

La ciencia es la progresiva aproximación del hombre al mundo real.

Max Planck

CONTENIDOS

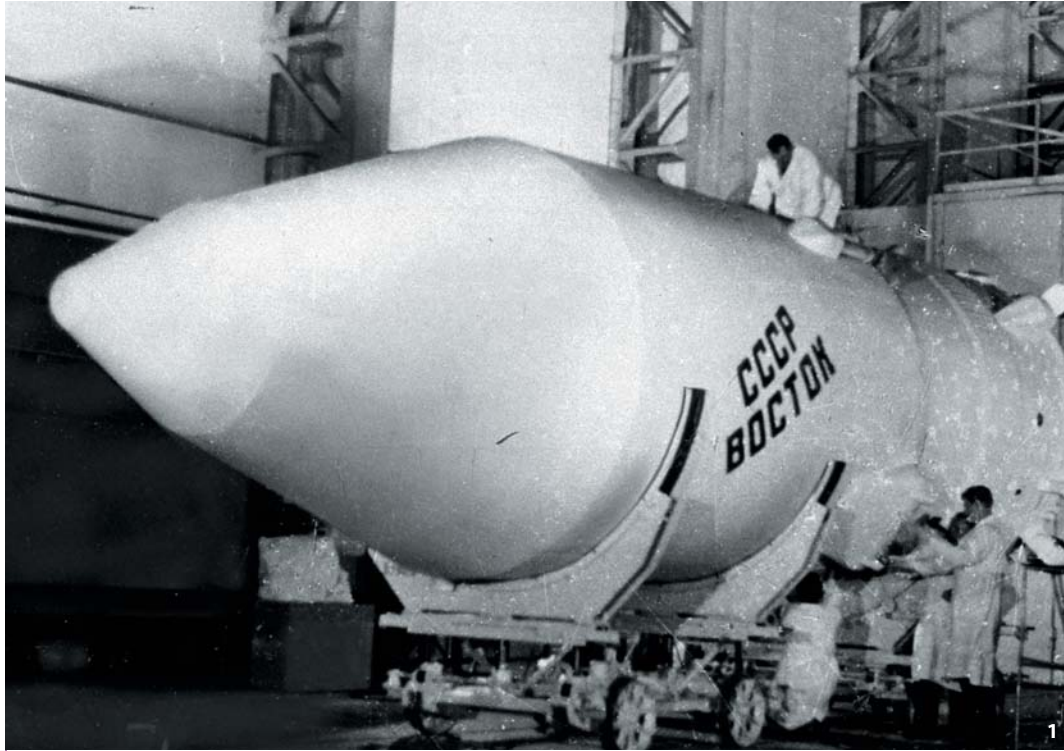
- Introducción
- El movimiento ondulatorio
- Tipos de ondas
- Movimiento oscilatorio
- Ondas armónicas
- Características de una onda
- Ecuación de las ondas
- Propiedades de las ondas
- Ondas estacionarias
- Las ondas y la comunicación satelital

12 LAS ONDAS Y LA TECNOLOGÍA ACTUAL

El estudio de las **ondas** constituye un campo de esencial importancia en Física, ya que permite explicar numerosos hechos y fenómenos de la naturaleza como el sonido y la luz, e interpretar el funcionamiento de varios aparatos de uso cotidiano como radios, televisores o controles remotos, y otros de tecnología más avanzada como teléfonos celulares, horno de microondas, radares, satélites, etc. En cuanto a estos últimos, la era satelital comenzó el 4 de octubre de 1957 cuando la que entonces se llamaba Unión de las Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) ponía en órbita el primer satélite llamado *Sputnik*, hecho que dio inicio a la gran carrera por la conquista del espacio. Más tarde, el 12 de abril de 1961, una nave espacial de cinco toneladas llevaba al espacio al primer astronauta, el ruso Yuri Gagarin. A partir de entonces y hasta la actualidad, fueron lanzados miles de satélites de alta tecnología, no solo para comunicaciones, sino también para llevar a cabo estudios meteorológicos, misiones militares, y distintas investigaciones científicas como las relacionadas con el origen del universo. Todos estos satélites requieren comunicaciones con antenas o radares ubicados en distintos puntos de la Tierra, los cuales emiten y reciben señales mediante procesos ondulatorios. Por otra parte, uno de los principales avances en las últimas décadas ha sido la aplicación de las ondas electromagnéticas en el campo de las ciencias de la salud. Esto permitió, por ejemplo, la construcción de tomógrafos, mamógrafos, y otros aparatos que hacen uso de las radiaciones electromagnéticas para diagnóstico y prevención de enfermedades.

A fines del siglo XVI y principios del XVII, comenzó una gran actividad en el campo de la **Óptica**. El uso de espejos, lentes y algunos aparatos ópticos permitió realizar numerosas experiencias que explicaron y predijeron el comportamiento de algunos fenómenos, como la reflexión y refracción de la luz, su propagación en línea recta, o el cálculo de su velocidad.

Se inició así una discusión científica sobre la naturaleza de la luz, acerca de la que, en esa época, existían dos posturas: el **modelo corpuscular** y el **modelo ondulatorio**.



1. Nave espacial.
2. Yuri Gagarin (primer astronauta ruso).

En su obra *Óptica* (1704), Isaac Newton (1642-1727) enunció la teoría que sostenía que la luz está formada por pequeños corpúsculos emitidos por el objeto luminoso, que se mueven en línea recta. La formación de sombras y penumbras parecía confirmar esta teoría.

El físico holandés Christian Huygens (1629-1695) adoptó el modelo ondulatorio en el que se reconocía cierta analogía entre los fenómenos ópticos y los sonoros. Para los seguidores de esta última teoría, la luz se producía por la vibración de un medio material transparente con propiedades desconocidas al que llamaron **éter**.

El físico escocés James Clark Maxwell (1831-1879) presentó en 1865 su teoría en la que demostró matemáticamente la existencia de campos electromagnéticos que, en forma de ondas, podían propagarse tanto en el vacío como en un medio material.

Max Planck (1858-1947), al estudiar los fenómenos de emisión de radiación electromagnética por parte de la materia, admitió que esta emisión no se da en forma continua, sino discreta, es decir, como a saltos o paquetes de energía, a los que Planck denominó **cuantos** de energía.

Albert Einstein (1879-1955) analizó un fenómeno conocido como **efecto fotoeléctrico**. Dicho efecto consiste en que algunos metales emiten electrones cuando son iluminados. Según Einstein, este fenómeno no podía ser explicado desde el modelo ondulatorio, y tomando como base la idea planteada por Planck, afirmó que no solo la emisión de la radiación se produce en forma discontinua, sino que la propia radiación es discontinua. Estas ideas supusieron el replanteo del modelo corpuscular. Según este nuevo modelo, la luz estaría formada por una sucesión de cuantos elementales. Estos corpúsculos o partículas energéticas recibieron el nombre de *fotones* (tomado del griego *phōtós*, que significa luz).

Las controversias entre corpúsculos y ondas han dejado paso, al cabo de los siglos, a la síntesis de la Física actual: la luz es tanto onda como corpúsculo, y se manifiesta de uno u otro modo en función de la naturaleza del fenómeno que se pretende estudiar.



En esta imagen puede observarse al astronauta James Irwin saludando desde la Luna en su viaje en agosto de 1971 a bordo del Apolo XV.

El movimiento ondulatorio



Las cuerdas vocales vibran al emitir sonidos.

La transmisión de una **perturbación** que se propaga en el tiempo en un medio material, e incluso en el vacío, se puede producir a través de ondas.

Perturbaciones como la luz y el sonido son formas de energía que se propagan en el espacio tiempo a través de ondas.

Cuando una persona habla, vibran sus cuerdas vocales las que transmiten cierta cantidad de su energía interna al aire que rodea su garganta y su boca, y también al espacio que está más cercano a la persona. Esta perturbación se propaga y llega, por ejemplo, a los oídos de otros. Allí impacta sobre el tímpano, una membrana delgada que al vibrar a su vez, transmite la perturbación a un conjunto de huesos muy pequeños que también vibran y producen señales que son captadas finalmente por el nervio auditivo y decodificadas por el cerebro.

Si se pulsa una cuerda tensa de guitarra, se produce una perturbación que se propaga a lo largo de la cuerda y que también se transmite a través del aire que la rodea. Cada partícula de la cuerda se encuentra en reposo hasta que es pulsada. A partir de ese instante oscila durante un cierto tiempo y luego, cuando la onda pasa, vuelve a la posición de equilibrio. El pulso se ha propagado a lo largo de la cuerda transmitiendo energía, pero no materia. Ninguna partícula de la cuerda se ha desplazado junto con el pulso.

Si se arroja una piedra en la superficie de un lago en la que flota un corcho, se produce un movimiento vibratorio en las partículas de agua alcanzadas por la piedra. Luego de un tiempo, el corcho también oscilará.

La piedra produce una perturbación sobre la superficie del agua que se propaga en forma de ondas circulares. Si la onda llega al corcho, éste oscila y cuando la onda ha pasado, el corcho retoma su posición de equilibrio sin desplazarse con la onda. La piedra transfiere cierta cantidad de energía al medio, en este caso al agua, que se propaga en forma de onda.

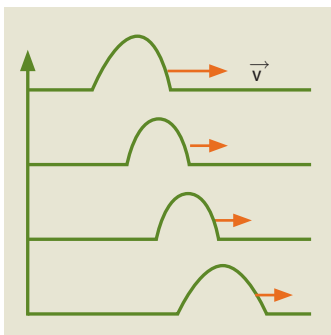
■ En estos ejemplos están comprendidos diferentes tipos de ondas, pero todas ellas tienen en común que resultan de una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo.

■ Para que se originen ondas, tiene que existir un sistema emisor que oscile y transmita energía.

■ En algunos casos, es necesario un medio material de propagación, como por ejemplo el aire, la cuerda, el agua, etc.

■ Las ondas de luz y las radiaciones producidas por las oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos en el tiempo, se propagan en el vacío a una velocidad de 300 000 km/s.

■ La velocidad de propagación de una determinada onda depende del tipo de onda y de las características del medio en el que se transmite la perturbación.



Propagación de un pulso en una cuerda.

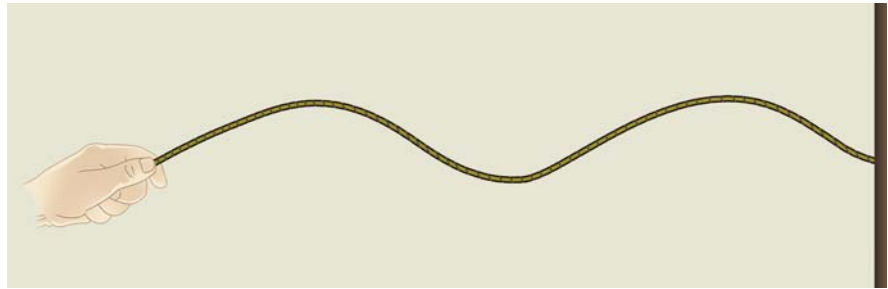


Si se arroja una piedra en una superficie de agua, se genera una perturbación que se propaga a través de ondas circulares.

Tipos de ondas

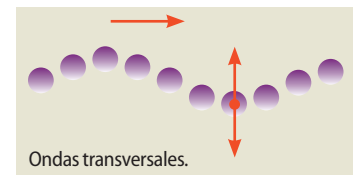
Se denomina **onda mecánica** a una perturbación que se propaga por un medio material transportando energía mecánica.

Por ejemplo, si una persona genera un pulso en el extremo de una soga, se producen vibraciones en los puntos de la soga cercanos a la mano. La energía se transmite a través de cada partícula de la soga (medio material), una a una si las consideramos puntuales, hasta llegar al otro extremo.

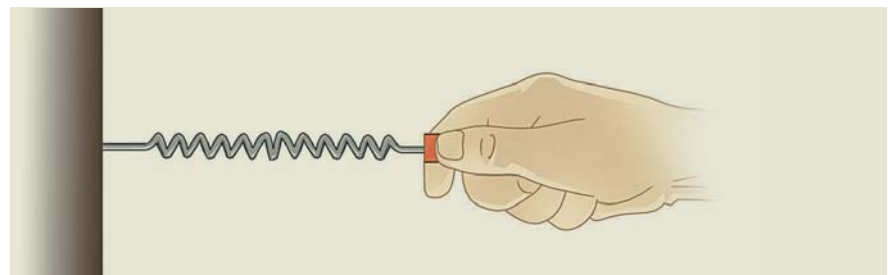


Cada punto de la soga oscila hacia arriba y abajo con respecto a su posición original en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Si en lugar de producir un pulso se genera un movimiento continuo hacia arriba y abajo con respecto a la posición de equilibrio, se produce una sucesión de pulsos. En este caso, todas las partículas de la soga vibran al ser alcanzadas por el movimiento ondulatorio.

Ondas mecánicas transversales generadas por un pulso sobre un extremo de una soga.



Por el contrario, si se considera un resorte y se comprime en uno de sus extremos, las espiras oscilan en la misma dirección en que se propaga la onda. Cuando se suelta el extremo, las espiras tienden a regresar a su posición original. El movimiento de compresión y elongación de las espiras se transmite a lo largo de todo el resorte con una determinada velocidad de propagación, que depende del tipo de pulso generado y de la elasticidad del medio o características del resorte.

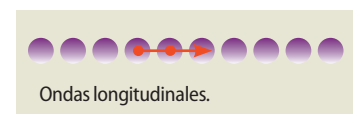


Ondas mecánicas longitudinales generadas en un resorte.

En estos dos ejemplos se originan ondas mecánicas que transmiten energía a través de un medio material. Si las partículas del medio en el

que se propaga la perturbación vibran en un eje perpendicular a la dirección de propagación, las **ondas** se llaman **transversales**, como el caso de la soga.

Si las partículas vibran en un eje paralelo a la dirección de propagación, las **ondas** se denominan **longitudinales**, como ocurre en el resorte.

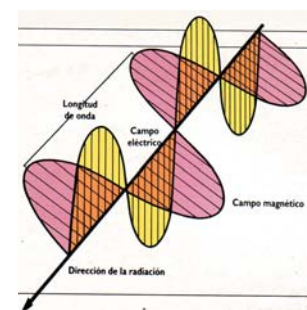


Una onda longitudinal siempre es mecánica, es decir se propaga en un medio material. Las ondas sonoras son un ejemplo típico de esta forma de movimiento ondulatorio.

Las ondas transversales pueden ser mecánicas, como las que se propagan a lo largo de una cuerda tensa cuando se produce una perturbación en uno de sus extremos, o **electromagnéticas**, como las de la luz, los rayos X, la radio, o las microondas.

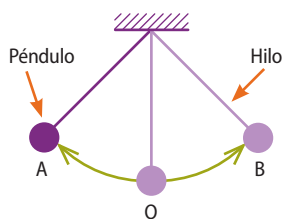
En el caso de las ondas electromagnéticas, que también pueden propagarse en el vacío, el campo eléctrico oscila en un eje perpendicular a la dirección de propagación; el campo magnético también oscila, pero en dirección perpendicular al campo eléctrico.

Algunos fenómenos ondulatorios mecánicos, como las olas superficiales de los líquidos, son combinaciones de movimientos longitudinales y transversales más complejos, por lo cual las partículas de líquido se mueven de forma elíptica.

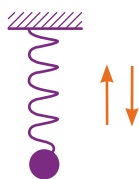


Las ondas electromagnéticas se originan por la variación de campos magnéticos y eléctricos en el tiempo, en forma perpendicular a la dirección de propagación.

Movimiento oscilatorio armónico



Movimiento oscilatorio de un péndulo.



Movimiento oscilatorio vertical de un cuerpo colgado de un resorte.

Para comprender y describir las perturbaciones que se producen en un punto alcanzado por una onda, resulta necesario analizar el denominado **movimiento oscilatorio armónico**.

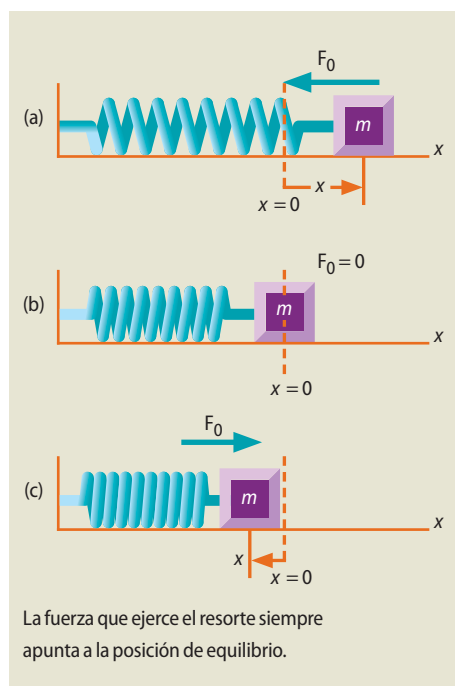
Si se considera un dispositivo formado por un pequeño cuerpo que cuelga de un hilo fijo en un extremo, que se denomina **péndulo**, y se aparta el cuerpo de su posición de equilibrio O hasta la posición A y se lo suelta, el cuerpo alcanzará otra posición, B, después de pasar por O. Luego volverá a la posición A y así continuará con este movimiento cíclico, si el rozamiento con el aire es despreciable.

Todo movimiento que se repite cada cierto período regular de tiempo se denomina **periódico**. El tiempo que tarda el cuerpo en efectuar un movimiento completo se llama **período**, se representa con la letra T y en el SI se mide en segundos como ya se analizó para el movimiento circular uniforme.

El movimiento del péndulo, además de ser periódico, es **oscilatorio**. Los cuerpos que tienen movimientos oscilatorios se caracterizan, como ocurre con el péndulo, por tener una posición de equilibrio. Apartados de esa posición pasan sucesivamente por ella apartándose igual distancia a ambos lados durante su movimiento.

Este tipo de movimiento también lo realiza un cuerpo unido a un resorte fijo a una pared (suponiendo despreciable el rozamiento con el piso).

Si se desplaza el cuerpo de su posición de equilibrio, se origina una fuerza elástica de restauración que tiende primero a regresar el sistema hacia la posición de equilibrio, luego a superar esta posición, y finalmente a frenarlo en el otro extremo. Desde este lugar, la fuerza elástica vuelve a llevarlo hasta la posición de equilibrio y luego hasta el otro extremo, generando en el cuerpo oscilaciones que se mantienen por acción del resorte.

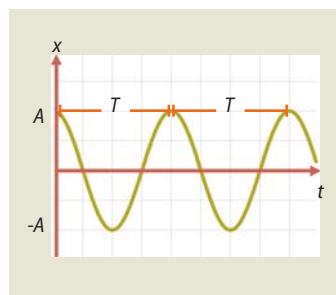


Para determinar experimentalmente la forma de la ecuación horaria de este movimiento se propone un sistema cartesiano en el que el eje x coincide con la dirección del movimiento y el origen está en la posición de equilibrio, y se miden los tiempos para las distintas posiciones.

Esto se puede hacer tomando fotos del cuerpo en determinados intervalos de tiempo, o utilizando unos dispositivos llamados **sensores de posición**, que permiten el registro de los datos por medio de programas informáticos.

Para representar gráficamente la función que relaciona las posiciones del cuerpo en función del tiempo, se consideran los tiempos sobre el eje x y, sobre el eje de las ordenadas, las sucesivas posiciones que alcanza el cuerpo con respecto a su posición de equilibrio.

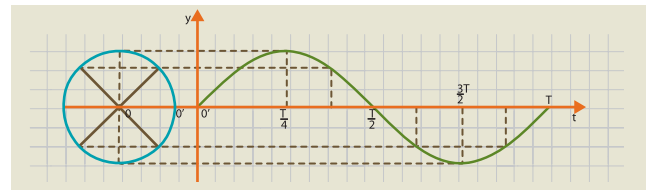
Las curvas que se obtienen en esta representación gráfica son similares a las funciones trigonométricas seno y coseno, características de estos movimientos y que además, confirman su periodicidad.



Este gráfico relaciona las posiciones del cuerpo que oscila en el sistema cuerpo-resorte con el tiempo, y muestra que el movimiento que se produce es periódico.

Para deducir la ecuación horaria del movimiento oscilatorio armónico (MOA) se puede utilizar la proyección de un cuerpo que gira con movimiento circular uniforme sobre un eje vertical que pasa por el centro de su trayectoria.

Si se considera el punto O , centro de la circunferencia, como origen del eje vertical y se supone que el cuerpo que recorre la circunferencia se encuentra en el punto O' , para un tiempo $t = 0$ la proyección coincide con el centro de circunferencia O .



Cuando el cuerpo recorre una vuelta completa, su proyección sobre el eje vertical hará un movimiento similar al que haría un cuerpo unido a un resorte vertical.

Para un tiempo que corresponda a un cuarto del período, es decir, para $t = \frac{T}{4}$, el recorrido del cuerpo corresponde a un cuarto de vuelta y su proyección llegará al punto más alto; para un tiempo $t = \frac{T}{2}$, el cuerpo recorre la mitad de la circunferencia y su proyección, hacia abajo, coincide nuevamente con O etc. Cuando el cuerpo ha recorrido la circunferencia completa, el tiempo transcurrido es equivalente a un período y el movimiento se repite. El valor de la coordenada de la proyección se puede calcular a partir de la expresión: $y = A \cdot \text{sen } \alpha$ (1) en la que A (amplitud del MOA) corresponde al radio de la trayectoria del movimiento circular, y α al ángulo central considerado en la circunferencia.

En el movimiento circular uniforme, la velocidad angular es: $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (2) donde ω es la velocidad angular y T es el tiempo empleado en dar una vuelta completa. El período de dicho movimiento coincide en este caso con el del MOA, ya que el móvil tarda el mismo tiempo en dar una vuelta completa que el que su proyección tarda en una oscilación completa.

Además, según la definición de velocidad angular ya vista, es posible escribir: $\alpha = \omega \cdot t$ (3)

O sea $\omega = \frac{\alpha}{t}$.

Por lo tanto se deduce que (2) y (3) $\frac{2\pi}{T} = \frac{\alpha}{t} \Rightarrow \alpha = \frac{2\pi}{T} \cdot t$

Con lo cual, reemplazando esta última igualdad en (1) se obtiene la expresión de la ecuación horaria del un MOA que es:

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

donde y es la posición en el tiempo t , A es la amplitud del MOA y T al intervalo de tiempo en el que se produce una oscilación completa.

▶ Por ejemplo, si una partícula se mueve con MOA y su ecuación es:

$$y = 10 \text{ cm} \cdot \text{sen} \frac{\pi}{45} \cdot t,$$

su posición en el instante $t = 5$ s será:

$$y = 10 \text{ cm} \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{45} \cdot 5 \text{ s} \right) \approx -7 \text{ cm}$$

Entonces, la partícula se encuentra a -7 cm, es decir a 7 cm del origen considerado, pero en el semieje negativo.

Las ondas armónicas

Si se perturba el extremo de una cuerda, de modo tal que se produzca un movimiento oscilatorio armónico en torno a la posición de equilibrio, la onda que se propaga se denomina **onda armónica**. Cada punto del medio alcanzado por la perturbación producida por la fuente también oscila con igual amplitud y período. Este proceso no solo sucede con las ondas mecánicas; también se puede dar en ondas electromagnéticas en las que las oscilaciones armónicas se producen en los campos eléctrico y magnético de los puntos alcanzados por la onda.

Muchos fenómenos ondulatorios se pueden explicar teniendo en cuenta que las ondas resultantes pueden surgir de la superposición de ondas armónicas o periódicas.

El matemático francés Jean Fourier (1768-1830) demostró que cualquier vibración, por compleja que sea, puede ser reconstruida mediante una suma de vibraciones armónicas simples. En el que se conoce como **Teorema de Fourier**, sostiene que toda función periódica continua puede desarrollarse como una combinación de funciones sinusoidales. A partir de esta propiedad es posible analizar ondas complejas como el sonido de una orquesta, mediante la superposición de ondas armónicas.

Características de una onda

Como se ha dicho, el **modelo de ondas** permite describir muchos fenómenos físicos. Las ondas no se ven, pero pueden observarse sus efectos, por lo tanto su representación gráfica no es la realidad misma sino solo una forma de interpretarla, un modelo que permite su descripción y comprensión. Para caracterizar una onda y diferenciarla de otra, es necesario tener presentes algunas magnitudes que aportan información sobre sus propiedades.

Si se considera un par de ejes cartesianos, de modo que el eje y corresponde a la dirección de oscilación y el eje x a la dirección de propagación de la onda, y se analizan las posiciones de los puntos del medio alcanzados por la onda en un **cierto instante**, se puede observar que existen valores máximos y mínimos. Para obtenerlos se considera el desplazamiento de la onda respecto del eje positivo o negativo de las ordenadas (posición de equilibrio) una misma cantidad A . Este valor se denomina **amplitud** de la onda.

A las posiciones máximas se las denomina **crestas** y a las mínimas, **valles**.

Las posiciones o puntos intermedios están caracterizados por una coordenada y que se denomina **elongación**.

La distancia entre dos máximos o dos mínimos consecutivos se llama **longitud de onda** y se simboliza λ . Cada onda tiene su longitud de onda característica que se mide en metros. También se utilizan algunos de sus múltiplos y submúltiplos como kilómetros, centímetros, nanómetros (10^{-9} m), ångströms (10^{-10} m), etc.

El **período** de la onda (T) corresponde al intervalo de tiempo en el cual se produce una oscilación completa. En ese tiempo, la perturbación recorre una longitud de onda.

La **frecuencia** (f) es el número de oscilaciones completas que se realizan por unidad de tiempo. Su unidad de medida es la oscilación por segundo o **hertz** (Hz). Si $f = \frac{1}{5}$ la onda tiene una frecuencia de un hertz. Es decir $1 \text{ Hz} = \frac{1}{s}$.

Para frecuencias muy altas se utilizan algunos múltiplos como kilohertz ($1 \text{ kHz} = 10^3$ Hz) o megahertz ($1 \text{ MHz} = 10^6$ Hz).

La velocidad de propagación de la onda depende del tipo de onda y del medio en el que se propaga. Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido en el aire a 20°C es aproximadamente 340 m/s , mientras que la velocidad de propagación de la luz en el vacío es $300\,000 \text{ km/s}$. Como la velocidad es constante para cada medio, en tanto se mantengan las condiciones, su módulo se puede calcular tomando en cuenta la distancia recorrida por la perturbación y el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia.

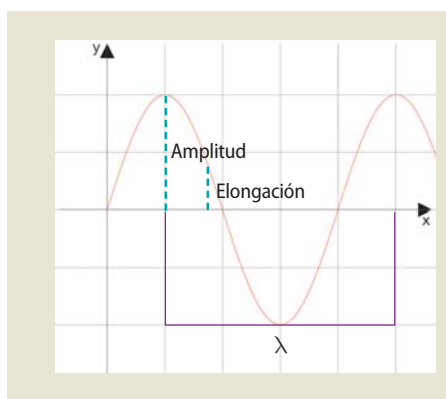
Considerando que la señal recorre una longitud de onda, λ , en un período T , se puede calcular su velocidad mediante la expresión:

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

Además, teniendo en cuenta que la frecuencia se define también como la inversa del período $f = \frac{1}{T}$ y reemplazando en la fórmula anterior, se obtiene que:

$$v = \lambda \cdot f$$

donde v es la velocidad de la onda, λ su longitud y f su período.



Aplicaciones de las características de una onda

1. Calculen la longitud de onda de una señal electromagnética emitida por la estación de radio FM 106.3.

Como la emisora de radio transmite en una frecuencia de aproximadamente 106.3 megahertz $v = \lambda \cdot f$, entonces:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300\,000 \text{ km/s}}{106,3 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,063 \cdot 10^8 \text{ 1/s}} \approx 2,83 \text{ m}$$

La longitud de onda de esta señal es aproximadamente 2,83 m.

2. Calculen la frecuencia de la nota musical mi, sabiendo que tiene una longitud de onda aproximada de 103 cm.

Como se trata de una señal sonora, se considera la velocidad de propagación del sonido en el aire a 20 °C que es 340 m/s. Como $v = \lambda \cdot f$, entonces:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{1,03 \text{ m}} \approx 330 \frac{1}{\text{s}} = 330 \text{ Hz}$$

La frecuencia de la nota musical mi es 330 Hz.

1. El emisor de ultrasonidos de un ecógrafo emite ondas de $2 \cdot 10^5$ Hz que penetran en el cuerpo humano donde su velocidad de propagación es de 1500 m/s. Si el aparato puede detectar detalles del tamaño de su longitud de onda, ¿cuál es el mínimo tamaño de los detalles que puede captar?

2. ¿Cuál es la frecuencia de una onda de luz monocromática de longitud de onda $6 \cdot 10^{-7}$ m que se desplaza en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s)?

3. Una onda de luz monocromática de frecuencia $4 \cdot 10^{14}$ Hz penetra en vidrio donde su longitud de onda es $5 \cdot 10^{-7}$ m. ¿Cuál es la velocidad de propagación de la luz en ese tipo de vidrio?

La ecuación de las ondas

La propagación de una onda se describe con una ecuación que permite predecir el estado de oscilación de cualquier punto alcanzado por la onda en cualquier instante. Esta ecuación se denomina **ecuación de onda** y debe ser función tanto de la posición como del tiempo.

Si se considera una onda que se propaga, por ejemplo, por una soga, con una velocidad constante, al trazar los ejes cartesianos se observa que el pulso se mueve a lo largo del eje x y el desplazamiento transversal de la soga se mide sobre el eje y . Una función que permite estudiar esta situación es $y = f(x)$ siempre que el tiempo se mantenga fijo. Si se toma una fotografía de un auto en movimiento, la imagen representará su posición en ese instante. Es posible decir lo mismo para el caso de la soga por la cual se propaga la onda. Pero como la posición de cada punto varía con el tiempo, otra función que podría representar esta situación sería, para cada punto, $y = f(t)$.

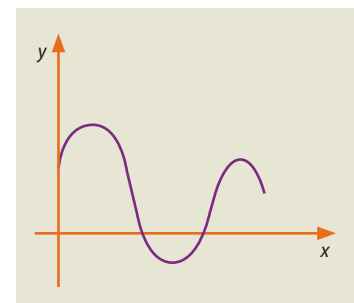
La ecuación de onda debe contemplar simultáneamente ambas situaciones, es decir predecir la primera situación para cualquier tiempo y la segunda, para cualquier punto del medio alcanzado por la onda, por lo que deberá ser una función de la posición y del tiempo: $y = f(x, t)$. El desarrollo matemático de esta expresión se puede escribir como:

$$y = A \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (5)$$

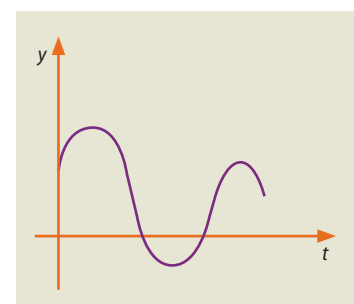
donde A es la amplitud, λ la longitud de onda y T es el período.

Por lo tanto, la ecuación de una onda permite calcular la perturbación de cualquier punto del medio en cualquier instante;

- si se fija el valor de x , la ecuación permite conocer la elongación de una partícula concreta en cualquier instante;
- si se fija el valor de t , la ecuación de onda representa la forma de la onda en un instante determinado.



$y = f(x)$ da la perturbación en un tiempo t .



$y = f(t)$ da las elongaciones de un punto de la onda.

Aplicaciones de la ecuación de ondas

1. Si la ecuación de una onda transversal que se propaga a lo largo de una cuerda está dada por la expresión: $y = 0,1 \text{ m} \cos \pi (8 \text{ m}^{-1} \cdot x - 4 \text{ s}^{-1}t)$, hallen:

- la amplitud de la onda;
- el período;
- la longitud de onda;
- la velocidad de propagación;
- la magnitud de la perturbación en un punto que se encuentra a 0,4 m de la fuente al cabo de 0,5 segundos de comenzar a contar el tiempo.

Para conocer las características de esta onda en particular se puede comparar su ecuación $y = 0,1 \text{ m} \cos \pi (8 \text{ m}^{-1} \cdot x - 4 \text{ s}^{-1}t)$, con la ecuación general de las ondas

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

Para que la comparación sea más sencilla, se puede sacar 2 como factor común del argumento en la ecuación de la onda transversal a lo largo de una cuerda:

$$y = 0,1 \text{ m} \cos \pi (8 \text{ m}^{-1} \cdot x - 4 \text{ s}^{-1}t) = 0,1 \text{ m} \cos 2\pi (4 \text{ m}^{-1} \cdot x - 2 \text{ s}^{-1}t). \quad (6)$$

- La amplitud A es el factor que multiplica a la función coseno, en este caso $A = 0,1 \text{ m}$
- Si se compara el argumento de la función coseno en la ecuación de onda y en la expresión (6), se tiene: $\frac{1}{T} = 2 \text{ s}^{-1}$ por lo que $T = 0,5 \text{ s}$.
- Para hallar la longitud de onda se procede de igual manera. La comparación de los argumentos de ambas ecuaciones lleva a que $\frac{1}{\lambda} = 4 \text{ m}^{-1}$ por lo que $\lambda = 0,25 \text{ m}$.
- La velocidad de propagación se puede calcular con la ecuación $v = \frac{\lambda}{T}$.

$$v = \frac{0,25 \text{ m}}{0,5 \text{ s}} = 0,5 \text{ m/s}.$$

- Reemplazando los valores $t = 0,5 \text{ s}$ y $x = 0,4 \text{ m}$ en la ecuación (5) se tiene:
 $y = 0,1 \text{ m} \cos 2\pi \left(\frac{0,4 \text{ m}}{0,25 \text{ m}} - \frac{0,5 \text{ s}}{0,5 \text{ s}} \right) = 0,1 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (0,6) \approx 0,1 \cdot (-0,8) \text{ m} = -0,8 \text{ cm}$.
 Esto significa que en este punto y en ese instante la magnitud de la perturbación está dada por la elongación que alcanza la cuerda, es decir $y = -0,8 \text{ cm}$.

2. Si la onda generada en una cuerda tensa tiene una amplitud de 0,05 m, una frecuencia de 20 Hz y una velocidad de propagación de 10 m/s,

- escriban la ecuación de onda;
- determinen la posición de un punto ubicado a 0,5 m del origen cuando transcurrió 0,1 segundo desde que se comenzó a tomar el tiempo.

a. La ecuación de onda es $y = A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$. Como $v = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$. Luego,

$$\lambda = \frac{10 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = \frac{10 \text{ m/s}}{20 \text{ 1/s}} = 0,5 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta, además, que la relación entre el período y la frecuencia es: $T = \frac{1}{f}$, se verifica que $T = \frac{1}{20 \text{ s}^{-1}} = 0,05 \text{ s}$, entonces la ecuación de onda es:

$$y = 0,05 \text{ m} \cdot \cos 2\pi \left(\frac{x}{0,5 \text{ m}} - \frac{t}{0,05 \text{ s}} \right)$$

b. La posición de un punto ubicado a $x = 0,5 \text{ m}$ del origen en $t = 0,1 \text{ s}$ es:

$$y = 0,05 \text{ m} \cdot \cos 2\pi \left(\frac{0,5 \text{ m}}{0,5 \text{ m}} - \frac{0,1 \text{ s}}{0,05 \text{ s}} \right) = 0,05 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (-1) = 0,05 \text{ m}$$

El punto ubicado a 0,5 m del origen, a 0,1 segundo tiene una elongación de 0,05 m.



4. Una onda de 8 s de período y 4 cm de longitud de onda presenta una elongación de 20 cm en un punto ubicado en la posición $x = 1 \text{ cm}$ cuando ha transcurrido 1 s de movimiento.

- Calculen su amplitud y escriban su ecuación.
- Determinen la velocidad de propagación.

5. La ecuación de una onda es:

$$y = 0,5 \text{ m} \cdot \cos 2\pi \left(\frac{x}{2 \text{ m}} - \frac{t}{2 \text{ s}} \right)$$

Determinen:

- su amplitud, longitud de onda, frecuencia y velocidad;
- la elongación de un punto ubicado en la coordenada $x = 1 \text{ m}$ cuando ha transcurrido 0,5 s.

6. Una onda que tiene una ecuación

$$y = 0,4 \text{ m} \cdot \cos 2\pi \left(\frac{x}{2 \text{ m}} - \frac{t}{4 \text{ s}} \right)$$

pasa del medio en el que se propagaba a otro donde su velocidad se duplica y su amplitud se reduce a la mitad. Escriban la ecuación de propagación de la onda en el segundo medio, considerando que su frecuencia permanece constante.

Propiedades de las ondas

Existen propiedades que caracterizan a los fenómenos ondulatorios. En cuanto a su propagación, las ondas se reflejan y se refractan. Al llegar a obstáculos comparables con su longitud de ondas, sufren el fenómeno de difracción y se interfieren entre ellas al llegar simultáneamente al mismo lugar.

Reflexión

Si una onda incide sobre un cuerpo que obstaculiza su propagación, se **refleja**. Esto significa que vuelve al medio en el cual se propaga. Como la onda transporta energía, cierta cantidad de esta energía es absorbida por el cuerpo sobre el cual incide, y otra parte de energía vuelve como una onda de igual frecuencia y velocidad.

Cuando la luz llega por ejemplo a un espejo, se refleja y cambia su dirección al incidir sobre la superficie del espejo, transfiriendo al mismo medio gran parte de la energía que transporta.

Del mismo modo, el sonido puede reflejarse cuando incide sobre un obstáculo que impide su propagación. El **eco** es un ejemplo característico de esta propiedad.

Refracción

La **refracción** se produce cuando una onda llega a una superficie que separa dos medios de propagación distintos. Parte de la energía vuelve al medio por el que se propagaba y el resto pasa al otro medio.

La onda refractada mantiene su frecuencia porque es una característica de la fuente de emisión de la onda, pero varía su velocidad de propagación, ya que los medios son diferentes. Al variar su velocidad de propagación, también varía su longitud de onda. El ángulo de desviación o de refracción formado por la dirección en que se propaga la onda incidente y una recta perpendicular a la superficie de separación en el punto de incidencia, depende de las características de los medios de propagación.

Por ejemplo, una onda luminosa que llega desde el aire sufre mayor desviación en el vidrio que en el agua.

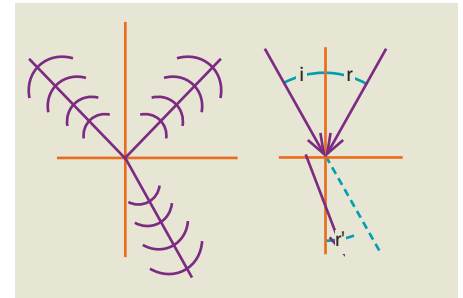
Difracción

Cuando una onda llega a una ranura o un obstáculo de tamaño comparable con su longitud de onda, se produce un fenómeno denominado **difracción** que consiste en la desviación de la onda como si el obstáculo emitiese una onda esférica.

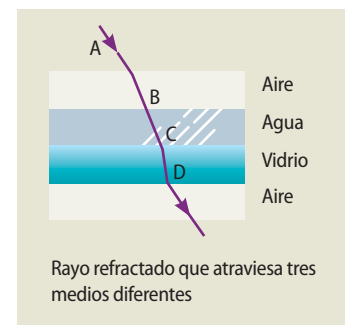
Si la longitud de onda es comparable con el tamaño del obstáculo, el efecto de la difracción es muy notable. La onda se desvía y de esa manera lleva energía a lugares que serían inaccesibles para la onda si no hubiese difracción. Por ejemplo, si se trata de ondas luminosas que llegan a un obstáculo pequeño, como un cabello, la propagación rectilínea de la luz prevé sombras detrás de éste. La difracción hace que la luz dé una sombra difusa y regiones iluminadas a su alrededor.

Si las dimensiones del obstáculo o de la ranura son mucho más grandes que la longitud de onda, no se observará tal difracción, por lo cual los bordes del objeto formarán sombras bien definidas.

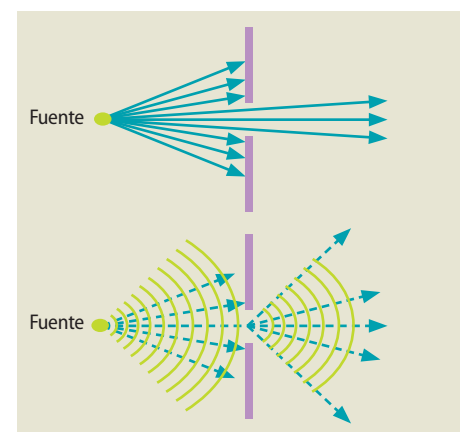
En el campo de las comunicaciones, las señales de radio de grandes longitudes de onda se utilizan para mejorar el alcance, ya que pueden difractarse al pasar por edificios cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con las longitudes de estas ondas.



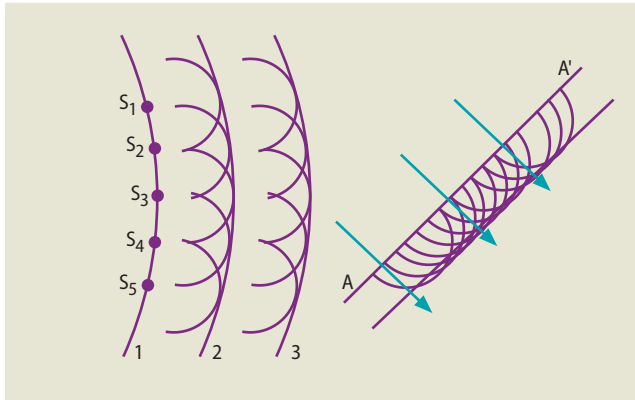
Cuando una onda llega a una superficie de separación entre dos medios de propagación distintos, la onda se refleja y se refracta.



Este gráfico representa una onda luminosa, que se refracta de formas diferentes en diferentes medios de propagación.



Difracción de ondas al pasar por una ranura pequeña.



Producción de frentes de ondas según el Principio de Huygens.

Principio de Huygens

Un **frente de onda** es una superficie que pasa por todos los puntos del medio alcanzados por el movimiento ondulatorio en el mismo instante. La perturbación en todos esos puntos tiene la misma fase. El **Principio de Huygens** proporciona un método geométrico para hallar, a partir de una forma conocida del frente de ondas en cierto instante, la forma que adoptará dicho frente en otro instante posterior. Para ello se trazan una serie de líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda. Estas líneas se denominan **rayos** y corresponden a las líneas de propagación de la onda. Cuando el movimiento ondulatorio alcanza los puntos S_1 , S_2 , S_3 , etc. que forman un frente de onda, cada partícula del frente se convierte en un centro emisor de nuevas ondas secundarias (indicadas en el gráfico por semicircunferencias) cuya envolvente es un nuevo frente de ondas que

alcanza la siguiente zona de partículas del medio.

Este principio permite comprender el fenómeno de la difracción. Cuando una onda llega a un obstáculo, los puntos de éste se convierten en nuevos centros emisores de ondas secundarias. De esta forma, las ondas pueden llegar a regiones ocultas por el obstáculo.

Interferencia

Si existe una única fuente emisora de ondas, la perturbación de cada punto del espacio corresponde a la onda que procede de esa fuente. Pero puede ocurrir que existan varias fuentes emisoras en un mismo lugar, por lo cual se produce una **superposición** de ondas.

En dos ondas que avanzan por una soga en sentidos opuestos pueden ocurrir tres sucesos:

- las dos ondas se encuentran en un punto en el cual coinciden sus máximas amplitudes; se dice que están en **fase**; la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de cada onda;

- las dos ondas llegan a un mismo punto pero la máxima amplitud de una onda hacia arriba coincide con la máxima amplitud de la otra, hacia abajo; en este caso sus efectos se restan y no se produce oscilación en ese punto (si ambas ondas tienen la misma amplitud). Esta situación se denomina **oposición de fase**;

- las ondas llegan a un mismo punto pero no están en concordancia de fase ni en oposición de fase. Entonces sus efectos también se suman.

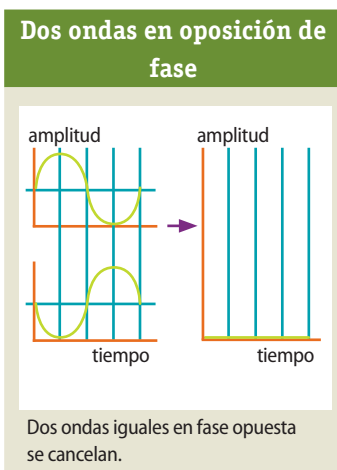
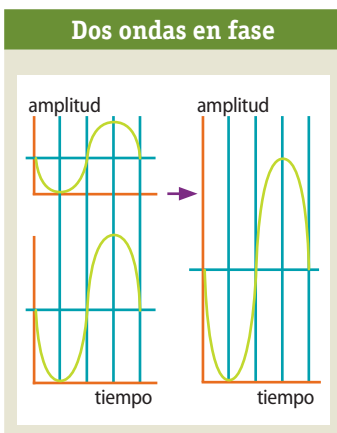
Dos ondas son **coherentes** si llegan al mismo punto manteniendo igual diferencia de fase, siempre en concordancia o en oposición de fase, independientemente del tiempo. Una superposición de ondas coherentes se denomina **interferencia**.

Si a un punto A llegan dos ondas coherentes en concordancia de fase, se potencian sus efectos. La onda resultante tendrá mayor amplitud. Este punto será un máximo de interferencia y se llama **constructiva**.

Si las ondas coherentes son emitidas por dos fuentes F_1 y F_2 y para llegar al punto A, cada onda recorre respectivamente una distancia D_1 y D_2 , la diferencia entre los caminos para llegar a A es $\Delta D = D_1 - D_2$.

Si ΔD es un múltiplo entero de la longitud de onda λ , en el punto A habrá un máximo de interferencia. Es decir, para que haya un punto de interferencia constructiva debe ser $\Delta D = n \cdot \lambda$ donde n es un número entero.

En cambio, si las ondas coherentes llegan al mismo punto en oposición de fase, se produce una interferencia **destruktiva** en ese punto. El efecto resultante en ese punto es menor que el efecto provocando por cada onda y hasta puede anularse. Esta situación ocurrirá cada vez que $\Delta D = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$, etc., o bien $\Delta D = \frac{p}{2}\lambda$, donde p es un número impar.



Ondas estacionarias

Cuando dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia avanzan en sentidos opuestos a través de un medio, se producen **ondas estacionarias**, que resultan de la superposición de las anteriores y presentan interés para la explicación de algunos fenómenos, como la emisión de sonido por parte de instrumentos musicales de cuerda o de viento. Por ejemplo, si se sujeta una cuerda a una pared y se mantiene fijo el otro extremo, cuando se produce una perturbación continua, la onda avanza hasta un extremo donde se refleja en sentido opuesto. La onda primitiva y la reflejada interfieren y el resultado es una onda estacionaria en la cuerda.

Esta onda se caracteriza por la existencia de puntos que se mantienen sin oscilar, denominados **nodos**. Entre dos nodos hay un punto denominado **vientre**, que oscila con una amplitud igual al doble de la que tenía la onda inicial.

Como se observa en las figuras, en las ondas estacionarias la amplitud de oscilación de cada punto del medio se mantiene constante en el tiempo. Cuando se generan ondas en una cuerda fija en ambos extremos, estos puntos son nodos, ya que por estar fijos no pueden oscilar. Por lo tanto si se perturba una cuerda se puede generar una onda estacionaria, cuya longitud de onda es el doble del largo de la cuerda L . Si se duplica la frecuencia, se obtiene una onda estacionaria con una longitud de onda igual a la mitad de la anterior.

Esto se puede generalizar en forma matemática mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (7)$$

donde L es la longitud de la cuerda, n el número de nodos y λ la longitud de onda.

Además como $v = \lambda \cdot f$, despejando f , resulta que:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (8)$$

Luego, reemplazando convenientemente la ecuación (7) en (8) resulta que:

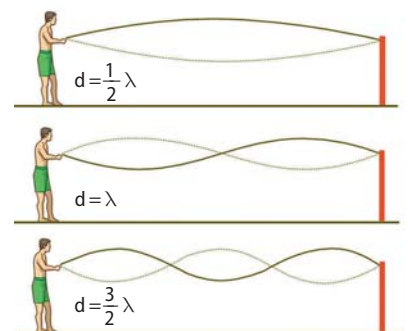
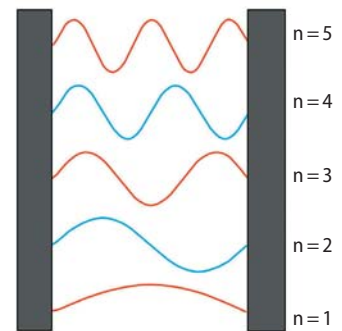
$$f = n \cdot \frac{v}{2L}$$

Esta última ecuación permite calcular las posibles frecuencias de las ondas en una cuerda de longitud L donde la velocidad de propagación es v debido al material de que esté hecha y tensión a la que esté sometida.

La frecuencia más baja, llamada **frecuencia fundamental**, corresponde a una longitud de onda $\lambda = \frac{v}{2L}$. Las restantes frecuencias de las demás ondas son múltiplos de la fundamental y se las llama **frecuencias armónicas**.

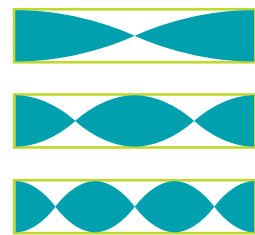
Por ejemplo, en las cuerdas de instrumentos musicales que se puntean, se golpean o se rozan con un arco, así como en los tubos de los instrumentos de viento, se forman ondas estacionarias que dan lugar a las notas musicales y al timbre característico de cada instrumento.

Si un tubo es abierto, el aire vibra con su máxima amplitud en los extremos. Como la distancia entre dos vientres es de media longitud de onda, si la longitud del tubo es L , las posibles ondas estacionarias podrán tener las longitudes de onda que cumplan la condición: $L = \frac{\lambda}{2}$, $L = \lambda$, $L = \frac{3}{2}\lambda$, ... en general $L = \frac{n}{2}\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$ es un número entero. Si el tubo es cerrado, se origina un vientre en el extremo por donde penetra el aire y un nodo en el extremo cerrado. Como la distancia entre un vientre y un nodo consecutivo es $\frac{\lambda}{4}$, la longitud L del tubo es en las figuras representadas es $L = \frac{\lambda}{4}$, $L = \frac{3}{4}\lambda$, $L = \frac{5}{4}\lambda$, ... En general $L = \frac{2n+1}{4}\lambda$; con $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

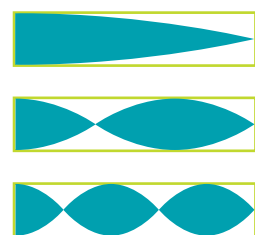


Ondas estacionarias en una cuerda sujeta a una pared por uno de sus extremos.

Ondas estacionarias en tubos abiertos

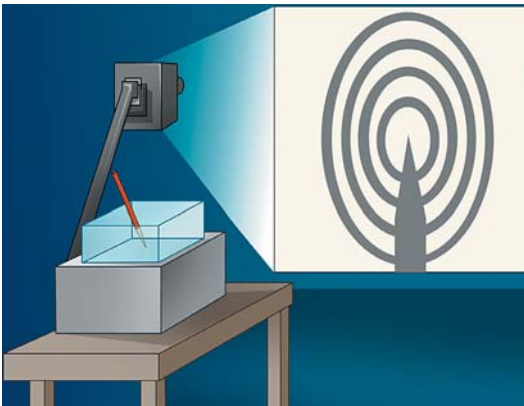


Ondas estacionarias en tubos cerrados



La cuba de ondas

Una cuba de ondas es un dispositivo para poner en práctica diseños experimentales con el objeto de estudiar el tipo de ondas que se generan en el agua, y su relación con los fenómenos ondulatorios ya sean mecánicos, eléctricos u ópticos. La cuba tiene un fondo de vidrio transparente que permite proyectar las imágenes de las ondas que se generan en el agua contenida en su interior. Una cuba de ondas se puede construir en forma sencilla con los siguientes elementos.



Materiales

Una fuente rectangular de vidrio transparente. Un proyector para diapositivas (o retro proyector). Un telón o pantalla para captar las imágenes. Lápiz o cuenta gotas. Tela fina o malla. Barras de acrílico, aluminio o vidrio. Reglas. Una manguera fina con un alambre en su interior para darle forma parabólica.

Objetivos

Con este dispositivo se puede comprobar la formación de ondas circulares, frentes de ondas planas, y fenómenos como la reflexión, la refracción y la difracción de ondas.

Procedimientos

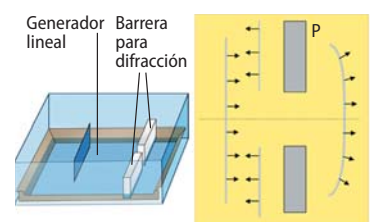
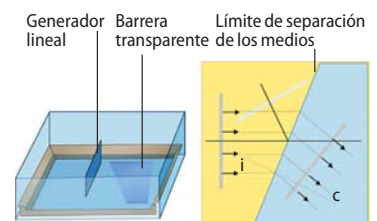
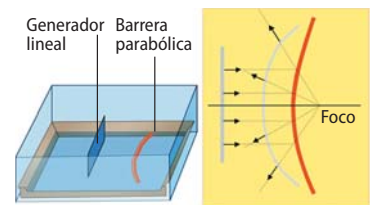
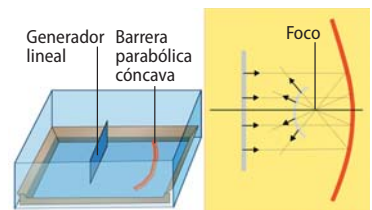
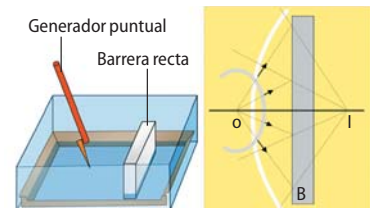
1. Coloquen la fuente sobre el proyector.
2. Agreguen agua hasta 1 cm de altura.

3. Enciendan el proyector.
4. Con el lápiz o el cuenta gotas, generen una perturbación sobre la superficie de agua. Luego generen más pulsos sucesivos.
5. Observen y registren las formas de las perturbaciones que se producen sobre la superficie del agua.
6. Realicen la misma perturbación, es decir, generen pulsos sucesivos, pero con una regla larga.
7. Observen si también se generan ondas con la misma forma.
8. Cubran las paredes de la fuente con alguna malla o tela fina.
9. Coloquen una barra de acrílico o vidrio en la fuente.
10. Generen con el lápiz un frente de onda circular.
11. Expliquen qué sucede cuando el frente de ondas llega a la barra.
12. Utilicen una regla como generador de la perturbación y un obstáculo parabólico como una manguera pequeña. Generen una perturbación con la regla frente a este obstáculo.
13. ¿Qué ocurre con los pulsos rectos cuando se utiliza la manguera como superficie reflectora? ¿Qué forma tienen los pulsos reflejados?
14. ¿En algún punto se genera un pulso que tenga la misma forma?
15. Inviertan la manguera y repitan este procedimiento. Expliquen qué ocurre en este caso.
16. Coloquen un trozo de vidrio o material acrílico transparente dentro de la cubeta, de forma tal que no se adhiera al fondo (pueden colocarle un sostén o apoyo de goma o plástico) y el agua apenas sobrepase la superficie del vidrio.
17. Generen con la regla un frente de ondas planas. Observen y expliquen qué fenómeno se produce.
18. Luego coloquen dos trozos de materiales similares a los que usaron para las barreras rectas, de forma tal que quede un espacio entre ellos. Generen un frente de onda plano. ¿Qué ocurre cuando

las ondas atraviesan la abertura de separación de estas barreras?

19. Preparen un informe en el que sinteticen los fenómenos y propiedades de las ondas que se analizaron con esta actividad.

20. ¿Qué modificaciones harían al diseño experimental para lograr una mayor precisión en esta comprobación?



Las ondas y las comunicaciones satelitales

En toda sociedad la comunicación es esencial para facilitar el intercambio de información entre los individuos. Muchos de los avances científicos y tecnológicos relacionados con los fenómenos ondulatorios contribuyen a mejorar el acceso de gran parte de la población a fuentes de información de todo el mundo.

Algunos de los inventos importantes que se pueden señalar a lo largo de un recorrido histórico en el ámbito de las comunicaciones, son por ejemplo, el telégrafo, la telegrafía sin cables, la radiodifusión (que tiene lugar desde 1920, con fines de entretenimiento e información), la televisión (que se emite en forma comercial desde la década de 1940).

En 1957, como se dijo al comienzo del presente capítulo, con el lanzamiento por los rusos del primer satélite *Sputnik* se inicia la era satelital, que permitiría tiempo después la creación de importantes compañías de comunicaciones internacionales. Sus propietarios venden la información o señales emitidas por tiempo de transmisión, en segundos, minutos, horas, semanas o incluso años.

Los satélites artificiales

Un satélite artificial es un cuerpo lanzado desde la superficie terrestre que se coloca en órbita alrededor de un cuerpo celeste, como un planeta o un satélite natural. No solo existen satélites para comunicaciones; también hay **satélites meteorológicos**, que aportan datos sobre condiciones climáticas; **satélites de navegación**, que informan sobre posiciones precisas espaciales o geográficas; **satélites de observación** de la Tierra para estudios científicos, **satélites militares**, y **satélites antimisiles** que protegen de iniciativas bélicas.

Satélites de comunicación

Un radioaficionado ubicado en una determinada localidad emite una señal que es recibida por el satélite. Éste la amplifica y la retransmite inmediatamente. Otro radioaficionado ubicado en otra localidad la recibe y le contesta. Así se inicia una comunicación por satélite. Estos mensajes pueden ser también llamadas telefónicas, imágenes de televisión y conexiones de Internet. Los satélites de comunicaciones permanecen siempre situados sobre un punto en la Tierra, por eso se llaman **geoestacionarios**. Se sitúan a 36 000 km del Ecuador de la Tierra y rotan con un período de 24 horas.

De esta forma, los satélites geoestacionarios parecen fijos para un observador situado en la Tierra y sus señales se pueden recibir mediante antenas receptoras fijas en la Tierra. Permiten conseguir una cobertura global del planeta, excepto las zonas polares.

Las señales llegan al satélite desde la estación en Tierra por el enlace ascendente y se reenvían desde el satélite por el enlace descendente. Para evitar interferencias, las frecuencias son distintas. Se han dispuesto, mundialmente, varias bandas de frecuencia para su uso comercial por satélites. Las más comunes constan de una banda central de aproximadamente 500 MHz (10^6 Hz) centrada en 6 GHz (10^9 Hz) en el enlace hacia arriba (hacia el satélite) y centrada en 4 GHz en el enlace hacia abajo (hacia la Tierra). La banda de 500 MHz, en cada una de las frecuencias, está normalmente dividida en 12 bandas, servidas por cada *transponder* o estación terráquea de recepción y transmisión, de 36 MHz de ancho de banda cada una, más 2 MHz de protección en ambos extremos. Cada banda de transponder está, a su vez, dividida en un cierto número de canales de frecuencia, según el tipo de aplicación o la señal que se transmite.



Un satélite artificial explorando el espacio.



El SAC es el primer satélite construido en la República Argentina que orbita la Tierra.

La televisión y la transmisión satelital

Las transmisiones de televisión se realizan con ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, VHF (*very high frequency*) y ultra altas frecuencias, UHF (*ultra high frequency*).

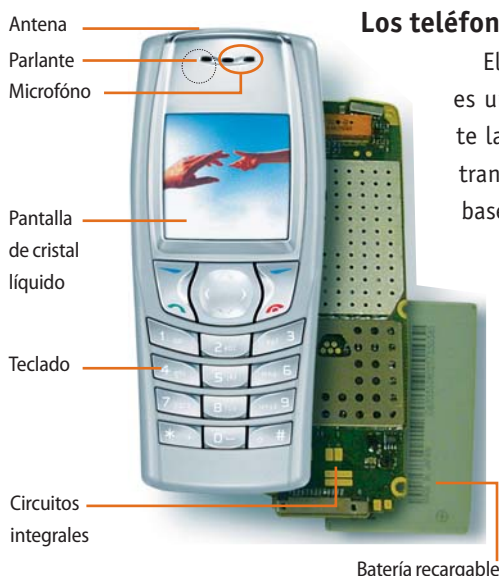
Esto es válido tanto para las transmisiones terrestres captadas por antenas, como para las que llegan por un cable en la modalidad "video-cable". Sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado también el sistema de televisión vía satélite para uso hogareño, que opera en las bandas de las microondas (entre 1000 MHz y 100 000 MHz / 300mm - 3mm).

El programa de televisión se transmite desde una estación terráquea hacia un satélite artificial de comunicaciones ubicado en órbita terrestre. Este satélite está equipado con receptores que captan la señal, equipos que la procesan, y transmisores que dirigen la señal hacia la Tierra donde es captada por las antenas domiciliarias.

Los teléfonos celulares

El principio de la telefonía móvil o celular es un sistema telefónico en el que mediante la combinación de una red de estaciones transmisoras-receptoras de radio (estaciones base) y una serie de centrales telefónicas, se posibilita la comunicación entre terminales telefónicas portátiles (teléfonos celulares).

Las estaciones base están dispuestas sobre una ciudad en forma de una red de células o celdas hexagonales. Se eligió la forma de hexágono porque proporciona una transmisión más efectiva, ya que al ser una figura aproximada a la circular, se aprovechan



más los espacios entre las celdas. Cada celda tiene una estación base situada en un nudo de estas celdas que consiste en una torre y un pequeño edificio que contiene el equipo de radio. Cada estación base tiene asignado un grupo de frecuencias de transmisión y recepción propias. Como el número de frecuencias es limitado, con esta disposición es posible reutilizar las mismas frecuencias en otras células, siempre que no sean adyacentes, para evitar interferencia entre ellas.

Las celdas se definen por su tamaño físico y, lo más importante, por la cantidad de la población que cubren. Los teléfonos celulares tienen una potencia baja que puede variar entre 0,6 watt a 3 watt. La estación central también transmite a bajas potencias, y esto tiene las siguientes ventajas:

- las transmisiones de la base central y de los teléfonos en la misma celda no salen de ésta. Por lo tanto, cada celda puede reutilizar las mismas frecuencias a través de la ciudad;
- el consumo de energía del teléfono celular, que generalmente funciona con baterías, es relativamente bajo. Esto posibilita el uso de baterías más pequeñas, lo que a su vez permite utilizar aparatos de menor tamaño.

La tecnología celular requiere un gran número de bases o estaciones en una ciudad de cualquier tamaño. Una ciudad grande puede llegar a tener cientos de torres, y cada ciudad necesita tener una oficina central que maneje todas las conexiones telefónicas a teléfonos convencionales, y controle todas las estaciones de la región.



El teléfono fue inventado por **Alexander Graham Bell** en 1876, y la comunicación inalámbrica tiene sus raíces en la invención de la radio por **Nikolai Tesla** en la década de 1880 (formalmente presentado en 1894 por un joven italiano llamado **Guglielmo Marconi**). Era de esperarse que un día ambas tecnologías fueran combinadas en un mismo aparato.

Las ondas del éter

ESTE TEXTO, ESCRITO POR CHRISTIAN HUYGENS, PONE DE MANIFIESTO LAS HIPÓTESIS DE ESTE CIENTÍFICO SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ, QUE DESAFÍAN OTRAS TEORÍAS VIGENTES HACIA FINES DE 1600.

“No hallo que nadie haya dado una explicación probable de los fenómenos primeros y más notables de la luz, a saber, por qué no se propaga sino en línea recta, y cómo es que los rayos visibles, que proceden de infinitos lugares distintos, se cruzan unos con otros, sin estorbarse mutuamente de ninguna manera (...). (...) Si tomamos cierto número de esferas de igual tamaño, fabricadas de una sustancia muy dura, y las disponemos en línea recta, de modo que mutuamente se toquen, vemos cómo, golpeando con una esfera parecida a la primera de las esferas dichas, el movimiento pasa en un momento hasta la última de ellas, la cual se aparta de la hilera sin que podamos percibir que las demás se han movido. Y hasta la misma que nos sirvió para dar el golpe se queda inmóvil junto con las demás. Por donde se ve cómo el movimiento pasa con extremada velocidad; la cual es tanto mayor cuanto mayor es la dureza de la sustancia de las esferas. Pero con todo y con eso sigue

siendo cierto que este avance del movimiento no es instantáneo, sino sucesivo y que, por lo tanto, requiere tiempo. Porque si el movimiento, o si queréis, la disposición para el movimiento, no pasase sucesivamente por todas esas esferas, todas ellas cobrarían movimiento a la vez, y, por ende, juntas avanzarían, lo cual no acontece así. Porque la última se aleja de toda la hilera y adquiere la velocidad de la empujada (...). (...) Ahora bien, al aplicar esta especie de movimiento al que produce la luz, nada nos impide pensar que las partículas de éter son de una sustancia tan cercana a la dureza y dotadas de una elasticidad tan pronto como queremos. No hace falta examinar aquí las causas de esa elasticidad ni de esa dureza, lo cual nos alejaría demasiado de nuestro asunto. Con todo diré, de paso, que podemos figurarnos que las partículas del éter, no obstante su pequeñez, se componen a su vez de otras partes y que su elasticidad consiste en el movimiento rapidísimo de una materia sutil que las penetra

por todos lados y obliga a su estructura a tomar una disposición tal, que dé a esa materia fluida la salida más abierta y expedita posible (...). He demostrado, pues, de qué manera puede concebirse que la luz se propague sucesivamente en ondas esféricas, y cómo es posible que esta propagación se haga a una velocidad tan grande como las que exigen los experimentos y las observaciones astronómicas. Y puede notarse además que, aun suponiendo que las partículas estén en movimiento continuo (que para ello hay muchas razones), no puede estorbarse la propagación sucesiva de las ondas, porque la propagación no consiste de ninguna manera en el traslado de tales partículas, sino simplemente en una leve agitación que no pueden menos de comunicar a las que las rodean, pese a cualquier movimiento que actúe sobre ellas, haciéndolas cambiar su posición respectiva.”

(Fuente: *Antología de Física*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1971.)

Luego de la lectura respondan.

- a. ¿Con qué ideas o hipótesis sobre la naturaleza de la luz no estaba de acuerdo Huygens? ¿Qué intentó demostrar?
- b. ¿Utilizó alguna analogía o modelo explicativo?
- c. ¿Cuáles son las conclusiones a las que llega?



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- La descripción de muchos fenómenos físicos es posible gracias al **modelo de ondas**.
- Una **perturbación** se puede propagar en el espacio a través de ondas.
- El movimiento ondulatorio está asociado a la producción de oscilaciones de una fuente emisora y al medio de propagación.
- Hay ondas que necesitan de un medio para propagarse, como las **ondas mecánicas** (por ejemplo: el sonido) y otras no, como las **ondas electromagnéticas** (por ejemplo: la luz).
- Las ondas pueden clasificarse en **ondas longitudinales** y **ondas transversales**.
- Para caracterizar distintas ondas es necesario conocer su amplitud, longitud de onda, frecuencia y velocidad de propagación.
- La velocidad de propagación en el vacío de las ondas electromagnéticas es 300 000 km/s, mientras que el sonido se propaga en aire a 20 °C a una velocidad de 340 m/s.
- Todo movimiento que se repite cada cierto período regular de tiempo se denomina **periódico**.
- Muchos fenómenos ondulatorios se pueden explicar teniendo en cuenta que las ondas resultantes pueden surgir de la superposición de ondas simples o periódicas.
- Los movimientos oscilatorios simples se llaman **armónicos simples** porque pueden ser estudiados mediante funciones armónicas o simples, como las funciones seno o coseno.
- Cuando dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia avanzan en sentido opuesto a través de un medio, se producen ondas estacionarias.
- Las ondas presentan propiedades tales como la reflexión, refracción, difracción e interferencia.

Fórmulas

$$y = A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} t$$

Ecuación horaria del MOA

$$\Delta D = n \cdot \lambda$$

Interferencia constructiva
donde n es un número entero.

$$V = \lambda \cdot f$$

Velocidad de una onda

$$\Delta D = \frac{p}{2} \lambda$$

Interferencia destructiva
donde p es un número impar.

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

Ecuación de ondas

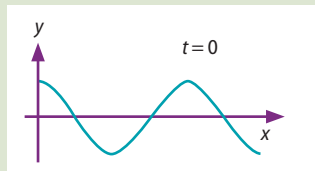
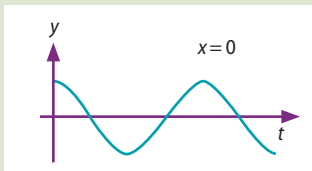
ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. El modelo ondulatorio permite explicar cómo se mueven las partículas del medio perturbado y cómo se propaga la perturbación. Propongan ejemplos que se describan a partir del modelo ondulatorio.

2. Cuando una persona habla por teléfono con otra, ¿cómo se transmite esta información? ¿Qué tipos de ondas intervienen en esta situación? Justifiquen sus respuestas.

3. Mencionen tres ejemplos de movimientos periódicos.

4. Describan las situaciones de los fenómenos ondulatorios que se representan en los siguientes gráficos.



5. Cuando aumenta la frecuencia de una onda sonora, ¿aumenta o disminuye su longitud de onda? ¿Por qué?

6. ¿Cuántas vibraciones por segundo representa una onda de radio de 105.4 MHz?

7. Las frecuencias de ondas que transmiten dos estaciones de radio AM son de 630 kHz y 790 kHz, ¿cuál de las dos señales tiene mayor longitud de onda? Justifiquen sus respuestas.

8. ¿Las ondas de radio son ondas sonoras? ¿Por qué?

9. ¿Cuáles son las ondas de radio que se difractan con más facilidad en torno a los edificios? ¿Las AM o las FM? ¿Por qué?

10. ¿Por qué el fenómeno de difracción en torno a los edificios no se produce con las ondas luminosas? Justifiquen sus respuestas.

11. ¿Es posible que una onda sonora se superponga con otra onda sonora y el resultado de este fenómeno sea el silencio? ¿Por qué?

12. ¿A qué se deben los puntos "claros" y "oscuros" cuando se produce una interferencia de ondas?

13. A través de una puerta abierta se oye hablar a una persona que no se visualiza. Expliquen este hecho en términos físicos.

14. Investiguen algunas aplicaciones cotidianas de las radiaciones electromagnéticas, como por ejemplo: rayos gamma, rayos X, ultravioletas, infrarrojos, microondas, ondas de radio.

15. Una emisora de FM transmite con una frecuencia de 93.4 MHz.

a. ¿Cuál es la velocidad con que se propaga esta señal?

b. ¿Cuál es su longitud de onda?

c. ¿Cuál es el período de las oscilaciones que produce esta onda?

16. Una onda tiene un período de 0,2 segundo y una longitud de onda de 40 cm. ¿Cuál es su velocidad de propagación?

17. Calculen las frecuencias de luz monocromática roja y verde que tienen longitudes de onda de 700 nanómetros (nm) y 500 nanómetros respectivamente.

18. En una cuerda que tiene una longitud de 2 m se produce una onda estacionaria entre extremos fijos. Se cuentan 3 nodos en el interior.

a. ¿Cuál es la longitud de onda de la vibración?

b. Si el pulso viaja en la cuerda a 4 m/s, ¿cuál es la frecuencia de la oscilación?

19. Una onda armónica se propaga en una soga en el sentido positivo del eje x . Sabiendo que su amplitud es 10 cm, su frecuencia 40 Hz y su velocidad 10 m/s, escriban la ecuación de esta onda.

20. Una onda transversal se propaga por una cuerda según la siguiente ecuación: $y = 0,4 \text{ m} \cos [\pi (100 \text{ s}^{-1} t - 2,5 \text{ m}^{-1} x)]$. Calculen:

a. la longitud de la onda;

b. la frecuencia;

c. la velocidad de propagación.

21. La ecuación de una onda transversal que se propaga a lo largo de una cuerda viene dada por la expresión:

$y = 25 \text{ cm} \cos [\pi (0,80 \text{ s}^{-1} t - 1,25 \text{ cm}^{-1} x)]$, donde x e y se expresan en cm y t en segundos. Determinen la amplitud y el período de oscilación que puede tener un punto cualquiera de la cuerda.

22. Dibujen dos ondas transversales:

a. de la misma amplitud, pero una de doble longitud de onda que la otra;

b. de la misma longitud de onda, pero con las amplitudes en relación $A_1 = 2A_2$.

23. Las ondas circulares en la superficie del agua ¿son longitudinales, transversales, o de ninguno de estos dos tipos o clasificaciones? Expliquen su respuesta.

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

24. Busquen información en diarios, revistas o Internet sobre el fenómeno del tsunami ocurrido el 26 de diciembre del 2004 en el sudeste de Asia. Sinteticen las ideas principales y señalen los conceptos relacionados con el tema de ondas presentado en este capítulo.

25. Presenten los trabajos realizados sobre el punto anterior en grupos de compañeros y discutan este fenómeno natural.

26. Una persona enciende un televisor por medio del control remoto.

- ¿Cómo llega al televisor la orden de encendido?
- ¿Qué tipo de ondas recibe la persona en el momento en que se enciende el televisor?
- De las ondas emitidas por el televisor, ¿cuál llega primero a la persona?

27. En un resorte se transmite una onda longitudinal con una velocidad de 1 m/s.

- ¿Qué se desplaza a esa velocidad?
- ¿Qué diferencias habría en la respuesta de la pregunta anterior si la onda fuese transversal?

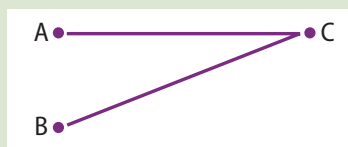
28. Las radios AM transmiten en frecuencias que van aproximadamente de los 530 a los 1600 KHz ($1 \text{ KHz} = 10^3 \text{ Hz}$). En cambio las emisoras de FM emiten entre los 88 y los 108 Mhz ($1 \text{ Mhz} = 10^6 \text{ Hz}$). ¿Cuál de ambos sistemas de emisión lo hace con mayores longitudes de onda?

29. Si solo se conoce el gráfico de $y = f(t)$ de una onda para uno de sus puntos, ¿cuáles de los valores que se requieren para escribir su ecuación se pueden obtener?

30. Si solo se conoce el gráfico de $y = f(x)$ de una onda en un determinado instante, ¿cuáles de los valores que se requieren para escribir su ecuación se pueden obtener?

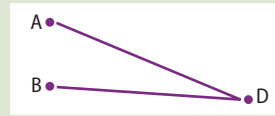
31. ¿Por qué para observar un fenómeno de interferencia se requiere que las ondas sean coherentes?

32. Desde los puntos A y B de una cuba de ondas se emiten ondas de 4 cm de longitud de onda.



- Determinen si en el punto C ubicado a 56 cm de A y a 60 cm de B se produce interferencia constructiva o destructiva.
- Ubiquen otros dos puntos en los que se produzca la misma interferencia.

33. Desde los puntos A y B de una cuba de ondas se emiten ondas de 4 cm de longitud de onda.



- Determinen si en el punto D ubicado a 80 cm de A y a 78 cm de B se produce interferencia constructiva o destructiva.
- Ubiquen otros dos puntos en los que se produzca la misma interferencia.

34. Un haz de luz de $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ de frecuencia pasa del aire, donde su velocidad es prácticamente igual que en el vacío, a un vidrio donde la velocidad de propagación es $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Calculen las longitudes de onda en cada uno de los medios.

35. Un haz de luz que se propaga en el vacío tiene una longitud de onda de $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

- Determinen su frecuencia y su período.
- ¿Qué oscila con esa frecuencia?

36. ¿Cuáles de los siguientes movimientos son periódicos?

- Una calesita.
- Un ascensor.
- La hélice de una licuadora.
- Un auto de Fórmula 1 en carrera.

37. La ecuación de un MOA es $y = 0,25 \text{ m} \cdot \sin \frac{\pi}{65} t$. Determinen:

- su período;
- su elongación cuando han transcurrido 12 segundo.

38. Una onda de 120 Hz de frecuencia y 8 cm de amplitud se propaga en un medio con una velocidad de 60 m/s.

- Escriban una ecuación que describa esta onda, calculando previamente los valores necesarios.
- Calculen la perturbación de un punto ubicado a 20 metros del origen de coordenadas cuando han transcurrido 0,325 segundo.

39. Calculen la amplitud de una onda de 30 cm de longitud de onda y 6 segundos de período, si la elongación de un punto de coordenada $x = 10 \text{ cm}$ al segundo de haber comenzado a contarse el tiempo es de 50 cm.

40. La velocidad de propagación de una onda en una cuerda de 10 m. de longitud es de 30 m/s. Calculen las posibles longitudes de onda y las frecuencias de las ondas estacionarias que se pueden producir en ella.

41. El tubo de un órgano está abierto en un extremo y cerrado en el otro. ¿Cuáles son las longitudes de onda de la onda estacionaria fundamental y de las primeras dos armónicas si su largo es de 2 m?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- | | | |
|----|--|-----------------------|
| 1 | Una perturbación se propaga a través de ondas que transportan materia y energía. | <input type="radio"/> |
| 2 | La velocidad de propagación de una onda en una soga no depende del tipo de material de la soga. | <input type="radio"/> |
| 3 | Las ondas mecánicas pueden ser longitudinales o transversales. | <input type="radio"/> |
| 4 | Las ondas electromagnéticas se propagan solo en medios materiales. | <input type="radio"/> |
| 5 | El sonido es una onda longitudinal que se propaga en un medio material. | <input type="radio"/> |
| 6 | Los movimientos oscilatorios armónicos pueden describirse por funciones simples, como las funciones trigonométricas seno y coseno. | <input type="radio"/> |
| 7 | Si dos ondas se encuentran en un punto en el cual coinciden sus máximas amplitudes, la amplitud de la onda resultante es la diferencia de las amplitudes de cada onda. | <input type="radio"/> |
| 8 | Las ondas estacionarias se producen por el fenómeno de superposición de ondas. | <input type="radio"/> |
| 9 | Solo las ondas luminosas pueden refractarse al atravesar una superficie de separación entre dos medios de propagación. | <input type="radio"/> |
| 10 | El fenómeno de difracción es más pronunciado cuando la onda llega a una abertura de grandes dimensiones comparada con la longitud de onda incidente. | <input type="radio"/> |
| 11 | Dos ondas que se propagan en un mismo medio, pero en sentido contrario, producen una interferencia destructiva. | <input type="radio"/> |
| 12 | Cada vez que una onda atraviesa la superficie de separación entre dos medios, se producen los fenómenos de refracción y reflexión. | <input type="radio"/> |
| 13 | Si una onda se refracta, su velocidad de propagación no varía. | <input type="radio"/> |
| 14 | La luz es una onda electromagnética que se propaga en el vacío a 300 000 km/s. | <input type="radio"/> |
| 15 | La teoría corpuscular de Newton quedó descartada definitivamente frente a la teoría de Huygens. | <input type="radio"/> |
| 16 | La luz se comporta como corpúsculo o como onda. | <input type="radio"/> |
| 17 | En las comunicaciones satelitales de radiodifusión se utilizan ondas sonoras. | <input type="radio"/> |
| 18 | Las emisiones de televisión utilizan ondas de radio de VHF y UHF. | <input type="radio"/> |
| 19 | La telefonía celular aprovecha muchas señales o frecuencias de comunicación al mismo tiempo. | <input type="radio"/> |
| 20 | Las ondas que intervienen en una comunicación satelital son, por ejemplo, las ondas de radio cortas, como las microondas. | <input type="radio"/> |