocado contra él se denomina onda reflejada.

Si la densidad del segundo medio es mayor que la del primero, la onda reflejada sufre un desfase de 180°. Es decir que si la onda incidente al chocar estaba en cresta, se devuelve en valle o viceversa. Si la densidad del segundo medio es menor que la del primero, la onda reflejada se devuelve sin desfase.

En la siguiente figura se representa lo que ocurre con la dirección de un frente de onda cuando se encuentra con un obstáculo.



Como se observa en la figura, el ángulo que la onda incidente forma con la superficie reflectora es igual al ángulo formado por la onda reflejada, es decir, *el ángulo de reflexión* es igual *al ángulo de incidencia*. Por tanto, podemos decir que:

$$\theta_i = \theta_r$$

EJERCICIO

¿Una cuerda tendrá mayor velocidad si su densidad disminuye? Explica.

El ángulo de incidencia, θ_i, se define como el ángulo formado por la onda incidente con la perpendicular a la superficie reflectora; el ángulo de reflexión, θ_r, es el que corresponde a la onda reflejada.

2.2 Refracción de las ondas

Cuando una onda llega a la frontera con otro medio diferente al medio en que se propaga, una parte de ella se refleja mientras que otra parte se transmite. La parte de la onda que es transmitida hacia el otro medio se llama *onda refractada*.

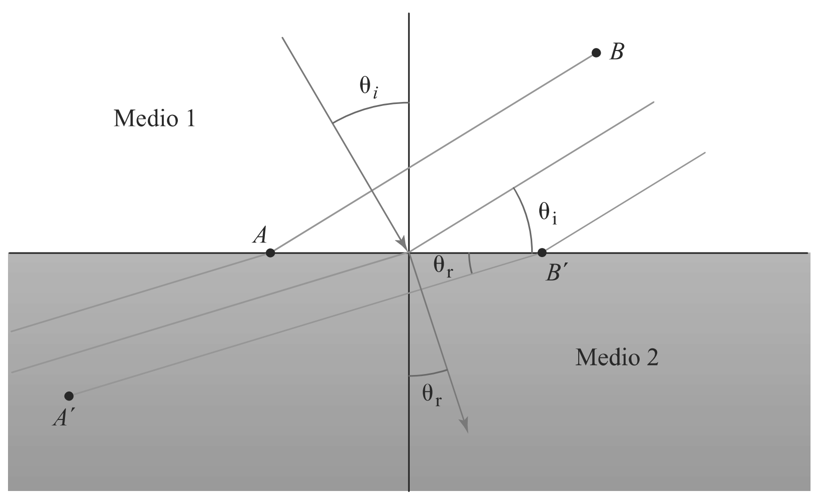
Cuando una onda cambia de medio, la dirección y la velocidad de propagación también cambian; a este fenómeno se le denomina *refracción*.

Si se genera un pulso plano que viaje de una región más profunda a una región menos profunda, en un estanque con agua, la velocidad de propagación de la onda disminuirá a medida que la profundidad sea menor. En el instante en que la onda cruza la frontera, se produce una diferencia en la longitud de onda que ocasiona una desviación en la dirección de propagación. Sin embargo, la frecuencia en los dos medios no cambia, pues esta depende de la perturbación inicial; por lo tanto, para disminuir la velocidad de propagación es necesario disminuir la longitud de onda.

Definición

La refracción de las ondas consiste en el cambio de dirección que experimenta un movimiento ondulatorio cuando pasa de un medio material a otro.

En la siguiente figura se representa la desviación de la dirección de una onda cuando cruza de un medio material a otro.



En la figura se observa que la velocidad de la onda en el medio 2 es menor que la velocidad en el medio 1, de tal modo que la dirección de la onda se mueve hacia la normal a la superficie de separación de los medios materiales, siendo el ángulo de refracción, θ_r, menor que el ángulo de incidencia, θ_i.

En la figura, el frente de onda plano *AB* viaja por el medio 1 con velocidad v_1 y forma con la superficie de separación de los dos medios un ángulo θ_i. Al propagarse por el medio 2 con velocidad v_2, el frente de onda *A'B'* forma con la superficie de separación un ángulo θ_r.

Willebrord Snell van Royen. También conocido como Snellius, es un astrónomo y matemático holandés, que enunció la ley de refracción de la luz en 1621.

Según la figura 6, las ondas se propagan con mayor velocidad en el medio 1. Observa que mientras la onda recorre una distancia $v_1 \cdot t$ desde el punto *B* hasta el punto *B'* en el medio 1, en el medio 2 la onda recorre una distancia $v^2 \cdot t$ desde *A* hasta *A'*. Puesto que los triángulos *ABB'* y *AA'B'* son rectángulos, podemos escribir que:

$$\text{sen } \theta_i = \frac{v_1 \cdot t}{AB'} \quad \text{y} \quad \text{sen } \theta_r = \frac{v_2 \cdot t}{AB'}$$

por tanto, la relación entre los senos de los ángulos es:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{\frac{v_1 \cdot t}{AB'}}{\frac{v_2 \cdot t}{AB'}}$$

Al simplificar *AB'* tenemos que:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1 \cdot t}{v_2 \cdot t}$$

Por tanto, al simplificar *t*:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Esta relación matemática que describe el cambio de dirección que experimenta una onda refractada se denomina *Ley de Snell*.

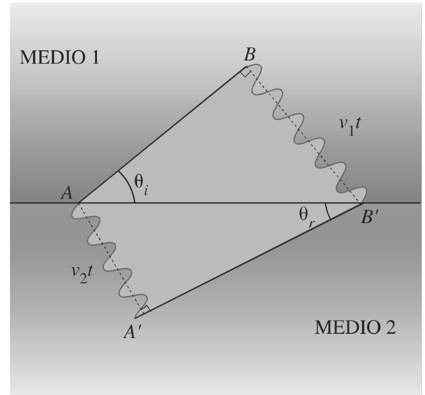
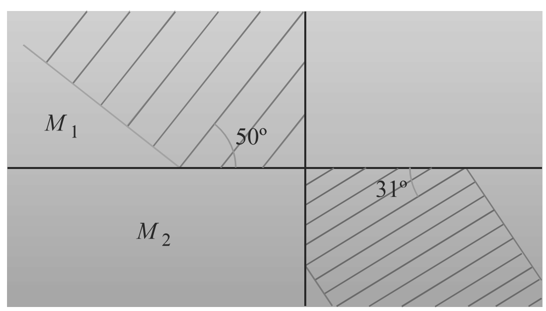


Figura 6. La velocidad de la onda aumenta al cambiar del medio 1 al medio 2.

EJEMPLOS

1. **Las ondas sísmicas se refractan dentro de la tierra al viajar entre rocas de distintas densidades y por lo tanto su velocidad cambia, al igual que su dirección de propagación. Una onda sísmica *P* viaja a 8 km/h y choca con el límite entre dos tipos de material. Si llega a esta frontera con ángulo de incidencia de 50° y se aleja con un ángulo de 31°, ¿cuál será la velocidad en el segundo medio?**



Solución:

Para hallar la velocidad en el segundo medio recurrimos a la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{\text{sen } 50°}{\text{sen } 31°} = \frac{8 \text{ km/h}}{v_2} \qquad \textit{Al remplazar}$$

$$v_2 = \frac{8 \text{ km} \cdot \text{sen } 31°}{\text{sen } 50°} \qquad \textit{Al despejar } v_2$$

$$v_2 = 5{,}38 \text{ km/h} \qquad \textit{Al calcular}$$

La velocidad de la onda sísmica en el medio 2 es 5,38 km/h.

2. **Una onda sísmica *P* pasa por una frontera entre rocas, donde su velocidad varía de 6 km/s a 7,5 km/s. Si llega a la frontera formando un ángulo de 45° con ella, ¿cuál es el ángulo de refracción?**

Solución:

Como sen 45° = 0,7, al despejar el θ_r de la ley de Snell tenemos:

$$\text{sen } \theta_r = \frac{v_2}{v_1} \text{sen } \theta_i$$

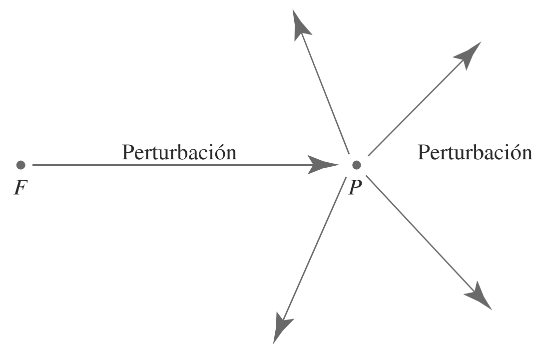
$$\text{sen } \theta_r = \frac{(7{,}5 \text{ km/s})}{(6 \text{ km/s})}(0{,}7) = 0{,}875 \qquad \textit{Al remplazar}$$

Y por consiguiente $\theta_r = 61°$

Christian Huygens. Realizó una construcción geométrica para explicar la forma de propagación de las ondas.

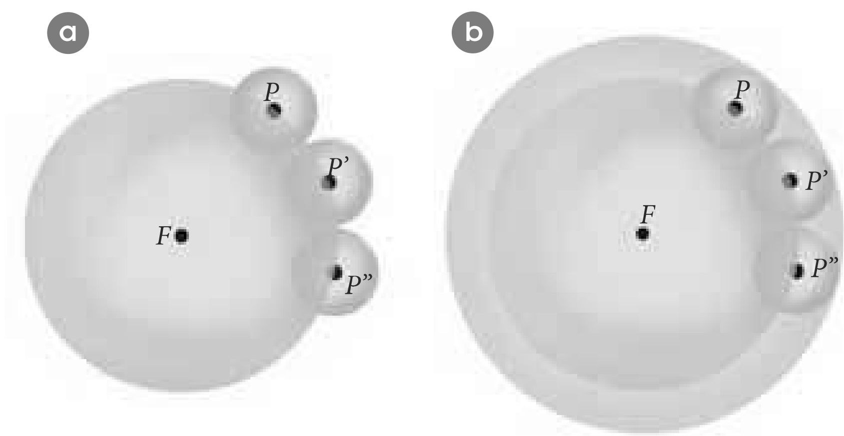
2.3 Principio de Huygens

El principio de Huygens, establecido por el científico holandés Christian Huygens en 1678, es una construcción geométrica que explica cómo cambia un frente de onda de una posición a otra y su forma de propagación. Huygens admitió que cada punto del medio alcanzado por la perturbación, se convierte en un foco secundario que se expande en todas las direcciones con rapidez igual a la rapidez de propagación de la onda, tal como se muestra en la siguiente figura.



En efecto, en el caso de las ondas armónicas propagándose con la misma rapidez en todas las direcciones en un medio material homogéneo, si el punto *P* es alcanzado por la vibración, se convertirá en un oscilador armónico con MAS de las mismas características que las del foco y, además, propagará esta vibración a los puntos de su entorno. Por lo cual, *P* emite ondas secundarias de la misma naturaleza que las que llegan a él.

En la siguiente figura se observa que si cada punto, *P, P', P"*…, emite sus propias ondas, representadas por sus respectivos frentes esféricos (*a*), el frente de onda resultante, en un instante dado, es la tangente común externa (envolvente) a los frentes de onda de las ondas secundarias (*b*).



En este caso, el frente de onda estará representado en las sucesivas posiciones por las superficies esféricas concéntricas dibujadas. Es decir:

Definición

Todo punto de un frente de onda se considera como un foco o fuente de nuevas ondas que se propagan en todas las direcciones, con velocidad igual a la velocidad de propagación de las ondas.

2.4 Difracción

Las ondas se dispersan al propagarse, y cuando encuentran un obstáculo, lo rodean y se doblan alrededor de él. Por ejemplo, cuando estamos en un cuarto cerrado y deseamos escuchar una conversación que se da en el pasillo, abrimos ligeramente la puerta y así logramos escuchar a través de la rendija. Esto sucede porque la onda sonora bordea el obstáculo, o sea la puerta, y sigue su camino, es decir que entra a la habitación. A este fenómeno se le llama difracción.

Definición

La difracción de las ondas consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo.

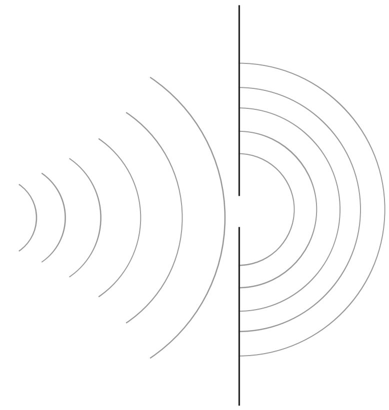
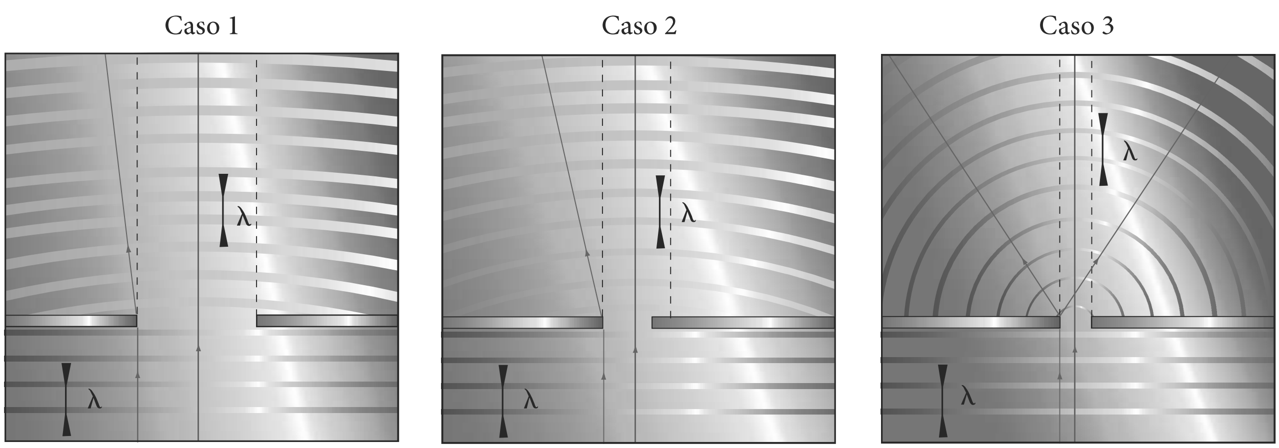


Figura 7. Frentes de onda circulares generados por la difracción del frente de onda al pasar por la abertura.

En la figura 7 se aprecia un caso de difracción de ondas, en el cual, un frente de onda llega a una abertura y al pasar genera frentes de onda circulares. El principio de Huygens nos proporciona una explicación geométrica de este comportamiento, admitiendo que la abertura es un foco secundario, donde las ondas que pasan al otro lado son producidas por dicho foco.

En la siguiente figura se observan tres casos de difracción, en los cuales la longitud de onda (λ) es la misma, pero el ancho de la abertura es diferente.



En el caso 1, cuando el ancho de la abertura es mayor comparado con la longitud de onda (λ), se observa una ligera deformación en los frentes de onda luego de cruzar por la abertura. Cuando los frentes se encuentran relativamente lejos de la abertura se observan planos. Las líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda ayudan a dimensionar la deformación al observar el ángulo entre ellas.

En el caso 2, cerca de los bordes cada frente de onda se ve ligeramente deformado, tomando una forma más circular; el ángulo entre las perpendiculares de los frentes de onda es mayor que en el caso 1.

En el caso 3, cuando se reduce el tamaño de la abertura, siendo su longitud igual a la longitud de onda (λ), los frentes de ondas son aún más circulares que en los casos anteriores.

La difracción de las ondas se observa con mayor claridad cuando el tamaño de la abertura es menor que la longitud de onda. Si la longitud de onda es mucho menor que las dimensiones de la abertura, prácticamente no es reconocible el efecto de difracción.

2.5 Principio de superposición

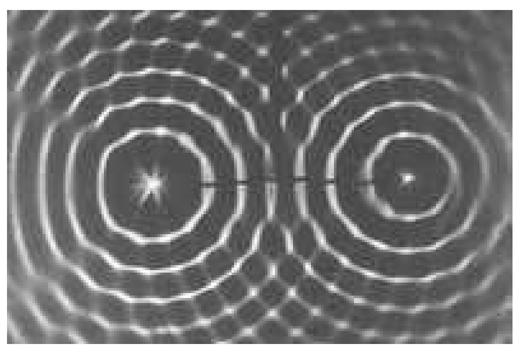
Hemos analizado lo que sucede cuando una onda se encuentra con obstáculos u otros medios diferentes. Ahora analizaremos el comportamiento de una onda cuando se encuentra con otra en un mismo punto del medio. Cada onda afecta al medio en forma independiente, y por tanto los efectos de tales ondas pueden analizarse mediante el principio de superposición.

Definición

El principio de superposición establece que cuando dos o más ondas se encuentran en determinado punto de un medio en el mismo instante, el desplazamiento resultante es la suma algebraica de los desplazamientos individuales.

2.5.1 Interferencia

Cuando dos o más ondas de la misma naturaleza coinciden en un punto del medio, en un instante determinado, sucede lo que se define como interferencia. Por ejemplo, si se golpea periódicamente con dos objetos la superficie del agua en un estanque, se producen dos frentes de onda circulares que se propagan a través de ella con la misma frecuencia e igual amplitud, es decir, en el momento en que un objeto produce una cresta, el otro también genera la suya, y cuando uno produce un valle, el otro también lo hace. En estas condiciones, los dos focos vibratorios se encuentran en fase, originando una superposición de las ondas, como se muestra en la siguiente figura.



EJERCICIO

Escribe las diferencias entre interferencia y difracción.

Si en el mismo instante, en determinado punto de la superficie se encuentran dos crestas o dos valles, la amplitud del pulso resultante es la suma de las amplitudes, siendo la interferencia constructiva o positiva. Por otra parte, si se encuentran un valle y una cresta con igual amplitud, la superficie aparenta no vibrar, siendo esta una interferencia destructiva o negativa.

En una interferencia destructiva o negativa, para que los movimientos al superponerse anulen la vibración, sus estados vibratorios deben estar en oposición de fase, lo cual solo ocurrirá si las ondas llegan habiendo recorrido distancias diferentes, d_1 y d_2, es decir, que la diferencia de distancias $d_1 - d_2$ difieran en un número entero de medias longitudes de onda $\left(\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \ldots\right)$ Por tanto:

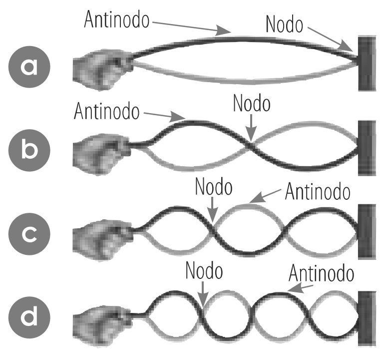
$$d_1 - d_2 = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

donde $2n + 1$ es siempre un número impar. En una interferencia constructiva o positiva, como las ondas llegan en fase al mismo punto, la diferencia de distancias $d_1 - d_2$ difieren en un número entero de longitudes de onda ($0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \ldots$), es decir: $d_1 - d_2 = n \cdot \lambda$ siendo n un número natural.

2.5.2 Ondas estacionarias

Cuando dos ondas armónicas, de igual frecuencia y amplitud, se propagan en el mismo medio, en la misma dirección pero en sentidos opuestos, se superponen, originando una oscilación particular, que no tiene las características de una onda viajera y por eso se define como *onda estacionaria*.

Las ondas estacionarias se pueden transmitir en una cuerda con los extremos fijos. Cuando una onda armónica alcanza un extremo fijo, se refleja, originando una onda que viaja en sentido opuesto. Al superponerse la onda original con la reflejada, se genera la onda estacionaria, como se muestra a continuación.



Los puntos de interferencia destructiva, llamados *nodos*, y de interferencia constructiva, llamados *antinodos*, permanecen en lugares fijos. La frecuencia mínima de vibración que genera una onda estacionaria se muestra en la parte a de la figura. Las ondas de las partes b y c se generan a una doble y triple frecuencia, de la frecuencia mínima, considerando que la tensión de la cuerda permanece constante. La cuerda también puede vibrar con una frecuencia cuatro veces la mínima (d), y así sucesivamente. Estas frecuencias a las que se producen las ondas estacionarias son frecuencias naturales y frecuencias resonantes de la cuerda.

A medida que aumenta la cantidad de nodos de la onda estacionaria, disminuye la longitud de onda. En cada caso:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n}$$

Donde L es la longitud de la cuerda y n, el número de armónicos, cada longitud de onda estacionaria implica una distribución de nodos a lo largo de la cuerda. Esta distribución caracteriza la onda estacionaria que representa lo que se llama *modo normal de vibración*.

Como $\lambda \cdot f = v$, la frecuencia en cada caso es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

La frecuencia mínima se denomina *frecuencia fundamental* o *primera armónica* y corresponde a un antinodo. La longitud completa corresponde a media longitud de onda, es decir:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \lambda_1$$

Donde λ_1 es la longitud de onda fundamental. El segundo modo, después del fundamental, tiene dos ondas y se llama *segundo armónico* o *primer sobretono*; la longitud de la cuerda corresponde a una longitud completa de la onda, lo cual es igual a:

$$L = \lambda_2$$

Para la tercera y cuarta armónicas, $L = \frac{3}{2}\lambda_3$ y $L = 2\lambda_4$, respectivamente, y así sucesivamente. Podemos entonces escribir:

$$L = \frac{n \cdot \lambda_n}{2} \text{ siendo } n = 1, 2, 3, \ldots$$

El entero n indica el número de la armónica correspondiente: $n_1 = 1$ para la primera armónica, $n_2 = 2$ para la segunda armónica, y así sucesivamente.

Hemos visto que sistemas como un péndulo o una masa unida a un resorte tienen una única frecuencia propia de oscilación, determinada por ciertas características del sistema. Si una fuerza exterior perturba el sistema con esta frecuencia, se produce resonancia.

A diferencia de estos sistemas, las cuerdas presentan un número infinito de frecuencias propias: la fundamental y todas las armónicas. En la práctica, cuando se hace vibrar una cuerda, se produce una superposición de ondas de todas estas frecuencias. Cualquier perturbación, por pequeña que sea, que tenga una frecuencia igual a alguna de ellas, hará que la cuerda entre en resonancia.

EJEMPLO

Una cuerda de piano tiene una masa 12 g y una longitud de 1,5 m. Determinar:

a. La longitud de onda y la velocidad de propagación de la primera armónica.

b. La tensión que deberá tener la cuerda si debe vibrar a una frecuencia fundamental de 131 Hz.

c. Las frecuencias de las cuatro primeras armónicas.

Solución:

a. La longitud de onda de la fundamental está dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}}{1} = 3 \text{ m}$$ *Al remplazar y calcular*

La velocidad de propagación se expresa como:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v = 3 \text{ m} \cdot 131 \text{ Hz} = 393 \text{ m/s}$$ *Al remplazar y calcular*

La longitud de onda y la velocidad de propagación de la fundamental son 3 m y 393 m/s, respectivamente.

b. La tensión que debe tener la cuerda es:

$$F_T = \frac{m}{L} \cdot v^2$$ *Al remplazar*

$$F_T = \frac{0{,}012 \text{ kg}}{1{,}5 \text{ m}}(393 \text{ m/s})^2$$

$$F_T = 1.235{,}6 \times 10^3 \text{ N}$$ *Al calcular*

La tensión de la cuerda debe ser de 1.235,6 N.

c. Las frecuencias de las cuatro primeras armónicas son:

Para la primera armónica la frecuencia es:

$$f = 131 \text{ Hz}$$

Para la segunda armónica la frecuencia es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

$$f = \frac{2 \cdot 393 \text{ m/s}}{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}} = 262 \text{ Hz}$$ *Al remplazar y calcular*

Para la tercera armónica la frecuencia es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

$$f = \frac{3 \cdot 393 \text{ m/s}}{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}} = 393 \text{ Hz}$$ *Al remplazar y calcular*

Para la cuarta armónica la frecuencia es:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L}$$

$$f = \frac{4 \cdot 393 \text{ m/s}}{2 \cdot 1{,}5 \text{ m}} = 524 \text{ Hz}$$ *Al remplazar y calcular*

Las frecuencias de la segunda, tercera y cuarta armónicas son dos, tres y cuatro, multiplicados por la frecuencia de la frecuencia fundamental: 262, 393 y 524 Hz.

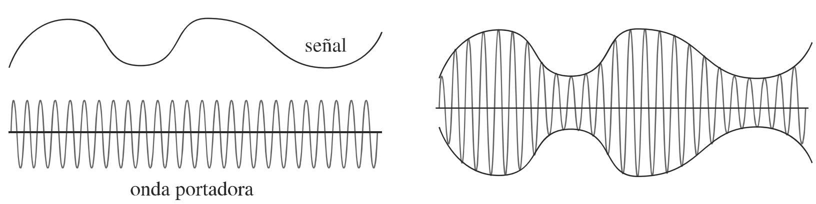
2.6 Ondas de radio

Las ondas de radio son muy utilizadas en el campo de las telecomunicaciones, ya que por medio de ellas es posible la transmisión de información. De acuerdo con la forma en que se transmiten, se reconocen tres tipos de ondas: superficiales, aéreas y espaciales.

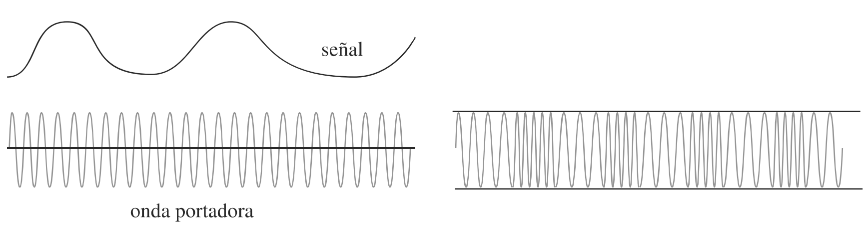
- *Las ondas superficiales* son ondas con frecuencias hasta de 3 MHz, que, de acuerdo con las características del lugar, se propagan por la superficie terrestre.
- *Las ondas áreas* son ondas de frecuencias entre los 3 MHz y los 30 MHz. Estas ondas se propagan por el aire mediante sucesivas reflexiones entre la ionosfera y la superficie terrestre, lográndose de esta manera un gran alcance.
- *Las ondas espaciales* son ondas con frecuencias superiores a los 30 MHz, que pueden alcanzar distancias superiores a los 100 km. La transmisión de estas ondas generalmente se realiza a través de la ionosfera.

El científico canadiense Reginald Fessenden descubrió la forma de emplear las oscilaciones de las ondas de radio para transmitir información, mediante un proceso denominado *modulación*. La modulación es una técnica para imprimir información (voz, imagen) en una onda de radio llamada *onda portadora*. Debido a este proceso de emisión, las ondas de radio pueden ser de amplitud modulada (AM) o de frecuencia modulada (FM).

- *Amplitud modulada:* en este proceso de modulación, las frecuencias están entre 530 kHz y 1.600 kHz; en consecuencia, la onda portadora tiene un margen de frecuencia para su emisión denominado ancho de banda. En el caso de AM, el ancho de banda es 10 kHz. En la siguiente figura se muestra un esquema de modulación AM.



- *Frecuencia modulada:* en este proceso de modulación, a diferencia de las señales de AM, la amplitud de la onda portadora permanece constante pero la frecuencia es alterada. Los valores de las frecuencias FM están entre 87 MHz y 108 MHz, con un ancho de banda de 200 MHz. En la siguiente figura se puede observar el esquema de modulación FM.



Con seguridad, habrás observado que los aparatos de radio se pueden sintonizar en cualquiera de las dos bandas, AM o FM.

Interpreta

1. **La “ola” que producen los espectadores de un partido de fútbol al levantarse y volverse a sentar:**

   a. ¿En qué se parece a la propagación de una onda?

   b. ¿Es una onda transversal o longitudinal? Explica tu respuesta.

2. **Establece relaciones entre:**

   a. El período y la frecuencia de una onda.

   b. La velocidad de propagación de una onda y la frecuencia.

   c. La longitud de onda y la velocidad de propagación.

   d. Las ondas transversales y longitudinales.

   e. Cresta y valle de una onda.

3. **Un sismo propaga grandes cantidades de energía produciendo daños en las infraestructuras construidas por los hombres. Según la dirección de propagación de las ondas respecto a la dirección del movimiento, las ondas sísmicas son:**

   a. Transversales.

   b. Longitudinales.

   c. Electromagnéticas.

   d. Lineales.

4. **La potencia de una onda depende de:**

   a. El período.

   b. La masa del medio de propagación.

   c. Solamente del tiempo.

   d. Solamente de la energía transmitida.

5. **Cuando se lanza una piedra en un lago, el frente de onda observado en el agua es:**

   a. Lineal y se propaga en una sola dirección.

   b. Lineal y se propaga en todas las direcciones.

   c. Circular y se propaga en todas las direcciones.

   d. Curvo y se propaga solo en media circunferencia.

6. **Explica por qué cuando pasa un vehículo de carga pesada cerca a nosotros se siente como si temblara la Tierra.**

7. **Explica por qué cuando un objeto flota en el agua y esta se mueve, el objeto permanece en su sitio moviéndose hacia arriba y hacia abajo.**

Argumenta

Lee la siguiente información y responde las preguntas 8 a 12 con base en ella.

La sismología es una ciencia que se encarga del estudio de los terremotos. Normalmente, un terremoto se genera a una distancia aproximada de 60 km por debajo de la corteza terrestre. Al punto donde se originan se le denominan foco o hipocentro, y al más próximo sobre la superficie de la tierra, epicentro. Sin embargo, las ondas sísmicas se perciben con mayor intensidad en el epicentro y luego, se dispersan desde él.

8. **¿Cómo se llama la persona encargada de estudiar los terremotos?**

9. **¿Por qué un terremoto ocurre en la parte rígida de la corteza terrestre?**

10. **Normalmente, luego de haber ocurrido un fuerte temblor, las personas se suelen preguntar sobre la localización del epicentro. ¿Qué quiere decir eso?**

11. **¿Por qué luego de un terremoto las personas no preguntan por la localización del hipocentro?**

12. **¿Has vivido algún terremoto o un temblor muy fuerte? ¿Cuál fue el epicentro?**

13. **¿Por qué se puede observar el reflejo de los objetos en cualquier vidrio?**

14. **Explica por qué, en ocasiones, las olas del mar aumentan su tamaño o lo reducen.**

Propone

15. **Realiza un esquema donde expliques las partes de una onda.**

16. **Explica algunas experiencias vividas en las que hayas observado fenómenos ondulatorios o algunas de sus propiedades.**

17. **Responde. ¿Cómo harías para generar ondas en un estanque y hacer mover un barco de papel? Realiza el experimento y comprueba tu teoría.**

18. **Realiza un mapa conceptual donde expliques los fenómenos ondulatorios.**

19. **Utiliza una cuerda para plantear diferentes situaciones que permitan recrear los fenómenos ondulatorios de reflexión, interferencia y refracción. Explícalos a tus compañeros de curso.**

Actividades

Verifica conceptos

1 **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Explica tu respuesta.**

- ☐ La propagación de las ondas es un mecanismo para transmitir energía de un medio sin que haya transporte de materia.
- ☐ La línea que une todos los puntos vecinos de una onda se llama frente de onda.
- ☐ Cuando el movimiento oscilatorio que produce una onda es periódico, se dice que las ondas son circulares.
- ☐ Cuando las partículas de un medio oscilan en dirección perpendicular a la dirección de propagación, se dice que las ondas son transversales.
- ☐ En las ondas longitudinales, las partículas del medio oscilan en dirección paralela a la dirección de propagación de la onda.
- ☐ La amplitud de la onda depende de la longitud de onda.

2 **Elige la afirmación correcta.**

a. Las ondas no transmiten energía.

b. Las ondas transversales son paralelas a la velocidad de propagación.

c. Las ondas se producen por el movimiento armónico simple de las partículas del medio.

d. La densidad lineal de masa en una cuerda depende de la masa del objeto y de su longitud.

3 **Define los siguientes conceptos:**

a. Onda mecánica.

b. Amplitud.

c. Período.

d. Longitud de onda.

e. Onda electromagnética.

f. Velocidad de propagación.

4 **La velocidad de propagación de una onda transversal en una cuerda depende de:**

a. La amplitud.

b. La frecuencia.

c. El período.

d. La fuerza horizontal.

e. La longitud de onda.

5 **Si se desea saber la velocidad de propagación de una onda periódica se debe conocer:**

a. La frecuencia y el período.

b. La frecuencia y la longitud de onda.

c. El período y la amplitud.

d. La amplitud y la frecuencia.

6 **Completa las siguientes afirmaciones:**

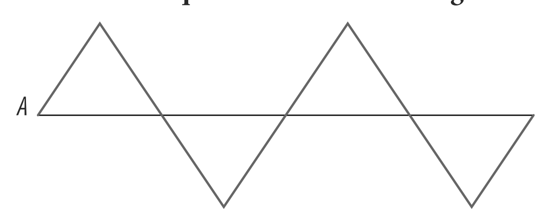
a. En un movimiento oscilatorio, el ________ ________ indica el tiempo que tarda el móvil en realizar una oscilación, mientras que la ________________ es el número de oscilaciones que da el móvil en una unidad de tiempo.

b. Las ________________ aparecen cuando las partículas del medio vibran en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio y las ________________ aparecen cuando las partículas del medio vibran en la misma dirección en la que se propaga el movimiento ondulatorio.

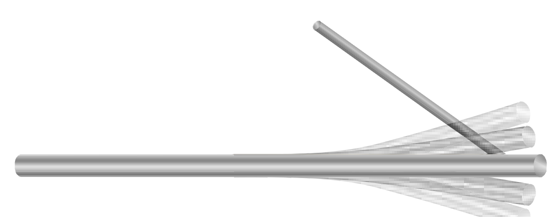
Analiza y resuelve

7 **Responde. ¿Cómo sería la longitud de onda si se hacen vibrar dos cuerdas de distinto material atadas por uno de los extremos?**

8 **Responde. ¿Cómo se tendría que mover una cuerda para que las ondas que se observan sean similares a las que se muestran en la figura?**



9 **Cuando se golpea una varilla por un costado en uno de sus extremos comienza a vibrar como se muestra en la figura. ¿Qué tipo de onda viaja por ella? Explica tu respuesta.**



Actividades

Problemas básicos

10 **Una cuerda de 2 kg de masa se estira entre dos soportes a una distancia de 40 cm. Si la tensión de la cuerda es de 500 N, ¿cuánto tiempo tardará un pulso en viajar de un soporte a otro?**

11 **Una cuerda horizontal se somete a una tensión de 500 N, su masa es de 0,3 kg y su longitud de 150 cm. Si se pone a vibrar con una amplitud de 0,3 m, halla:**

a. La densidad longitudinal de la masa.

b. La velocidad de la onda.

c. La función de onda si la frecuencia es 25 s^{-1}.

12 **Si la velocidad de una onda es de 36 km/h y su frecuencia de 2 Hz, determina la longitud de onda en centímetros.**

13 **La densidad lineal de una cuerda es 0,0125 kg/m y está sometida a una tensión de 125 N. Calcula la velocidad de propagación.**

14 **Un pato que nada en un estanque efectúa cuatro oscilaciones en 5 s. Calcula el período de las ondas causadas por las oscilaciones del pato.**

15 **Calcula la velocidad de propagación de las ondas y su período, sabiendo que la longitud de esta propagación es de 25 cm.**

16 **Un bote que se encuentra flotando en el mar completa ocho oscilaciones en 10 s. Si las ondas de agua en el mar van a una velocidad de 4 m/s, ¿cuál es la longitud de onda?**

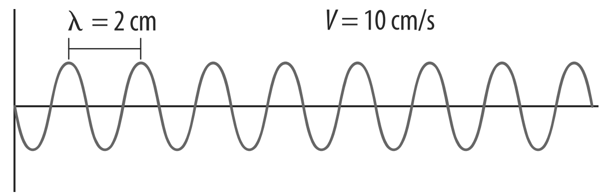
17 **Ciertos quirópteros, como el murciélago, emiten ultrasonidos. Si la frecuencia del sonido emitido es de 3×10^5 Hz, ¿cuál será la longitud de onda de la misma?**

18 **Un bote que se encuentra anclado es movido por ondas cuyas crestas están separadas 15 m y cuya rapidez es de 6 m/s. ¿Con qué frecuencia las olas llegan al bote?**

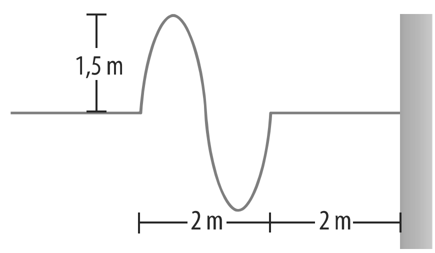
19 **Una onda longitudinal de $\lambda = 2$ cm se propaga en razón de 40 cm en 10 s. ¿Cuánto vale el período? ¿Cuál es su frecuencia?**

20 **Un frente de onda se propaga por la superficie de un estanque con un período de 4 s y una velocidad de 20 m/s. ¿Cuál es el valor de la longitud de onda correspondiente?**

21 **Encuentra el período y la frecuencia del movimiento ondulatorio representado en el gráfico.**



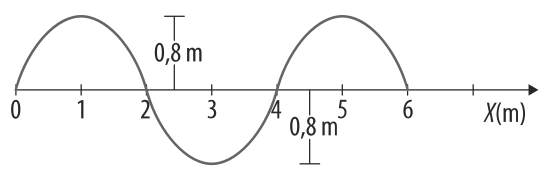
22 **La perturbación sinusoidal representada en la figura para un instante $t = 0$, se propaga de izquierda a derecha en una cuerda que se encuentra fija en su extremo derecho. Si la velocidad de propagación de la onda es de 3 m/s, ¿qué distancia recorre la onda si han transcurrido 2 s después de iniciar la perturbación?**



23 **La figura muestra la propagación de una onda periódica con una frecuencia de 10 Hz. Halla:**

a. La amplitud.

b. La velocidad de propagación.

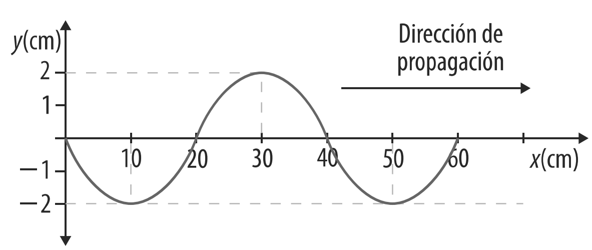


24 **Una cuerda oscila con una frecuencia de 50 Hz como se observa en la gráfica. Halla:**

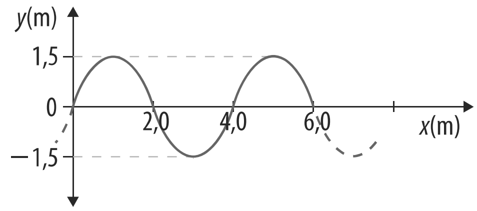
a. La amplitud de oscilación.

b. El período de oscilación.

c. La velocidad de propagación.

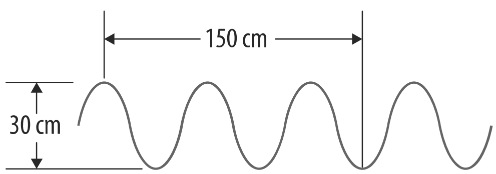


25 **Una onda tiene una frecuencia de 40 Hz y se comporta como se observa en la gráfica.**

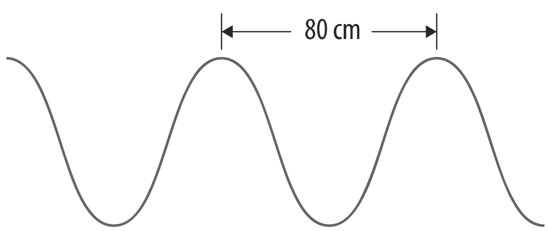


Con las condiciones presentadas, halla el valor de la amplitud y la velocidad de propagación de la onda.

26 **Una onda mecánica se propaga en cierto medio a 1,5 m/s y presenta las características mostradas en la gráfica. ¿Cuál es la frecuencia de la onda?**

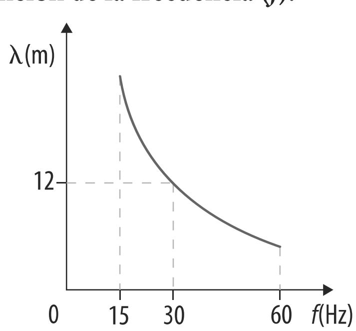


27 **Una onda periódica se propaga con una velocidad de 20 cm/s como se observa en la figura. ¿Cuál es el período de la onda?**



Problemas de profundización

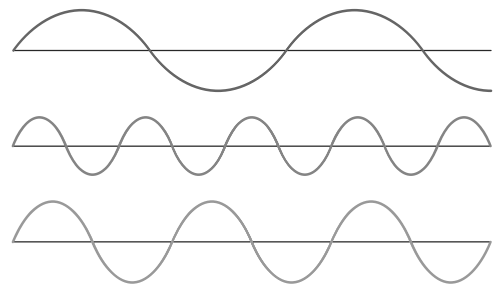
28 **A través de un dispositivo se producen ondas en un medio elástico, de forma que las frecuencias oscilan entre los 15 y 60 Hz, respectivamente. La gráfica muestra cómo varía la longitud de onda (λ) en función de la frecuencia (*f*):**



a. Calcula la longitud de onda menor para esta experiencia.

b. Para una longitud de onda de 12 m, ¿cuál es el período de una onda?

29 **Las tres ondas que se representan en esta ilustración se propagan a la misma intensidad.**



a. ¿Cuál de las tres tiene mayor frecuencia? ¿Por qué?

b. ¿Cuál de las tres tiene mayor longitud de onda? ¿Por qué?

30 **La velocidad de una onda longitudinal en un fluido se expresa mediante la fórmula**

$$v = \sqrt{\frac{1}{\rho k}}$$

donde *k* es el coeficiente de compresibilidad del medio y ρ es la densidad. El módulo de compresibilidad del agua es 13 veces el del mercurio y la densidad del mercurio es 13,6 veces la del agua. ¿Cuál es la razón entre la velocidad de las ondas longitudinales en el mercurio y la velocidad de las ondas longitudinales en el agua?

31 **Una persona observa en una piscina un flotador que realiza 12 oscilaciones en 20 segundos. Si cada pulso tarda 2,5 segundos en recorrer una distancia de 9 m, ¿cuál será la longitud de onda de las ondas en la piscina?**

32 **La cuerda de una guitarra tiene una densidad lineal de 0,015 kg/m y una masa de 8 g. Si la velocidad de propagación de las ondas en la cuerda es de 150 m/s, halla:**

a. La longitud de la cuerda.

b. La tensión que experimenta la cuerda.

33 **Una cuerda que realiza seis oscilaciones en 1,5 s, transmite una energía de 0,08 J. Si la velocidad de propagación de la onda es 18 m/s y su masa es de 0,04 kg, ¿cuál es la amplitud de la onda?**

Actividades

Verifica conceptos

1. **Escribe V, si la afirmación es verdadera o F, si es falsa. Justifica tu respuesta.**
   - ☐ En el fenómeno de la reflexión, para espejos planos, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
   - ☐ El fenómeno de la refracción ocurre cuando la onda choca con un obstáculo y regresa nuevamente.
   - ☐ El principio de Huygens dice que un punto no es un nuevo frente de onda pero la velocidad de las ondas se mantiene constante después de chocar con un obstáculo.
   - ☐ La difracción sucede cuando una onda pasa por un obstáculo tan pequeño como el orden de magnitud de la longitud de onda.
   - ☐ En las señales de frecuencia modulada la amplitud de la onda permanece constante.
   - ☐ En las señales de amplitud modulada, la frecuencia es alterada con variaciones de señales de audio enviadas.

2. **Define los siguientes conceptos:**
   - a. Refracción.
   - b. Reflexión.
   - c. Interferencia.
   - d. Ley de Snell.
   - e. Principio de Huygens.
   - f. Onda estacionaria.

Elige la respuesta correcta.

3. **La interferencia destructiva se da cuando:**
   - ☐ Chocan dos crestas.
   - ☐ Choca una cresta con un valle.
   - ☐ Chocan dos valles.
   - ☐ Ninguna de las anteriores.

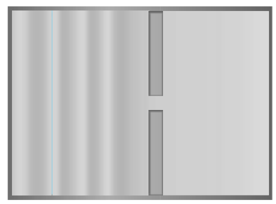
4. **Una onda reflejada es:**
   - ☐ Un frente de ondas secundario que se genera gracias a un obstáculo.
   - ☐ Una onda que pasa de un medio a otro cambiando su velocidad de propagación.
   - ☐ Es aquella que se genera después de chocar con un obstáculo.
   - ☐ Onda que llega libremente a un obstáculo.

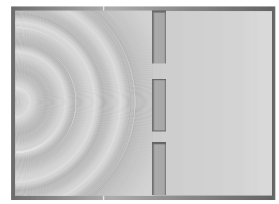
Analiza y resuelve

5. **Si te encuentras de excursión por el campo y a lo lejos se divisa un acantilado, compruebas que la pared del acantilado produce eco. Explica cómo se puede calcular a qué distancia se encuentra.**

6. **Explica por qué en cada extremo fijo de una cuerda en la cual se produce una onda estacionaria siempre hay un nodo.**

7. **Observa los siguientes diagramas y realiza una representación de los frentes de ondas.**



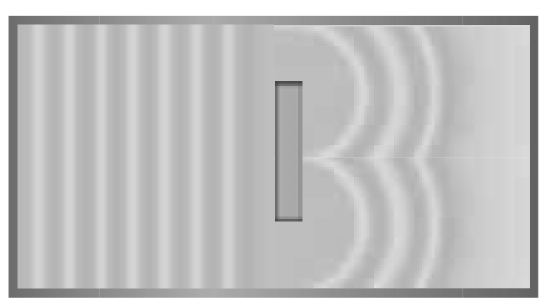


8. **Al saltar lazo se puede observar que el movimiento que describe la cuerda tiene la forma de una onda estacionaria. ¿Se podría considerar esta situación como un ejemplo de onda estacionaria? Explica tu respuesta.**

9. **Explica a partir de un esquema cómo funciona el sonar empleado para medir la profundidad del fondo marino. Indica qué fenómeno ondulatorio se utiliza.**

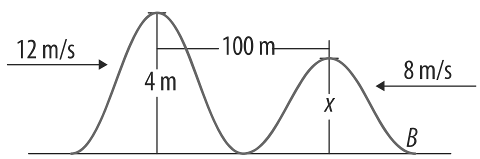
10. **Algunas de las características de las ondas son la frecuencia, la longitud de onda, la velocidad de propagación y el período. De las anteriores características nombradas, ¿cuáles permanecen constantes y cuáles sufren algún cambio cuando se presenta el fenómeno de reflexión? ¿Qué sucederá cuando se presente el fenómeno de refracción?**

11. **Un movimiento ondulatorio se propaga hasta encontrarse con el obstáculo AB, como se muestra en la figura. Explica qué fenómeno ondulatorio se puede presentar después de cruzar la onda el obstáculo.**



Problemas básicos

12 **Responde. ¿Cuál es la amplitud de la onda “B” si la interferencia producida tiene una amplitud de 6 m? ¿Qué tiempo tarda en darse dicha interferencia?**

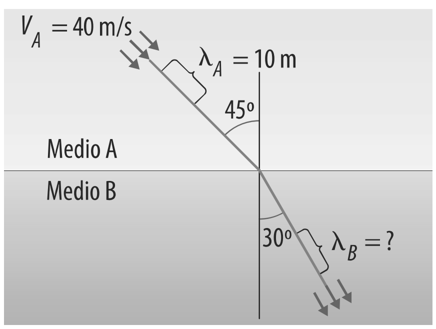


13 **La imagen representa una onda periódica refractada. Determina:**

a. La frecuencia de la onda.

b. La velocidad de la onda en el medio B.

c. La longitud de onda en el medio B.



14 **Una onda se propaga en un medio A, con una velocidad de 0 m/s. Luego, incide en un medio B con un ángulo de 30°, donde su velocidad de propagación será $20\sqrt{3}$ m/s. ¿Cuál es el ángulo de refracción de la onda considerada?**

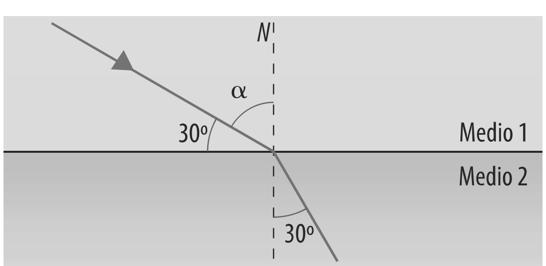
15 **La imagen muestra una onda que pasa de un medio 1 a un medio 2. En el medio 1 la frecuencia de la onda es 1 kHz y su velocidad de propagación $10\sqrt{3}$ m/s. Halla:**

a. La frecuencia de la onda en el medio 2.

b. La longitud de onda en el medio 1.

c. La velocidad de propagación en el medio 2.

d. El índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1.



16 **En la superficie de un lago hay dos frentes de ondas coherentes en fase con una frecuencia de 5 Hz. La velocidad de propagación es 2 cm/s. En el punto *P* hay una fluctuación como se observa en la figura. Halla:**

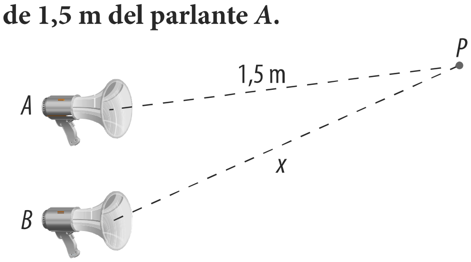
a. ¿Cuál es la longitud de onda de las perturbaciones que se propagan en el lago?

b. ¿Qué diferencia de recorrido hay entre las ondas?

c. ¿Qué tipo de interferencia se debe dar en el punto de encuentro?

Problemas de profundización

17 **La figura muestra dos parlantes separados por una distancia de 2 m. Los parlantes emiten ondas sonoras con una frecuencia de 68 kHz. El punto *P* mostrado en la figura está a una distancia de 1,5 m del parlante *A*.**



Si la velocidad de propagación del sonido es igual a 340 m/s, ¿cuál es la distancia mínima *x* del parlante *B* para que el punto *P* sea un nodo?

18 **Dos fuentes de onda F_1 y F_2, separadas cierta distancia, están en fase y producen ondas con longitudes de 2 cm. En un punto *P*, la superficie del agua dista 9 cm de F_1 y 12 cm de F_2. Responde:**

a. ¿Cuántas longitudes de onda hay entre *P* y F_1 y entre *P* y F_2?

b. ¿En el punto *P* las ondas producidas por F_1 y F_2 forman una interferencia destructiva o constructiva? Justifica tu respuesta.

19 **Dos ondas viajeras con igual amplitud e igual longitud de onda se propagan a lo largo de una cuerda en direcciones contrarias. Determina cuál es la distancia entre dos nodos consecutivos.**

20 **En una cuerda se produce una onda estacionaria con tres nodos que están separados entre sí a una distancia de 15 cm, ¿cuál es la longitud de onda de las ondas que las generan? Si la tensión a la que está sometida es de 10 N y la masa por unidad es de 0,3 kg/m, determina la frecuencia de vibración.**