Apuntes de física de segundo de bachillerato

Tema : Ondas

1. Ondas. Tipos de ondas.

La mayor parte de los fenómenos que frecuentemente se producen en la vida ordinaria son de naturaleza ondulatoria. Es el caso, por ejemplo, del sonido que oímos cuando encendemos un aparato de radio, la luz natural o artificial, las olas del mar, el rizado del agua en un estanque al dejar caer en él una piedra.

Si se produce una perturbación en un sistema en equilibrio y ésta se propaga por el espacio sin que haya una transmisión de materia, decimos que esta información se ha propagado en forma de onda (consideremos el caso de tirar una piedra en un estanque tranquilo).

Una **onda** es, por tanto, una perturbación que producida en un punto llamado **foco**, se propaga por el espacio.

El **movimiento ondulatorio** consiste en la propagación de una perturbación en el espacio (onda) en la que se produce una transmisión de energía, pero no hay transporte de materia.

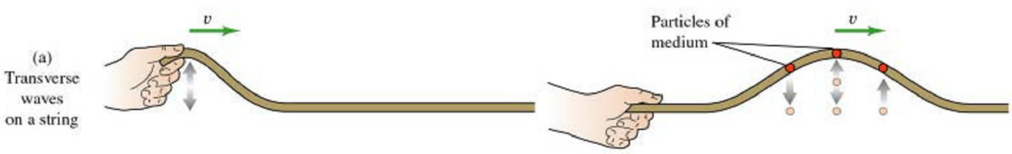
Las ondas existentes en la naturaleza pueden clasificarse según los siguientes criterios:

- Tipos de ondas
  - Según el medio en que se propagan
    - Mecánicas
    - Electromagnéticas
  - Según la dirección de vibración
    - Transversales
    - Longitudinales
  - Según el número de direcciones del espacio en que se propagan
    - Unidimensionales
    - Bidimensionales
    - Tridimensionales

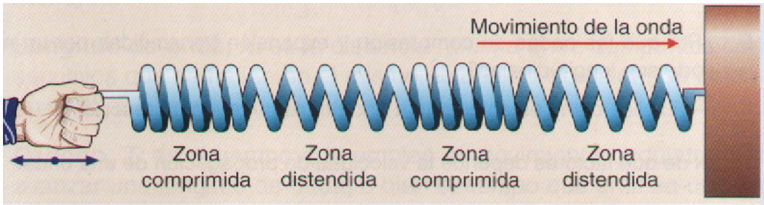
Ondas mecánicas: necesitan de un medio material para propagarse (sonido, ondas a través de un muelle, las vibraciones de una cuerda, las olas del mar, etc.)

Ondas electromagnéticas: no necesitan de ningún medio para propagarse y pueden, por tanto, propagarse en el vacío (la luz, las ondas de radio, televisión, microondas, rayos ultravioleta, rayos gamma, etc.).

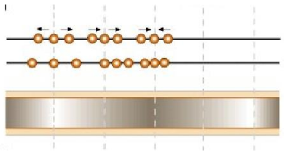
Ondas transversales: la vibración se produce en dirección perpendicular a la dirección de propagación (cuerda sacudida transversalmente y ondas electromagnéticas).



Ondas longitudinales: la vibración se produce en la misma dirección de propagación (ondas sonoras).

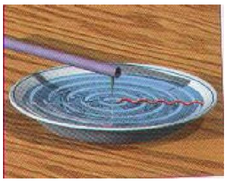


Unidimensionales:



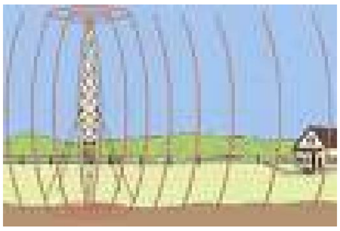
Ondas en un tubo sonoro

Bidimensionales:



Ondas en la superficie de un líquido.

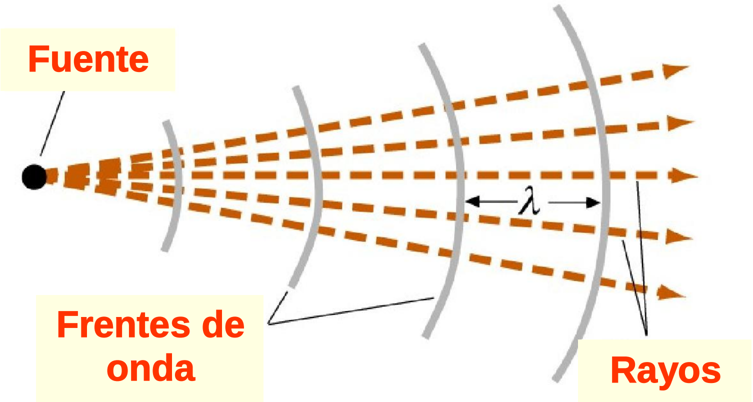
Tridimensionales:

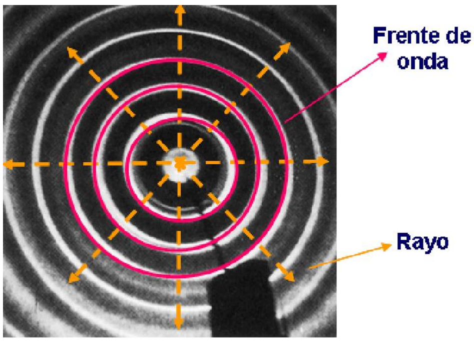


Ondas sonoras, luminosas.

Se denomina **frente de onda** al lugar geométrico de aquellos puntos que poseen el mismo estado de vibración, es decir, aquellos puntos que son alcanzados por la vibración en el mismo instante.

El frente de ondas de una onda bidimensional es circular, mientras que **el de una onda tridimensional es esférico**. A medida que se produce un alejamiento del foco que produce la perturbación, el frente de ondas va siendo cada vez menos curvo.



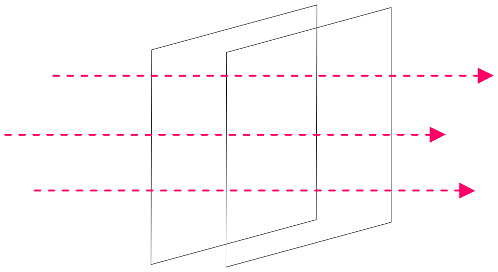


La dirección de propagación es perpendicular al frente de ondas.

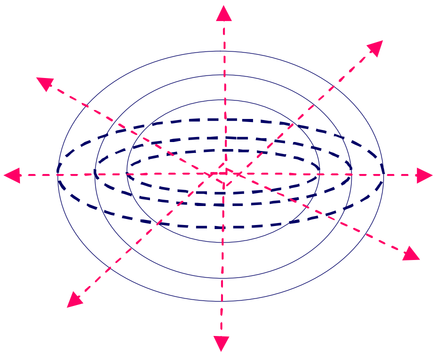
Ondas en la superficie de un líquido

Atendiendo a la forma del frente de ondas, éstas pueden ser de dos tipos:

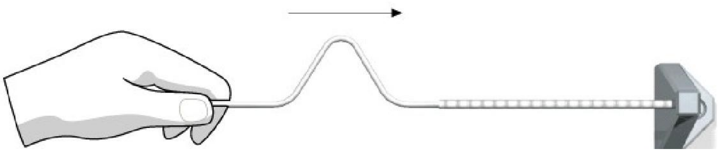
Ondas planas: se propagan en una sola dirección, por lo que los frentes de onda son paralelos.



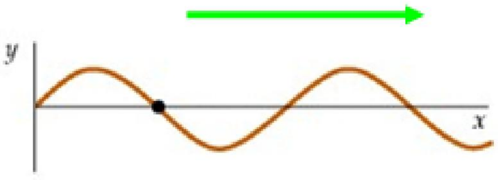
Ondas esféricas: el foco es puntual y la perturbación se propaga a la misma velocidad en todas las direcciones, por lo que llega simultáneamente a puntos equidistantes del foco.



Si la perturbación es instantánea se genera una única onda denominada **pulso**.



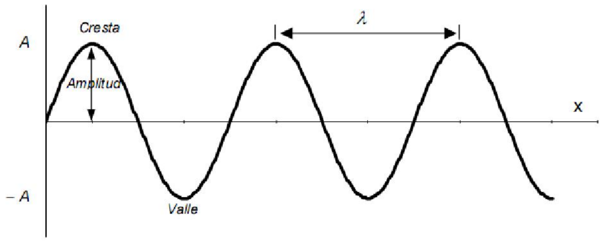
Si la perturbación es continua se genera un **tren de ondas**, que suele denominarse **ondas viajeras**.



Todas las ondas que estudiaremos serán, en realidad, trenes de ondas periódicos, aunque por comodidad se les suele denominar simplemente, ondas.

Magnitudes características de las ondas:

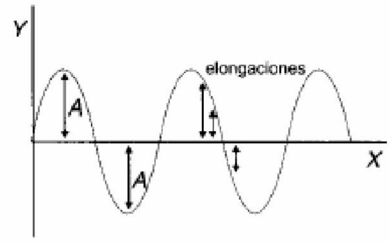
- **Longitud de onda (λ)**



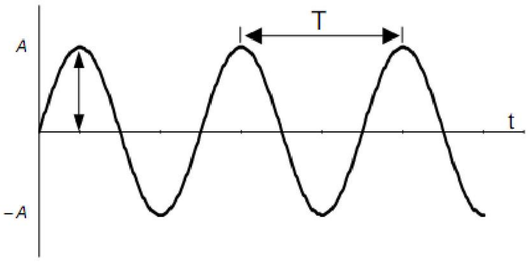
Es la distancia que existe entre dos pulsos sucesivos. O lo que es lo mismo, la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en el mismo estado de perturbación.

Amplitud (A)

Es el valor máximo de la magnitud que oscila. Por ejemplo, en un movimiento armónico simple, la amplitud es el desplazamiento máximo de la partícula; en una onda electromagnética, la amplitud es el valor máximo del campo eléctrico o magnético.



Amplitud es la máxima separación de las partículas del centro de la oscilación.



- **Periodo (T)**

Es el tiempo que tarda en repetir un estado de vibración. Dicho de otra forma, el tiempo que tarda en recorrer una longitud de onda.

- **Frecuencia (f)**

Es el número de oscilaciones que se producen en la unidad de tiempo. Se expresa en hertzios (Hz)

- **Velocidad de propagación**

Es la velocidad con que se propaga la onda. $v = \dfrac{\lambda}{T}$

La velocidad de propagación depende de las propiedades del medio, manteniéndose constante mientras no cambien sus propiedades.

Por ejemplo, el sonido, se propaga a una velocidad de 340 m/s en el aire, pero a unos 1500 m/s en el agua o a unos 5000 m/s en el acero. Pero además, cuando en un mismo medio se propagan ondas transversales y longitudinales, lo hacen, en cada caso, con diferente velocidad.

Para el caso de una **onda transversal que se propaga por una cuerda fina y homogénea**, sometida a una tensión T, la velocidad viene dada por:

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

Donde μ **es la densidad lineal** de la cuerda (masa por unidad de longitud).

No debe confundirse con la velocidad con la que se mueve cada partícula material del medio por el que se propaga la onda.

- **Número de ondas (k)**

Es el número de longitudes de onda que hay en una distancia igual a 2π. Se expresa en m^{-1}

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

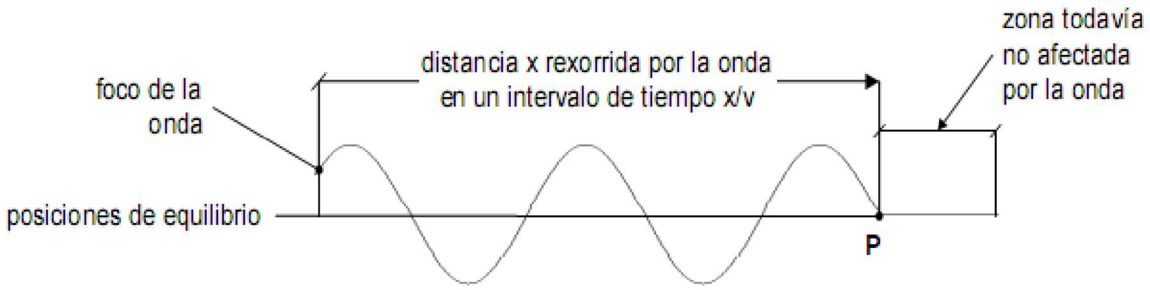
2. Ondas armónicas. Ecuación de una onda armónica.

Cuando la perturbación que se propaga es un M.A.S. la onda se llama **onda armónica.**

La ecuación de una onda será una expresión matemática que permita conocer el estado de vibración de cualquier partícula del medio a una distancia x y en el tiempo t; por lo tanto, será una función de ambas magnitudes: y = f(x,t)

Cuando se comunica un movimiento oscilatorio a una partícula de un medio elástico, la perturbación se propaga a los demás puntos del medio con una velocidad v.

Un ejemplo de esto es la propagación de una perturbación a lo largo de una cuerda. Si se le aplica un movimiento de vaivén al extremo de la cuerda, se producirá la propagación a lo largo de la dirección perpendicular a dicho movimiento de vaivén.



Consideramos que la onda se propaga en la dirección del eje OX y en sentido positivo mientras que la vibración se produce en la dirección del eje OY. Establecemos como x=0 la posición de equilibrio del foco. Si la onda viaja con velocidad v, llegar desde el foco hasta el punto P de posición x le costará un intervalo de tiempo x/v. La vibración del punto P estará retrasada respecto a la vibración del foco un intervalo de tiempo x/v.

Supongamos que escogemos el extremo de la cuerda como origen (foco) por lo que x = 0 y la ecuación del movimiento vibratorio en este punto será:

$$y\,(0,t) = A \cdot sen\; wt$$

A medida que la perturbación avanza, los puntos del medio van adquiriendo el mismo movimiento armónico del foco. Por lo tanto, el estado de vibración de cualquier punto x del medio se puede representar con la misma ecuación que la del foco, pero teniendo en cuenta que lleva menos tiempo vibrando. La vibración llega con un cierto retraso con respecto al foco.

Si se considera que la perturbación tarda un tiempo t' en recorrer la distancia desde el foco hasta el punto P (de posición x), la ecuación de la elongación será la misma que para el foco pero para un tiempo (t – t'):

$$y(x,t) = A \cdot sen\left[w(t - t')\right]$$

Y dado que: $t' = \dfrac{x}{v}$, podemos escribir: $y(x,t) = A \cdot sen\left[w(t - \dfrac{x}{v})\right]$

Ecuación que permite conocer la elongación de un determinado punto de la cuerda en cualquier instante. Se llama **ecuación de onda** o **función de onda.**

La ecuación de onda puede expresarse también de las siguientes formas:

Ø Haciendo $w = \frac{2\pi}{T}$ se tiene: $y(\mathrm{x},\mathrm{t}) = A \cdot sen \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right) = A \cdot sen\, 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{T \cdot v}\right)$

y como $T \cdot v = \lambda$ (longitud de onda) queda:

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

Ø Por otra parte, como: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\boxed{y(\mathrm{x},\mathrm{t}) = A \cdot sen\,(w \cdot t - k \cdot x)}$$

NOTAS

§ Hay que tener en cuenta hacia donde se desplaza la onda. Si su sentido es hacia la derecha (sentido positivo del eje x), la ecuación de onda llevará signo negativo: y(x,t) = A.sen (wt – k.x). Si su sentido es hacia la izquierda (sentido negativo del eje OX), la ecuación llevará signo positivo: y(x,t) = A.sen (wt + k.x).

§ Estas ecuaciones representan ondas armónicas, pues es una función sinusoidal. También pueden aparecer en función del coseno y con los términos del paréntesis con el orden cambiado.

§ No hay que confundir la **velocidad de propagación o velocidad de fase** $\left(v = \frac{\lambda}{T}\right)$ con la **velocidad de vibración** la cual se obtiene derivando la ecuación de la onda respecto del tiempo $u = \frac{dy}{dt}$

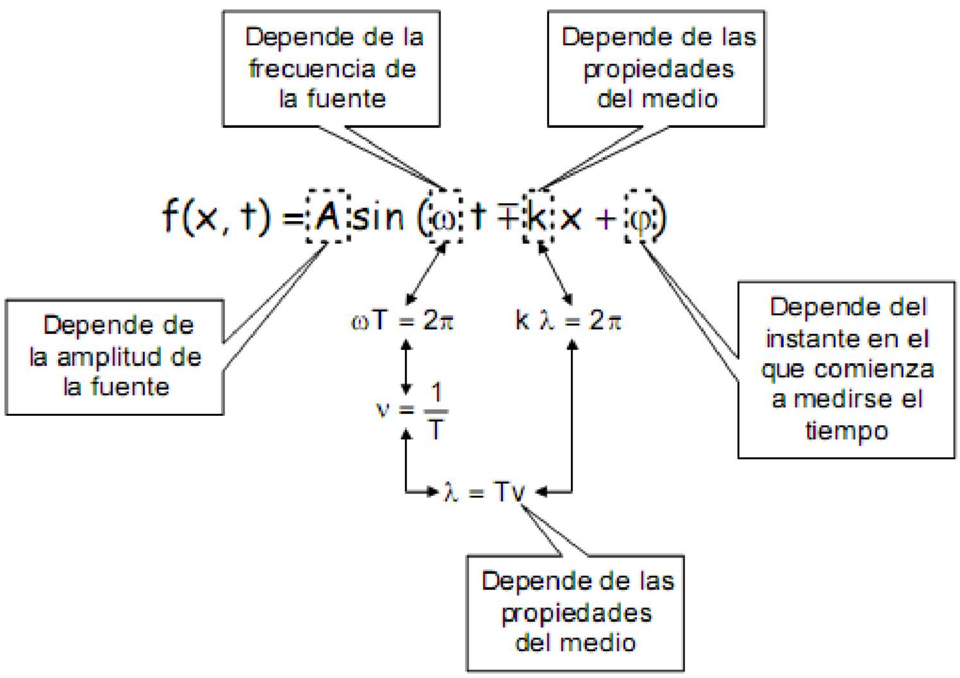
Actividades

1. Dadas las siguientes ecuaciones de onda, obtén los valores de la amplitud, el periodo, la frecuencia, la frecuencia angular, la longitud de onda y el número de ondas. Indica en cada caso la dirección y el sentido de propagación de la onda y calcula la velocidad de propagación.

a) $y(x,t) = 2 \cdot sen 2\pi\left(\frac{t}{0{,}01} - \frac{x}{30}\right)$ (S.I.) b) $y(z,t) = 0{,}01 \cdot sen(2\pi .z - \pi .t)$ (S.I.)

2. El extremo de una cuerda larga se hace vibrar con un periodo de 2 s y una amplitud de 8 cm. La separación entre dos valles de la cuerda es de 120 cm. (a) Escribe la ecuación de movimiento del foco y la ecuación de la onda, suponiendo que la vibración tiene lugar en el eje OY y que la onda se propaga en el sentido positivo del eje OX. (b) Escribe la ecuación de la elongación y la ecuación de la velocidad de un punto situado a 30 cm del foco. (c) Calcula la elongación y la velocidad del punto considerado, a los 5 segundos de iniciarse el movimiento. (d) Calcula la velocidad de propagación de la onda.

Los parámetros de la ecuación de ondas

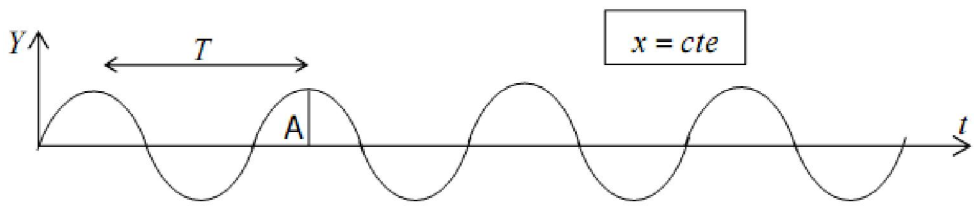


Doble periodicidad de las ondas armónicas

La ecuación de una onda es función de dos variables: una espacial y otra temporal. Además, dicha función es periódica respecto de ambas variables.

<u>Periodicidad respecto del tiempo</u>

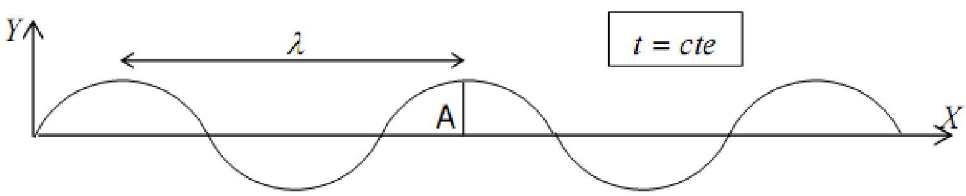
Si representamos y en función de t para un valor fijo de x:



Cada vez que ha transcurrido un periodo la perturbación se repite por igual.

<u>Periodicidad respecto del espacio</u>

Si representamos y frente a x para un valor fijo de t:



La perturbación se repite en todos los puntos cuyas distancias son múltiplos de la longitud de onda.

Fase y oposición de fase.

Dos puntos del medio se encuentran en concordancia de fase cuando presentan el mismo estado de vibración, con la misma elongación y la misma velocidad. En este caso la diferencia de fase entre ellos es 2π radianes o un múltiplo de esta cantidad, por lo tanto:

$$(wt - kx_1) - (wt - kx_2) = 2\pi . n \quad \text{para } n = 0,1,2,3\ldots$$

Operando con esta expresión se obtiene la distancia entre ambos puntos:

$$-kx_1 + kx_2 = 2\pi\, n \Rightarrow k(x_2 - x_1) = 2\,\pi\, n \Rightarrow \frac{2\,\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = 2\,\pi\, n$$

Por tanto:

$$\boxed{(x_2 - x_1) = n \cdot \lambda}$$

Es decir, para dos puntos que estén en concordancia de fase, la diferencia entre sus distancias al foco debe ser un número entero de longitudes de onda.

Dos puntos están en oposición de fase cuando la diferencia de fase entre ellos es $(2n+1)\cdot\pi$ radianes:

$$(wt - kx_1) - (wt - kx_2) = (2n+1)\,\pi \quad \text{para } n = 0,1,2,3\ldots$$

$$-kx_1 + kx_2 = (2\,n+1)\,\pi \Rightarrow \frac{2\,\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = (2\,n+1)\,\pi$$

Por tanto:

$$\boxed{(x_2 - x_1) = (2\,n+1)\cdot\frac{\lambda}{2}}$$

Es decir, para que dos puntos estén en oposición de fase, la diferencia entre sus distancias al foco debe ser un número impar de semilongitudes de onda.

Actividades

1. Determina la diferencia de fase entre dos puntos de un medio separados una distancia de 5,6 mm al propagarse un movimiento ondulatorio de 4,5 mm de longitud de onda.

2. Una onda armónica plana que se propaga en el sentido positivo del eje OX, tiene un periodo de 0,2 s. En un instante dado la diferencia de fase entre dos puntos separados una distancia de 60 cm es igual a π radianes. Se pide determinar: (a) La longitud de onda y velocidad de propagación de la onda. (b) Diferencia de fase entre dos estados de perturbación de un mismo punto que tienen lugar en dos instantes separados por un intervalo de tiempo de 2 s.

3. La ecuación de una onda es: $y(x,t) = 0{,}01$ sen $(100\,\pi t - 20\pi x)$ estando x e y en metros. (a) Halla todas las características de esa onda: amplitud, longitud de onda, periodo, frecuencia y velocidad de propagación. (b) Da la posición de varios puntos de la cuerda que vibren en fase. (c) Da la posición de varios puntos de la cuerda que vibren en oposición de fase.

3. Energía, potencia e intensidad de una onda

Como ya hemos puesto de manifiesto al comienzo del tema, las ondas propagan energía. De modo cualitativo podemos percibirlo al observar cómo un objeto que flota en el agua comienza a oscilar cuando llega a él la perturbación producida. O en el caso de las ondas sísmicas producidas en los terremotos, o en el caso de las ondas electromagnéticas procedentes del Sol.

Nos vamos a centrar en las ondas mecánicas y a considerar el caso particular de las ondas armónicas. El fenómeno de transporte de energía es cualitativamente distinto según se trate de ondas unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales.

Energía en una onda armónica unidimensional

Consideremos el caso de un oscilador armónico unido al extremo de una cuerda. La energía que hace que cada punto de la cuerda oscile con cierta amplitud y se transmite por toda la cuerda viene dada por:

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

(¡**Ojo**! No confundir k con el número de ondas)

donde: $k = m \cdot w^2$ Por tanto: $E = \frac{1}{2}m_i \cdot w^2 \cdot A^2$ siendo m_i la masa de una de las partículas de la cuerda. Definiendo una masa por unidad de longitud: $m = \mu \cdot L$ queda:

$$E = \frac{1}{2}\mu \cdot L \cdot A^2 \cdot w^2$$

En función de la frecuencia podemos escribir:

$$E = \frac{1}{2}\mu \cdot L \cdot A^2 \cdot 4\pi \cdot f^2$$ es decir: $$\boxed{E = 2 \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot L \cdot A^2 \cdot f^2}$$

De la expresión anterior podemos deducir:

a) La energía transmitida en una onda armónica es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado de la amplitud.
b) Si no se disipa energía en el medio de transmisión de la onda unidimensional, su amplitud permanece constante. En caso contrario, la amplitud de la onda resultaría amortiguada.

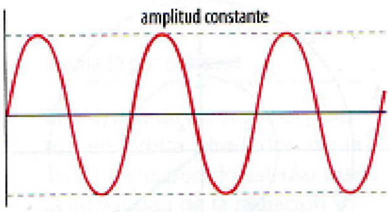


FIGURA 8.22. Si no se disipa energía en el medio, una onda armónica unidimensional mantiene constante su amplitud.

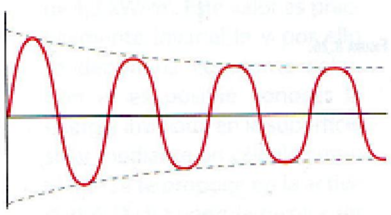
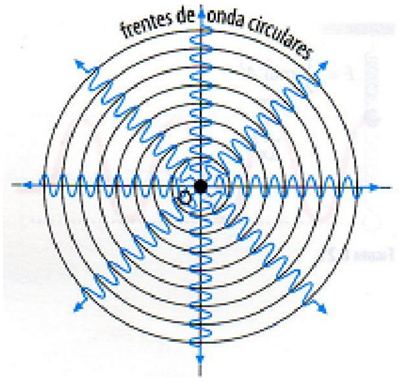


FIGURA 8.23. Si se disipa energía en el medio, la amplitud de la onda armónica disminuye, pero los parámetros que la caracterizan se mantienen constantes. Se dice que la onda está amortiguada.

Energía en una onda armónica bidimensional

Sean por ejemplo, las ondas circulares que se forman cuando tiramos una piedra a un estanque. Ahora los frentes de onda son circulares.

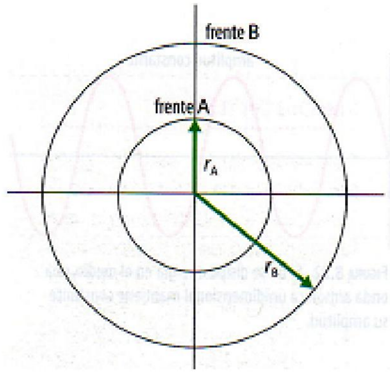


Un razonamiento análogo al anterior nos lleva a escribir: $E = \frac{1}{2} m_i \cdot w^2 \cdot A^2$ si definimos una densidad lineal o masa por unidad de longitud, se tendrá: $m_i = \mu \cdot 2\pi \cdot R$, ya que ahora los frentes de onda son circunferencias. Por tanto:

$$\boxed{E = \mu \cdot \pi \cdot R \cdot w^2 \cdot A^2}$$

En función de la frecuencia:

$$\boxed{E = 4\pi^3 \cdot \mu \cdot R \cdot A^2 \cdot f^2}$$



Como la energía se conserva, y dado que la onda es armónica, lo que exige que la frecuencia sea siempre la misma, es evidente que, al variar la distancia al foco emisor, R, debe modificarse también la amplitud, de modo que:

$$E_A = E_B \Rightarrow \quad \mathrm{R_A} \cdot \mathrm{A_A^2} = \mathrm{R_B} \cdot \mathrm{A_B^2} \Rightarrow \mathrm{R} \cdot \mathrm{A}^2 = cte$$

Lo que significa que:

> A medida que una onda circular se propaga y aleja del foco emisor, su amplitud decrece según:
> $$\mathrm{A} \propto \frac{1}{\sqrt{\mathrm{R}}}$$

Energía en una onda armónica tridimensional

En este caso, los frentes de onda son superficies esféricas (el sonido, la luz de un foco puntual, las ondas de choque de una explosión…).

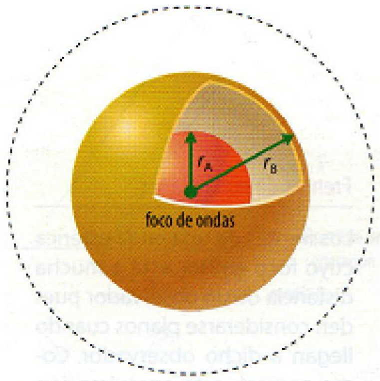
Hablaremos en estos casos, de densidad superficial de masa en lugar de densidad lineal, y haremos un razonamiento análogo a los anteriores.

$$E = \frac{1}{2} m_i \cdot w^2 \cdot A^2$$ y como: $m_i = \rho \cdot S = 4\pi \cdot R^2 \cdot \rho$ sustituyendo:

$$\boxed{E = 2\pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot w^2 \cdot A^2}$$

En función de la frecuencia:

$$\boxed{E = 8\pi^3 \cdot R^2 \cdot \rho \cdot f^2 \cdot A^2}$$



Puesto que la energía se conserva, y dado que la onda es armónica, se desprende que:

$$E_A = E_B \Rightarrow \quad \mathrm{R}_\mathrm{A}^2 \cdot \mathrm{A}_\mathrm{A}^2 = \mathrm{R}_\mathrm{B}^2 \cdot \mathrm{A}_\mathrm{B}^2 \Rightarrow \mathrm{R} \cdot \mathrm{A} = cte$$

Por tanto, al aumentar R a medida que la onda se aleja del foco emisor, la amplitud decrece y la onda se amortigua. Pero debe entenderse que esta amortiguación no es consecuencia de una disipación de la energía, sino una exigencia de su conservación.

A medida que una onda esférica se propaga y aleja del foco emisor, su amplitud decrece según:

$$\mathrm{A} \propto \frac{1}{R}$$

3.1 Potencia de una onda

La potencia de una onda se define como la energía transmitida por unidad de tiempo.

Para el caso de una onda unidimensional:

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

Siendo: v = velocidad de propagación.

3.2 Intensidad de una onda

La intensidad de una onda en un punto es la energía que atraviesa por unidad de tiempo, una superficie unidad colocada perpendicularmente a la dirección de propagación.

$$I = \frac{E/t}{S} = \frac{P}{S}$$

Se mide en $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ o en $W \cdot m^{-2}$

Como la intensidad es directamente proporcional a la energía de la onda y ésta es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y de la amplitud, también lo será la intensidad, por lo que podemos escribir:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_1^2}{f_2^2} \; ; \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2}$$

Conforme una onda se propaga va disminuyendo su intensidad (se dice que se amortigua). Este hecho sólo afecta al valor de su amplitud, que disminuye conforme transcurre el tiempo, sin que el periodo ni la frecuencia se alteren. Igual ocurre con la velocidad de transmisión y, por lo tanto, con la longitud de onda.

Existen dos fenómenos diferentes que contribuyen de forma distinta a la amortiguación: la atenuación y la absorción.

La **atenuación** de una onda es la disminución de intensidad que se produce cuando el frente de ondas aumenta de superficie conforme la onda se propaga. Podemos considerar que la onda en sí no pierde energía, sino que simplemente la energía que transporta se encuentra más distribuida.

La **absorción** se produce cuando el medio por el que se propaga la onda se queda con parte de la energía que trasporta la onda, ocasionando ello una disminución de la intensidad de la onda.

2. Fenómenos ondulatorios. Estudio cualitativo.

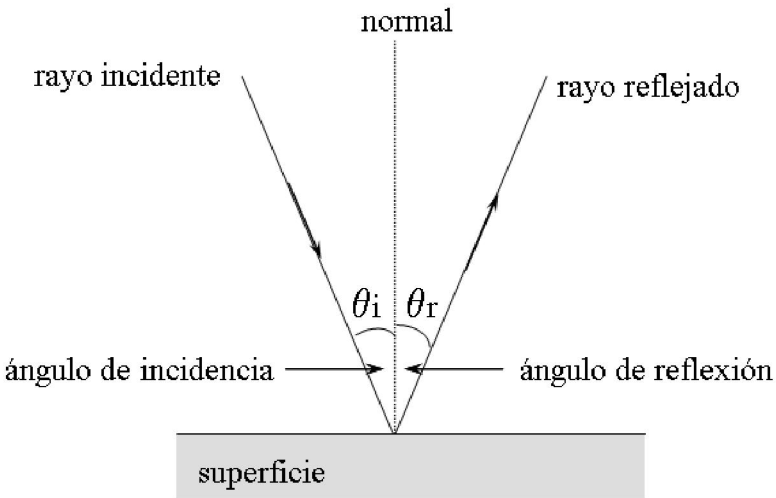
A) REFLEXIÓN

El fenómeno de la reflexión es propio de cualquier tipo de ondas y se define como **el cambio de dirección dentro del mismo medio que experimentan las ondas al incidir sobre una superficie de separación entre dos medios.**

Las ondas incidentes y reflejadas viajan a la misma velocidad, ya que no cambian de medio.

Los diagramas de rayos se utilizan para ilustrar de una manera más simple el comportamiento de las ondas. Se llama:

- **Normal** (n) a la línea perpendicular a la superficie que refleja en el punto de incidencia.
- **Ángulo de incidencia** (θ_i) al ángulo formado por la normal y el rayo incidente.
- **Ángulo de reflexión** (θ_r) al ángulo formado por la normal y el rayo reflejado.



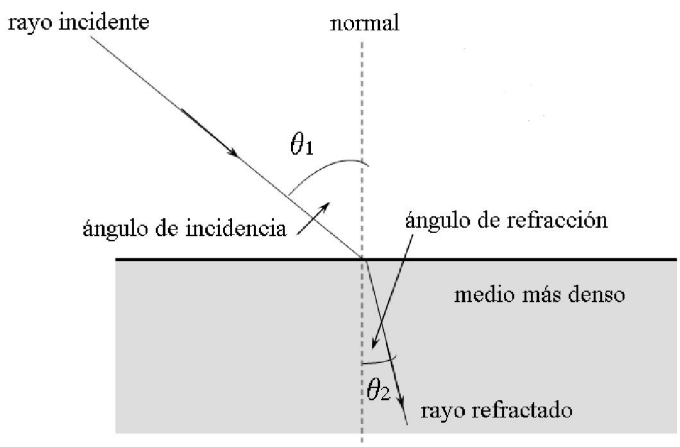
Leyes de Snell para la reflexión:

1. El ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales: $\theta_i = \theta_r$
   Esta es la **primera ley de Snell** de la reflexión

2. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano.
   Segunda ley de Snell.

B) REFRACCIÓN

La refracción se produce cuando una onda llega a una superficie de separación de dos medios de propagación distintos. **Consiste en el cambio de dirección en la propagación de la onda y en su velocidad.**



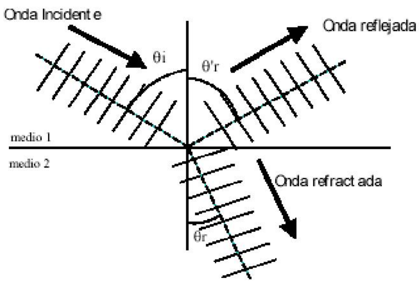
Ley de Snell para la refracción:

La relación entre el seno del ángulo de incidencia y el de refracción es igual al cociente entre las velocidades de propagación en dichos medios.

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

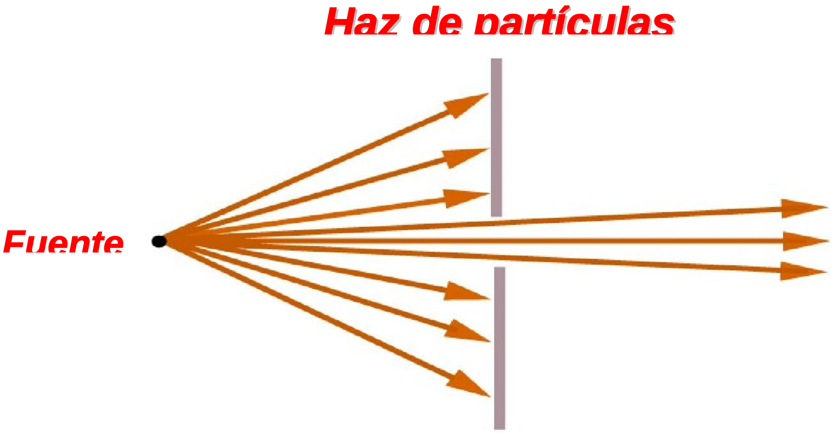
Cuando una onda (onda incidente) alcanza la superficie de separación entre dos medios en los que se propaga con diferente velocidad, se producen los fenómenos de reflexión y refracción simultáneamente.

- La **ONDA REFLEJADA** es la que, tras experimentar un cambio en su dirección, se propaga en el mismo medio en que se propaga la onda incidente.
- La **ONDA REFRACTADA** es la que se propaga en el segundo medio, habiendo sufrido también un cambio en su dirección respecto de la de incidencia.



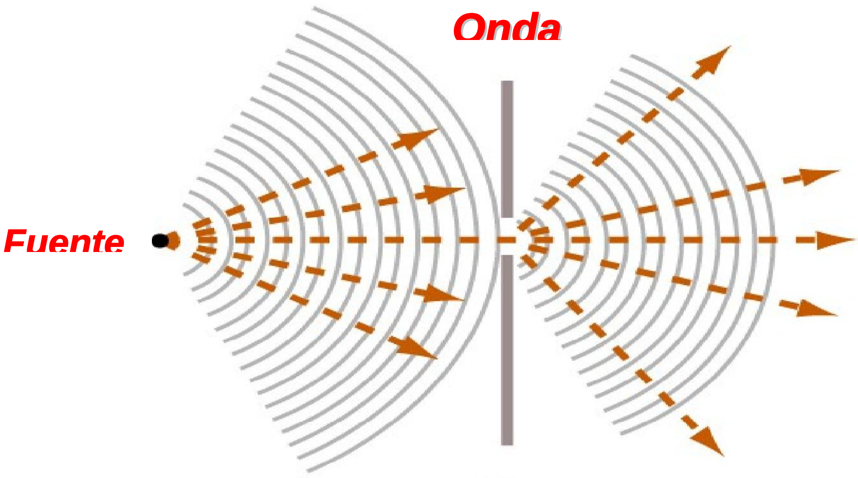
C) DIFRACCIÓN

- Cuando un haz de partículas incide sobre una abertura con un obstáculo, estas partículas son detenidas por la barrera o pasan sin cambiar de dirección.

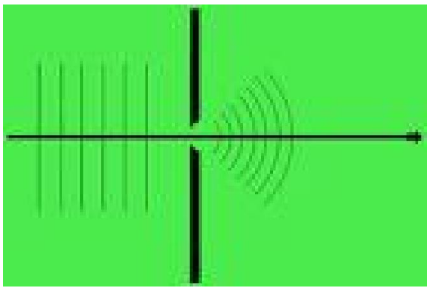


(a)

- Sin embargo, cuando una onda encuentra un obstáculo tiende a rodearlo. Si una onda encuentra una barrera con una pequeña abertura se extiende alrededor del obstáculo en forma de onda esférica o circular. A este comportamiento se le denomina **difracción.**



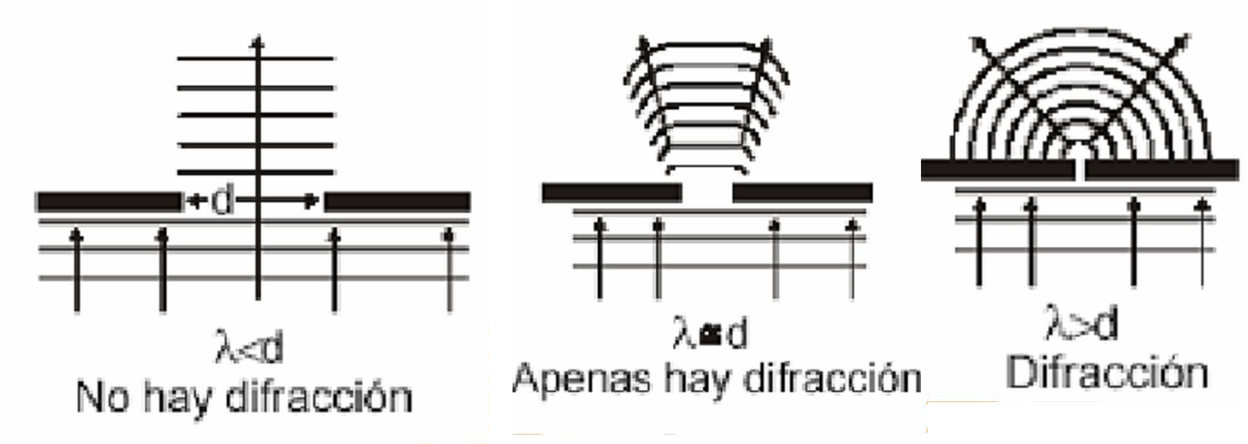
(b)



Difracción es el fenómeno en virtud del cual un sistema de ondas que atraviesa un obstáculo por un orificio pequeño se propaga en todas direcciones detrás de dicho orificio; para lo cual es necesario que su diámetro sea aproximadamente igual a la longitud de onda de las ondas que se propagan.

El fenómeno de la difracción es característico de todas las ondas. En virtud de la difracción, las ondas pueden bordear obstáculos. Su magnitud depende de la relación existente entre la longitud de onda y las dimensiones del obstáculo.

Si se practica un orificio en un obstáculo que se oponga al movimiento ondulatorio, pueden ocurrir estos dos casos, según que dicho orificio sea grande o pequeño respecto a la longitud de onda.



E) POLARIZACIÓN

Al sacudir una cuerda tensa arriba y abajo se obtiene una onda transversal en un plano vertical. Si se hace vibrar hacia la derecha o hacia la izquierda, la nueva onda transversal vibra en un plano horizontal. Es decir, una onda transversal vibra en todos los planos perpendiculares a la dirección de propagación.

Se dice que una onda está **polarizada** cuando se restringen los planos de vibración. Si se consigue que sólo vibre en un plano se dice que la onda está **polarizada linealmente.**

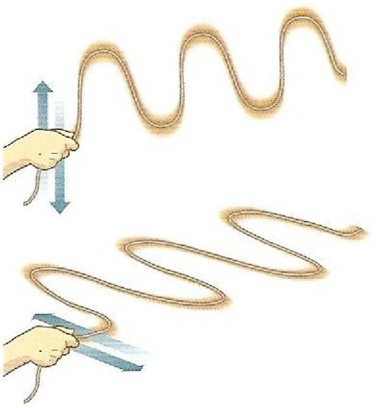


Figura 2.52. Dos ondas polarizadas, una en un plano horizontal y otra en un plano vertical.

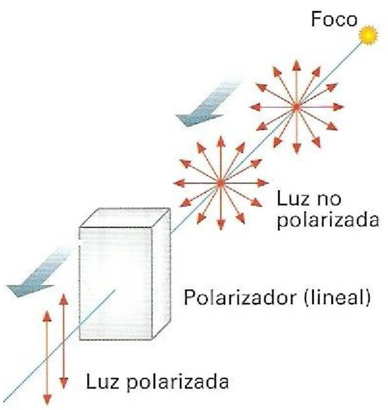


Figura 2.53. Obtención de luz polarizada por absorción selectiva.

Los fenómenos estudiados anteriormente, reflexión, refracción y difracción, son característicos de cualquier tipo de onda. Sin embargo, sólo pueden presentar polarización las ondas transversales, no así las longitudinales.

Generalmente, cualquier fuente de luz emite luz no polarizada, pero determinados métodos permiten polarizarla. Uno de ellos es la absorción selectiva que presentan algunos materiales (como la turmalina) como los sintéticos (los polaroides, utilizados en fotografía, gafas de sol,...).

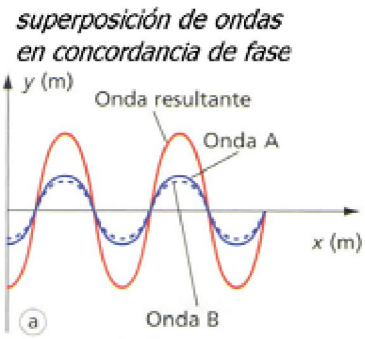
F) INTERFERENCIAS

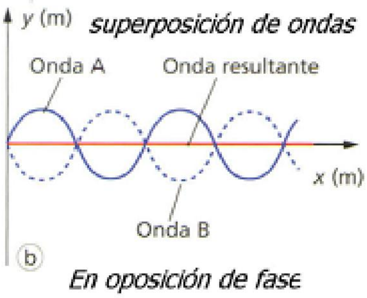
“Cuando dos o más movimientos ondulatorios coinciden simultáneamente en un punto del medio en el que se propagan, la perturbación producida en dicho punto es igual a la suma de las perturbaciones que, individual e independientemente, originaría cada una de ellas en dicho punto” **(Principio de superposición)**

Dicho de otro modo, la elongación de la onda resultante es la suma de las elongaciones de cada una por separado. Después de superponerse, cada onda sigue propagándose de la misma manera que antes.

Se llama **interferencia** la superposición de dos movimientos ondulatorios.

Si la amplitud de la onda resultante es mayor que las de las ondas componentes, la interferencia se llama **constructiva.** Por el contrario, cuando la amplitud resultante es menor la interferencia se llama **destructiva.**

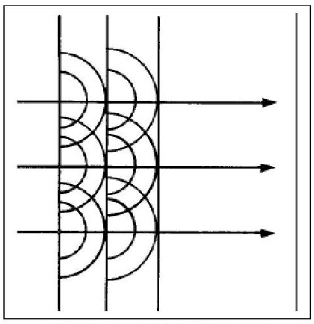


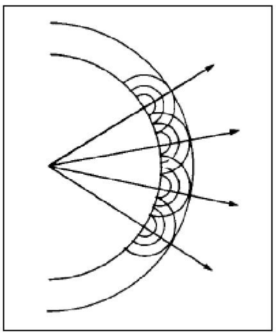


3. Principio de Huygens

Fenómenos ondulatorios como la reflexión y la difracción tienen una explicación sencilla utilizando un método geométrico que Huygens propuso en 1678 para explicar la naturaleza ondulatoria de la luz. Esta construcción es válida para cualquier tipo de ondas y permite, además, explicar cómo se pasa de un frente de onda al siguiente y por tanto cómo se propaga la energía a través del medio.

“Todo punto de un frente de ondas es centro emisor de nuevas ondas elementales cuya envolvente es el nuevo frente de onda” (La envolvente de una familia de ondas, es una curva tangente a todas ellas).


Aplicación del principio de Huygens a una onda plana.


Aplicación a una onda esférica

4. Estudio cualitativo del efecto Doppler

El efecto Doppler es el cambio que experimenta la frecuencia con la que se percibe un sonido respecto de la frecuencia con la que se ha originado, debido al movimiento relativo entre la fuente y el receptor.

El efecto Doppler no es exclusivo del sonido sino que es general de todos los movimientos ondulatorios.

Podemos considerar 3 casos:

1er Caso: Observador en reposo y foco en movimiento

La frecuencia aparente de un foco sonoro en movimiento aumenta cuando se aproxima al observador y disminuye cuando se aleja del mismo, debido a que cuando se acerca los frentes de onda se agolpan en el sentido del movimiento y se distancian en el sentido opuesto.

La frecuencia que percibe el observador cuando se acerca es: $f' = f \cdot \dfrac{v}{v - v_{foco}}$

Y cuando se aleja: $f' = f \cdot \dfrac{v}{v + v_{foco}}$ en donde f es la frecuencia del foco, v es la velocidad de propagación de la onda y v_{foco} la velocidad del foco.

2º Caso: Observador en movimiento y foco en reposo

En este caso la frecuencia percibida aumenta al acercarse el observador al foco y disminuye cuando se aleja del mismo, porque aunque la separación entre dos frentes de ondas permanece constante, se modifica la velocidad relativa con la que se propagan las ondas respecto al observador.

Cuando el observador se acerca al foco: $f' = f \cdot \dfrac{v + v_{obs}}{v}$

Cuando el observador se aleja del foco : $f' = f \cdot \dfrac{v - v_{obs}}{v}$

3er Caso: Observador y foco en movimiento

Aunque cuantitativamente los efectos no son iguales, la frecuencia aparente de un foco sonoro aumenta cuando la distancia relativa disminuye, haciéndose más aguda y si la distancia relativa aumenta, la frecuencia aparente del foco disminuye y el sonido se torna más grave.

La frecuencia final que percibe el observador es: $f' = f \cdot \dfrac{v + v_{obs}}{v - v_{foco}}$

En donde las velocidades de acercamiento tienen signo positivo y las de alejamiento signo negativo.

El efecto Doppler tiene aplicaciones en diversos campos de la Física. Por ejemplo el radar, además de detectar objetos y determinar su posición, permite establecer la velocidad de estos respecto del radar, a partir de la diferencia entre las frecuencias de la onda emitida y la reflejada.

5. Ondas estacionarias.

Una **onda estacionaria** es la que resulta de la superposición de **dos ondas idénticas** de la misma amplitud, frecuencia y longitud de onda, que se propagan por el mismo medio, en la misma dirección pero en sentidos contrarios.

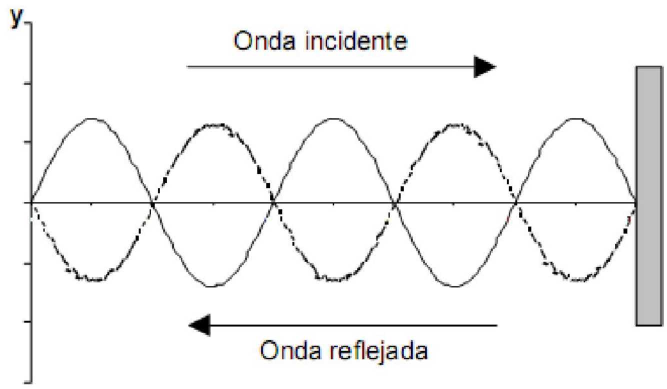
Recibe este nombre porque el perfil de la onda no se desplaza, la onda resultante da la sensación de no avanzar, encontrándose estacionada en el espacio (de ahí su nombre).

En una onda estacionaria:

- Hay puntos del medio que no vibran (se llaman **NODOS**). Son los puntos donde al encontrarse ambas ondas en oposición de fase, se anulan.

- Hay otros puntos donde, por encontrarse las dos ondas en fase igual, se refuerzan haciendo que la amplitud de la onda resultante sea el doble de la de cada una de ellas (se llaman **VIENTRES**).

Consideremos el caso particular de las ondas estacionarias que se producen en una cuerda: si se agita el extremo de una cuerda (serviría también cualquier muelle), mientras se mantiene fijo el otro, se propagará una onda desde el extremo agitado al fijo, en donde se reflejará y regresará al punto de partida. Si se hace que la cuerda siga vibrando, será recorrida por ondas en ambos sentidos y la onda producida que se mueve en un sentido interferirá con la reflejada que lo hace en sentido contrario.



En las ondas estacionarias no se produce transporte de energía de un punto a otro del medio, a diferencia de las ondas viajeras. En una situación real, en el medio estacionario se perderá energía por rozamiento, por lo que el foco que produce la perturbación debe seguir proporcionando energía, cumpliéndose que la energía que recibe el medio que vibra con una onda estacionaria sea igual a la que pierde por rozamiento.

Vamos a estudiar el caso de ondas estacionarias unidimensionales en cuerdas o resortes:

Ø **Ondas estacionarias en cuerdas con un extremo fijo.**

Supongamos una cuerda con un extremo fijo, mientras que el otro extremo lo agitamos con una determinada frecuencia angular w. En la cuerda se superpondrán dos ondas, la directa que estamos provocando, de ecuación:

$$y = A \cos (wt-kx)$$

y la reflejada en la pared, de ecuación: $y = - A \cos (wt+kx)$

El signo menos es debido a que al reflejarse la onda aparece un desfase de π radianes con respecto a la onda directa.

La onda resultante será:

$$y = y_1 + y_2 = A\cos(wt - kx) - A\cos(wt + kx)$$

$$\boxed{y = 2A \cdot sen(kx) sen(wt)}$$

Siendo la amplitud:

$$A_0 = 2A \cdot sen(kx)$$

Existen puntos que no oscilan, puesto que su amplitud es cero:

$$A_0 = 0 \Rightarrow sen(kx) = 0 \Rightarrow kx = n \cdot \pi \quad \text{de donde:} \quad x = n \cdot \frac{\lambda}{2}\text{; n= 0, 1, 2,...}$$

Luego a distancias de media longitud de onda hay puntos que no se mueven. A estos puntos se les llama **NODOS**.

Existen otros puntos que oscilan con amplitud máxima:

$$sen(kx) = \pm 1 \Rightarrow)kx = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2} \quad \text{de donde:} \quad x = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{4}\text{; n = 0, 1, 2, ...}$$

A estos puntos se les llama antinodos o **VIENTRES.**

De tal manera que la distancia entre dos nodos o dos vientres consecutivos será:

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

Ø **Ondas estacionarias en cuerdas con extremos libres.**

En este caso, la onda resultante es igual a la incidente pero de sentido contrario.

Sean dos ondas de ecuaciones: $y_1 = Asen(wt + kx)$ e $y_2 = Asen(wt - kx)$ según el principio de superposición, la onda resultante será:

$$y = y_1 + y_2 = Asen(wt + kx) + Asen(wt - kx)$$

Desarrollando:

$$\boxed{y = 2A\cos kx sen wt}$$

Siendo la amplitud de la onda resultante: $A_0 = 2A\cos kx$

NODOS: puntos de amplitud nula $\Rightarrow$ $A_0 = 0 \Rightarrow \cos(kx) = 0 \Rightarrow kx = \left(\frac{\pi}{2} + n\pi\right)$; n = 0,1,2,...

Por tanto: $$x = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

VIENTRES: puntos de amplitud máxima $\Rightarrow$ $\cos(kx) = \pm 1 \Rightarrow kx = n\pi$: n= 0, 1, 2, ...

Por tanto: $$x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

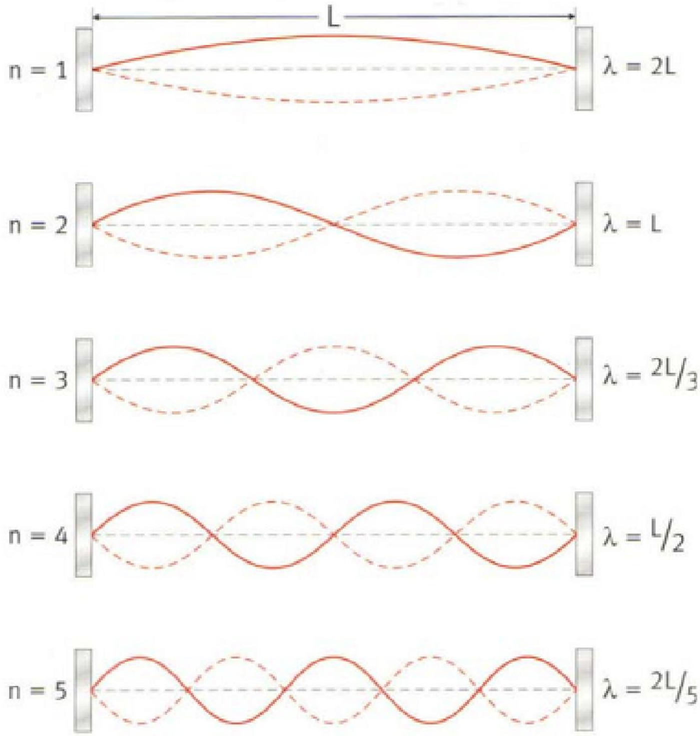
Igualmente, la distancia entre dos nodos o dos vientres consecutivos será: $d = \frac{\lambda}{2}$

Características del movimiento resultante:

Ante todo, **no es un movimiento ondulatorio**. No tenemos propagación de energía a lo largo de la cuerda, debido a que tenemos dos ondas viajeras idénticas (con igual velocidad) pero de sentidos contrarios. **La velocidad de propagación total sería nula** $(v_{OE} = 0)$ **.**

Tampoco posee características (λ, k, ω, A) propias. Estas magnitudes, que aparecen en la expresión de la onda, pertenecen a las ondas viajeras que se han superpuesto.

Armónicos en una cuerda



Al provocar oscilaciones con frecuencias determinadas en una cuerda que tenga sus dos extremos fijos, podemos conseguir el establecimiento de ondas estacionarias. ¿Cuáles son esas frecuencias?

Consideremos una cuerda de longitud L, fija por ambos extremos. Podemos observar en la figura que los extremos fijos constituyen nodos, por lo que la condición que debe cumplirse es que:

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

Dándole valores a **n** , obtenemos las longitudes de las ondas que pueden existir estacionariamente. Y conociendo la velocidad a la que se propaga la onda, obtenemos las posibles frecuencias, llamadas **armónicos.**

Dado que: $\lambda = \frac{v}{f}$, donde **v** es la velocidad de propagación de la onda, podemos escribir:

$L = n \cdot \frac{v}{2f}$ por lo que:

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

Para n = 1 se obtiene la frecuencia más baja, también llamada **fundamenta**l, para n = 2 se obtiene el **primer armónico**, para n = 3 el **segundo armónico**, y así sucesivamente.

En un instrumento musical, al armónico fundamental (la frecuencia correspondiente a ese armónico) es el que nos indica la nota musical que estamos tocando. El resto de los armónicos nos dan el timbre, que diferencia a unos instrumentos de otros.

Como la velocidad de propagación de una onda en una cuerda viene dada por la expresión: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

Podemos escribir la frecuencia de los armónicos en función de la tensión de la cuerda.

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{T/\mu}$$

Lo que nos pone de manifiesto que el sonido emitido por las cuerdas cambia al variar la tensión (por eso se "afinan" las cuerdas de los instrumentos musicales al tensarlas o destensarlas).

6. Ondas sonoras

Las **ondas sonoras** son ondas mecánicas longitudinales. Mecánicas, porque necesitan de un medio material para propagarse, y longitudinales, porque las partículas oscilan en la misma dirección en que se propagan.

El proceso que engloba la producción, transmisión y recepción de las ondas sonoras por nuestro oído es lo que se denomina sonido. Dicho proceso requiere:

- Una **fuente** productora de ondas sonoras (altavoces, instrumentos musicales, la voz humana, etc.)
- Un **medio transmisor** por el que se propague la onda (en nuestro entorno cotidiano, el aire).
- Un **receptor** o detector de sonidos que transforme la energía transmitida por las vibraciones mecánicas producidas en otras formas de energía que permitan el análisis y la interpretación de las frecuencias e intensidades.

Por tanto, podemos decir que:

El sonido es la propagación de la vibración de un cuerpo elástico a través de un medio material.

La velocidad de propagación del sonido depende del medio, e incluso en el aire varía con la temperatura según la ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}$$

γ : constante que depende de la humedad del aire
M: masa molecular promedio
R: constante de los gases

Velocidad del sonido en distintos medios:

aire	344	m/s
etanol	1200	m/s
agua	1498	m/s
Vidrio	5170	m/s
Aluminio	5000	m/s
Hierro	5120	m/s

Tono y timbre de un sonido

El **tono** es la característica del sonido que indica si éste es agudo (tono alto) o grave (tono bajo). La magnitud física que determina el tono es la frecuencia del sonido. Una frecuencia alta significa un sonido agudo; una frecuencia baja, un sonido grave.

Sin embargo, cuando escuchamos la misma nota musical (el mismo tono) emitida por dos instrumentos musicales diferentes (un piano y un violín, por ejemplo), suenan de forma distinta, y podemos distinguir a qué instrumento pertenecen. Esto es debido a que todo instrumento musical, al vibrar, produce ondas estacionarias de múltiples frecuencias (los armónicos). El armónico fundamental es el que nos da la nota musical, y el resto de los armónicos le dan al sonido las características propias del instrumento. Estos armónicos secundarios constituyen el **timbre** del sonido.

La intensidad permite clasificar los sonidos en fuertes y débiles.

La intensidad de un movimiento ondulatorio en un punto se evalúa como **"la cantidad de energía que atraviesa por unidad de tiempo una superficie unidad colocada perpendicularmente a la dirección de propagación en ese punto".**

La intensidad en un punto a una distancia R del foco emisor será:

$$I = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Para dos distancias R_1 y R_2 del foco, sus intensidades están en la relación:

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2^2}{R_1^2}$$

Observemos que la intensidad en un punto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del mismo al foco emisor. Si tenemos en cuenta que la energía del movimiento ondulatorio es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud:

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{A_1^2}{A_2^2}$$

Comparando las dos expresiones anteriores, obtenemos:

$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{R_2}{R_1}$$

Se ve que las amplitudes de la onda en un punto del medio son inversamente proporcionales a las distancias de dicho punto al foco emisor.

Nivel de intensidad de una onda sonora

Cuando nos referimos a las ondas sonoras, no existe proporcionalidad entre la intensidad de la onda y la sensación sonora que perciben nuestros oídos. Si llamamos **S a la sensación sonora o sonoridad**, se demuestra experimentalmente que:

$$S=10\,\text{Log}\,\frac{I}{I_0}$$

donde I_0 e I representan los valores de la intensidad incidente y la que tiene después de recorrer una cierta distancia en el medio en que se propaga. Por convenio, se toma:

$I_0=10^{-12}\ \text{W/m}^2$. La sonoridad se mide en **decibelios, dB.**

El oído humano es capaz de detectar sonidos a partir de cierto valor de intensidad, denominado **valor umbral de audición.** Este valor es diferente según la frecuencia del sonido, por lo que ciertos sonidos se oyen mejor que otros aunque sean menos intensos.

Ultrasonidos e infrasonidos

El oído humano es capaz de percibir sonidos comprendidos entre 16 Hz y 20000Hz de frecuencia.

Por debajo de la frecuencia mínima (**infrasonidos**), no somos capaces de oír las vibraciones. Pueden producirse infrasonidos intensos por el viento, o en los momentos previos a un terremoto. Si bien no los oímos, estas vibraciones pueden afectar a órganos internos y a terminaciones nerviosas, lo que origina malestar e irritabilidad.

Por encima de 20 kHz se sitúan los **ultrasonidos**. Existen especies animales (perros, murciélagos, delfines…) que son capaces de distinguir frecuencias más elevadas que el hombre. Los ultrasonidos de muy alta frecuencia transmiten mucha energía y pueden concentrarse en un punto con mucha facilidad, por lo que son utilizados en comunicaciones, en medicina (para romper cálculos de riñón), etc.