

El Universo está lleno de ondas de diferente tipo. En particular en nuestro planeta las comunicaciones se logran mediante la emisión y recepción de ondas. Desde la más sencilla de las interacciones humanas hasta la más compleja se vincula a las mismas. Por ejemplo, vemos porque nuestros ojos reciben luz (onda electromagnética), y cuando hablamos con alguien se emite y percibe sonido (onda mecánica) a través de los oídos.

Estas no son las únicas ondas existentes, -quizás recuerdes que el pasado año trabajaste con ondas producidas en cuerdas fundamentalmente- aunque si las dos más importantes del curso de Arte y Expresión. En esta sección nos dedicaremos a definir, clasificar y analizar ondas, a modo de hacer una revisión de los contenidos abordados en el curso de física del pasado año que serán indispensables para el adecuado desarrollo de este.

## ¿Qué son las ondas?

Las ondas son el resultado de una perturbación que se propaga por el espacio. **Una onda es toda forma de transferir energía de un lugar a otro del espacio sin desplazar materia.**

Por ejemplo, si observamos la superficie de un charco en el momento que cae una gota, ella produce una perturbación, que genera una onda circular en torno al punto donde ha caído. Si además sobre la superficie se encuentra flotando una hoja podrás observar que la hoja no se traslada al ser alcanzada por la perturbación, simplemente adquiere un movimiento oscilatorio (sube y baja) respecto a su posición inicial.



## Clasificación de Ondas

Antes de comenzar con este apartado, recordemos que una forma de organizar el conocimiento es estableciendo clasificaciones en función de algún criterio bien definido. Así es que las ondas pueden clasificarse según diversos criterios, como veremos a continuación.

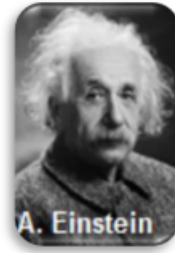
### 1. En función del medio en el que se propagan

**1.a Mecánicas:** Son aquellas ondas que necesitan de un medio material para propagarse. Por ejemplo, el sonido, ondas generadas en cuerdas, ondas en el agua, etc.

**1.b Electromagnéticas:** Son aquellas ondas que no necesitan de un medio material para propagarse y por lo tanto se pueden hacerlo en el vacío generándose por la vibración de cargas eléctricas. Ellas son la luz, los rayos cósmicos, los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, la radiación infrarroja, las microondas, y las ondas de radio.

Estas últimas han sido descubiertas y descritas en el siglo pasado, muy posteriormente a las mecánicas, ya que al principio no se concebía la posibilidad de que las ondas pudieran propagarse en el vacío. De hecho, para justificar que se trataba de ondas, los científicos trataron de probar que éstas eran mecánicas y se propagaban por un medio denominado éter, por lo que realizaron diversos experimentos sin poder demostrar la existencia de ese medio.

**1.c Gravitacionales:** Estas ondas han sido descubiertas en febrero del año 2016 y predichas exactamente cien años antes de ello en la Teoría de la Relatividad por Albert Einstein (alemán, 1879 – 1955). Estas ondas son vibraciones en el espacio-tiempo, que se producen por el movimiento de masas. Como las interacciones gravitatorias son mucho más débiles que las interacciones electromagnéticas, podemos afirmar que la intensidad de las ondas gravitacionales es muy pequeña en comparación a las electromagnéticas. Las ondas de mayor intensidad se generan a años luz de distancia de la tierra y son producidas, por ejemplo, por dos agujeros negros cercanos entre sí en el momento de la fusión.



## 2. En función de las direcciones en que se propagan

**2.a Unidimensionales:** Son las ondas que se propagan en una única dirección, son por ejemplo las ondas en las cuerdas.

**2.b Bidimensionales:** Son las ondas que se propagan en el plano (en dos direcciones). Por ejemplo, en el agua las ondas se propagan en toda la superficie.

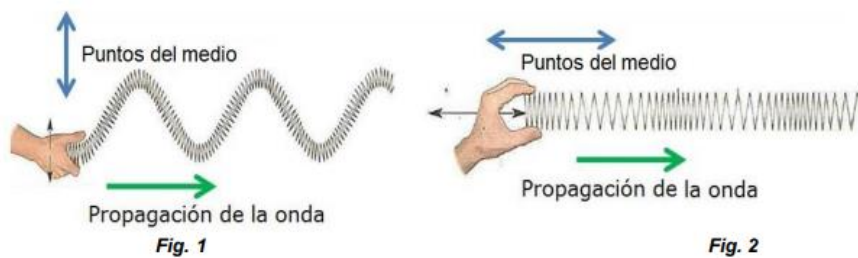
**2.c Tridimensionales:** Son las ondas que se propagan en el espacio, en todas direcciones, por ejemplo, la luz.

## 3. En función del movimiento de sus partículas

Esta clasificación se realiza en función de la dirección del movimiento de los puntos del medio con respecto a la dirección de la velocidad de propagación.

**3.a Transversales:** En estas los puntos del medio oscilan en forma perpendicular a las direcciones de propagación de la onda.

En la figura 1 los puntos del medio oscilan verticalmente y la onda se propaga horizontalmente de izquierda a derecha.



**3.b Longitudinales:** En estas los puntos del medio oscilan en la misma dirección que se propagan las ondas, como indica la figura 2.

## 4. En función de su periodicidad

**4.a Periódicas:** Son el conjunto de pulsos emitidos a intervalos iguales de tiempo.

**4.b No periódicas:** Son el conjunto de pulsos que no se emiten a intervalos iguales de tiempo.

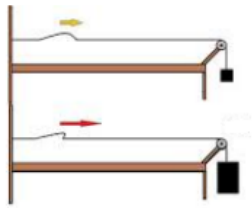
## VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE UN PULSO

Como se mencionó anteriormente, al generar una perturbación, esta se propaga por el espacio o por un medio material. A esta perturbación la llamaremos *pulso* de onda, y el viajará a cierta velocidad.

Pero bien, ¿de qué depende la velocidad de propagación de un pulso? **La velocidad de propagación de un pulso de onda depende únicamente de las características del medio en el cual se propaga.**

A partir del desarrollo del conocimiento científico, se han determinado algunos casos particulares, que serán expuestos a continuación.

### 1. Ondas en una cuerda



La velocidad de propagación de los pulsos en una cuerda depende de la densidad lineal de masa  $\mu$  (cantidad de masa  $m$  por unidad de longitud  $l$ ) de la cuerda y de la fuerza tensión<sup>1</sup> a la que se somete la misma.

En la imagen se observa que al cambiar la pesa que ejerce tensión sobre la cuerda cambia la velocidad de propagación; al aumentar la tensión, aumenta la velocidad de propagación.

La velocidad de propagación de un pulso en una cuerda se determina como:

$$v_p = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad \text{donde} \quad \mu = \frac{m}{l}$$

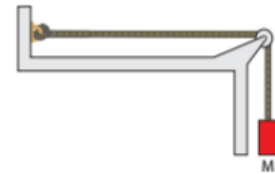
Recuerda que la unidad de la masa en el Sistema Internacional es el kilogramo (kg) y la de la longitud el metro (m), por lo cual la unidad de la densidad lineal de masa es kg/m. Esto puedes comprobarlo realizando un análisis dimensional de las unidades.



#### Para practicar

Una cuerda de masa 607g y longitud de 5,50m es tensada por una pesa, como indica la figura. El módulo de la fuerza tensión a la que está sometida la cuerda es de 22,3N.

- Determina la densidad lineal de masa para la cuerda en cuestión.
- ¿Cuál es la velocidad con la que un pulso se propaga por la cuerda?
- Se cambia la pesa que tensa la cuerda, haciendo que el módulo de la fuerza tensión se cuadruple. ¿Qué sucede con la velocidad de propagación de un pulso respecto a lo definido en la parte anterior? Explique.



## 2. Sonido

La velocidad de propagación del sonido depende de la elasticidad y de la densidad volumétrica<sup>2</sup> del medio por el cual se propaga.

Según el estado de agregación del medio en el que se propague el sonido, varía el cómo se determina.



**2.a En un medio sólido:** La velocidad de propagación del sonido en un medio sólido está determinada por el módulo de Young  $Y$  (que se pronuncia "lang") del sólido en cuestión y su densidad volumétrica  $\rho$ . La velocidad de propagación del sonido se determina entonces según la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$



### Para practicar

Sabiendo que el módulo de Young del aluminio es  $70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , y su densidad volumétrica  $2,70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , determina la velocidad de una onda sonora que se propaga por una olla de aluminio al golpearla.

**2.b En un medio líquido:** En un medio líquido la velocidad del sonido es determinada por el módulo de compresibilidad  $B$  del líquido en cuestión y su densidad volumétrica  $\rho$ . La velocidad de propagación del sonido en un líquido entonces se determina del siguiente modo:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$



### Para practicar

Supongamos que dos niñas que se están bañando en una piscina entablan una conversación



debajo del agua.

Sabiendo que el módulo de compresibilidad  $2,2 \times 10^9 \text{ Pa}$  y que su densidad es  $0,998 \times 10^3$  cuál sería la velocidad a la que se propaga el sonido en esa situación.

del agua es  $\text{kg/m}^3$ , determina el sonido en esa

**2.c En un medio gaseoso:** En los gases, la velocidad del sonido depende de la razón de las capacidades caloríficas molares de los gases  $\gamma$ , la presión no perturbada  $P$ , y la densidad volumétrica  $\rho$  del líquido en cuestión. La velocidad de propagación del sonido se determina entonces según la siguiente ecuación.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

Para el caso de los gases monoatómicos como el helio y el argón la razón de las capacidades caloríficas molares es  $\gamma = 5/3$ , y para los gases diatómicos como el oxígeno, el nitrógeno y el aire el valor cambia a  $\gamma = 7/5$ . Para los gases poliatómicos no hay un valor constante, sino que depende del propio gas.

**En el aire:** En particular la velocidad del sonido en el aire se puede calcular como  $v = 331 + 0,6 \cdot T$

¿De dónde surge la ecuación? A  $0^\circ\text{C}$  el sonido se propaga a  $331\text{m/s}$ , pero al aumentar la temperatura  $T$  aumenta la energía cinética de las moléculas que los componen aumentando su velocidad, y por lo tanto aumenta la frecuencia de los choques entre ellas, lo que causa un aumento en la velocidad de propagación del sonido. Para temperaturas "normales" dicho aumento equivale a  $0,6\text{m/s}$  por cada grado Celsius que se incremente la temperatura.

### 3. Luz y Ondas Electromagnéticas en general

La velocidad de la luz en el vacío es por definición una constante universal cuyo valor es  $299.792.458\text{ m/s}$  (que suele aproximarse a  $3,00 \times 10^8\text{ m/s}$  para trabajar con una cantidad de cifras significativas razonable). Se simboliza con la letra  $c$ , proveniente del latín *celéritās* (en español celeridad o rapidez).

El valor de la velocidad de la luz en el vacío fue incluido oficialmente en el Sistema Internacional de Unidades como constante el 21 de octubre de 1983.

La rapidez a través de un medio que no sea el vacío depende de su permitividad eléctrica  $\epsilon_0$ , de su permeabilidad magnética. En medios materiales, esta velocidad es inferior a " $c$ " y queda codificada en el índice de refracción (tema que has estudiado el año pasado).

Así, la velocidad de la luz y las ondas electromagnéticas en un medio queda determinada mediante la ecuación:

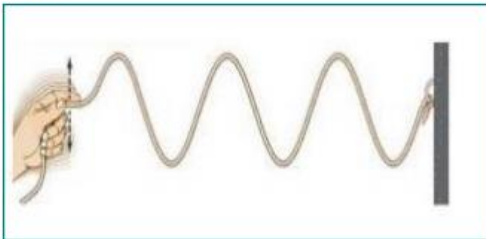
$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu \cdot \epsilon}}$$

Donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética y  $\epsilon$  la permitividad eléctrica (tranquil@, no te pediremos que la halles, en el aire y en el vacío podríamos decir que son casi iguales).

Las vibraciones u oscilaciones de los sistemas es un campo de estudio importante dentro de la física. Todo sistema posee una capacidad de vibración y la mayoría de los sistemas pueden vibrar libremente de diversas maneras.

*“Después de todo, nuestros corazones laten, nuestros pulmones oscilan, tiritamos cuando tenemos frío, a veces roncamos, podemos oír y hablar gracias a que vibran nuestros tímpanos y laringes. Las ondas luminosas que nos permiten ver son ocasionadas por vibraciones... Incluso los átomos que componen nuestro cuerpo vibran.” (French, 2001: p.3)*

La característica común de todos estos fenómenos es la periodicidad<sup>3</sup>. Como bien anunciábamos en la clasificación de ondas, las ondas periódicas son el conjunto de pulsos emitidos a intervalos iguales de tiempo.



Analicemos el caso de una onda periódica y unidimensional transversal en una cuerda, que por lo cual también es mecánica. Si hacemos que el agente oscilador realice un Movimiento Armónico Simple (cuya abreviatura es MAS), la forma de la cuerda en cualquier instante es un patrón repetitivo. En este caso decimos que la onda que viaja a través de la cuerda es armónica<sup>4</sup>, donde cada punto de la cuerda vibrará con la misma frecuencia.

### Características de las ondas armónicas

**Frecuencia (f):** Se llama frecuencia al número de oscilaciones completas o ciclos que cada punto del medio realiza por unidad de tiempo. Su unidad en el SI es el Hz (Hertz), en honor al físico alemán Heinrich Hertz (1857 – 1894). La frecuencia puede determinarse entonces como:

$$f = \frac{n^{\circ} \text{oscilaciones}}{\Delta t}$$

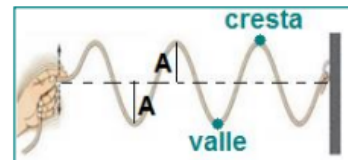


**Período (T):** Denominamos período al tiempo que cada punto del medio tarda en realizar una oscilación completa. Su unidad en el SI es el s (segundo).

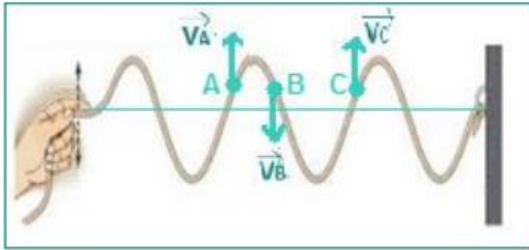
La frecuencia y el período son magnitudes inversamente proporcionales, es decir que:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{y} \quad f = \frac{1}{T}$$

**Amplitud (A):** Es la máxima separación de un movimiento oscilatorio (medio elástico o campo) con respecto a su posición de equilibrio y su unidad en el SI es el m (metro). Se denominará cresta al punto del medio con amplitud hacia arriba y valle hacia abajo.



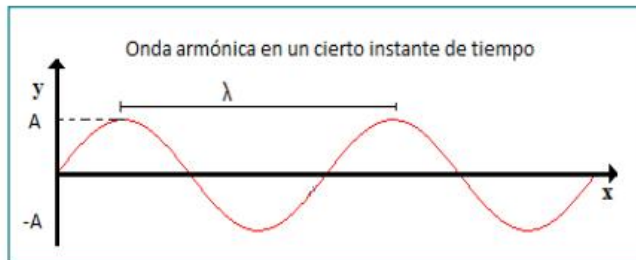
**Longitud de onda (λ):** Es la distancia entre dos puntos consecutivos del medio que se mueven en fase y su unidad en el SI es el m (metro).



En la imagen adjunta, el punto A y B están en la misma posición respecto a la posición de equilibrio, pero sus velocidades (representadas vectorialmente) son diferentes, por lo cual no están en fase. De modo contrario, los puntos A y C están en la misma posición respecto a la posición de equilibrio y sus velocidades son iguales en módulo, dirección y sentido, por lo que está en fase. La distancia que hay entre A y C es entonces la longitud de onda.

### Representación gráfica de las ondas armónicas

La representación gráfica de una onda armónica para un instante de tiempo tiene la forma que se observa en la figura. En el caso de ondas en una cuerda puede obtenerse esa forma si se toma una fotografía como observamos en las figuras anteriores.



Durante un período, la onda se desplaza una distancia igual a una longitud de onda  $\lambda$ , por

lo tanto, la velocidad con la que se propaga la onda está dada por  $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$ , siendo  $f$  la frecuencia de vibración de la onda y  $T$  el período.

Se puede describir a la onda mediante una ecuación que depende tanto de  $x$  como de  $y$ , ya que la onda avanza a medida que pasa el tiempo. La función de una onda armónica está dada por la siguiente relación:

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

Si la onda viaja en sentido positivo del eje  $x$ , el signo será negativo (es decir, la ecuación a utilizar es  $y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$ ), de lo contrario si la onda viaja en sentido negativo del eje  $x$ , el signo será positivo (resultando  $y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx + \omega t)$ ).

En la ecuación anterior las variables son:

$y$ : es la elongación, o sea la posición de cada partícula o campo vibrante respecto a su punto de equilibrio

$x$ : la posición del punto de la onda

$t$ : tiempo

$A$ : es la amplitud

$k$ : es el número de onda que viene dado por  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , y se mide en  $m^{-1}$ .

$\omega$ : es la frecuencia angular  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$