ONDAS

Hasta ahora hemos estudiado el movimiento de partículas materiales. En este tema veremos el movimiento o propagación de algo que no parece material: energía que se propaga a través de la materia o del vacío.

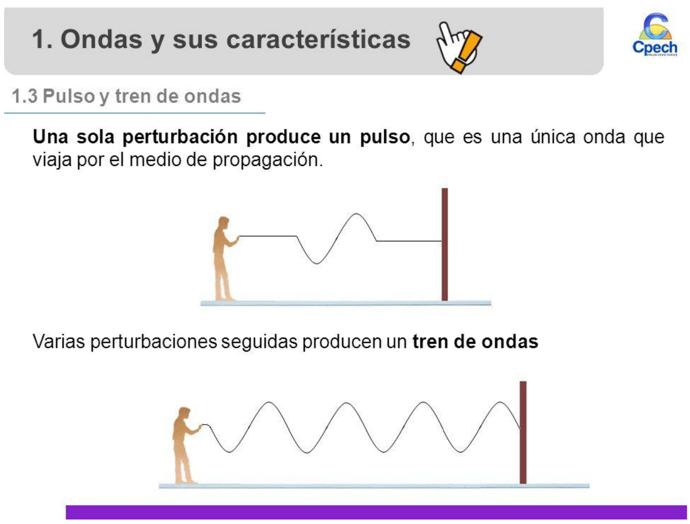
1. CONCEPTO DE ONDA

Se puede transferir energía a un cuerpo distante mediante otro cuerpo portador: por ejemplo la bola que golpea a los bolos que se hallan en reposo. Pero también es posible transferirla de otra manera: una piedra cae en un estanque y, al cabo de un tiempo, un objeto que flota a cierta distancia comienza a oscilar. En este caso, no ha sido necesario que la piedra golpee directamente al objeto y, sin embargo se ha transferido igualmente energía.

En la naturaleza existen abundantes ejemplos de perturbaciones producidas en un medio, que se propagan a través de dicho medio. Esta propagación recibe en general el nombre de onda. **Una onda representa el movimiento de propagación de una perturbación de un punto a otro sin que exista transporte neto de materia, solo se transporta la energía.**

Debemos recalcar que una onda, a pesar de no ser un ente material, sí es una entidad física real, pues transporta energía e interacciona con la materia.

Si la perturbación alcanza al cabo de cierto tiempo a todos los puntos del medio, entonces esa perturbación recibe el nombre de **onda viajera**. En cambio, si la propagación está limitada, mediante fronteras, a una región específica del medio, la onda es **estacionaria.** Es el caso de las ondas que se producen en las cuerdas de una guitarra.



Pulso y tren de ondas:

- **Pulso:** es una perturbación individual que se propaga a través del medio. Se genera un pulso cuando la perturbación es instantánea. En un pulso solo unos pocos puntos del medio, e incluso uno solo, están en movimiento en un momento dado.
- **Tren de ondas:** es la propagación de una perturbación continua, todos los puntos del medio están en movimiento.

2. TIPOS DE ONDA

Las ondas existentes en la naturaleza se pueden clasificar en base a diferentes criterios:

2.1. SEGÚN EL TIPO DE ENERGÍA QUE SE PROPAGA.

A) Ondas mecánicas: Se propaga energía mecánica. También reciben el nombre de **ondas de materia** porque necesitan un medio material elástico. Ejemplos de ondas mecánicas son las ondas en cuerdas, en el agua y el **sonido**, que como veremos consiste en la propagación de variaciones de densidad del medio a través del cual se propaga. Si la energía mecánica que se propaga es originada por un oscilador armónico, las ondas reciben el nombre de **armónicas.** En este tipo de ondas, las partículas del medio, aunque no se desplacen con la onda, se mueven con un m.a.s. Es decir, oscilan alrededor de un punto fijo.

Para que se origine una onda mecánica es necesario:

1. Una fuente o agente que produzca energía mecánica.

2. Un medio material que se pueda perturbar.
3. Alguna característica común a las partículas del medio que permita una interacción entre ellas. Las características que permiten la propagación de una onda material son:
    - La fuerza recuperadora de tipo elástico que mantiene unidas a las moléculas.
    - La masa inerte.

B) Ondas electromagnéticas: Se propaga energía electromagnética producida por oscilaciones de cargas eléctricas aceleradas. No necesitan de un medio material para su propagación. Son ejemplos de ondas electromagnéticas, las ondas de radio, los rayos X, la luz…

2.2. SEGÚN EL NÚMERO DE DIMENSIONES EN QUE SE PROPAGA LA ENERGÍA.

A) Ondas unidimensionales. La energía se propaga en una sola dirección, como es el caso de la transmisión de una onda en una cuerda.

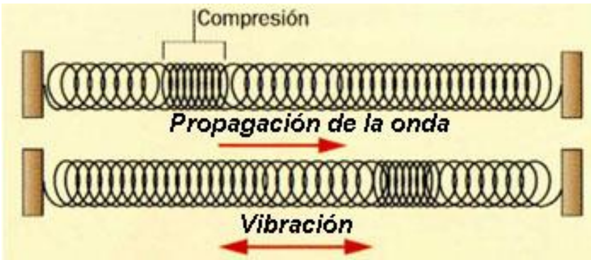
B) Ondas bidimiensionales: La energía se propaga en un plano. Por ejemplo, las ondas de agua en la superficie de un estanque.

C) Ondas tridimensionales: La energía se propaga en las tres direcciones. Un ejemplo particularmente interesante es el de las ondas denominadas esféricas, que se transmiten en un medio isótropo (aquel cuyas propiedades son idénticas en todas las direcciones). Sería de un modo aproximado, el caso del sonido, la luz y las radiaciones electromagnéticas en general.

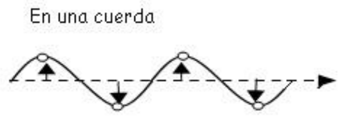
2.3. SEGÚN LA COINCIDENCIA O NO ENTRE LA DIRECCIÓN DE OSCILACIÓN DE LA PERTURBACIÓN Y LA DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA.

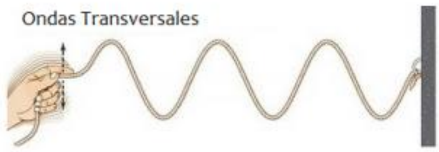
Una onda lleva asociados dos movimientos:

1. El movimiento de propagación o avance de la onda.
2. El movimiento de las partículas del medio que transmiten la perturbación.



A) Ondas longitudinales: Cuando la dirección de vibración de las partículas del medio coincide con la dirección de avance de la onda. Una onda longitudinal es una sucesión de contracciones y dilataciones del medio. Estas ondas reciben también el nombre de **ondas de presión.** Ejemplos de ondas longitudinales son el sonido, o la onda que se propaga a lo largo de un muelle.





B) Ondas transversales: Cuando la onda se propaga perpendicularmente a la dirección en que vibran las partículas. Son ondas transversales las que se propagan por una cuerda y por supuesto, las ondas electromagnéticas, en las que la propiedad perturbada es el campo eléctrico y el magnético.

3. PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS

Para que una onda mecánica se propague, el medio ha de cumplir dos requisitos: debe tener elasticidad e inercia.

- La **elasticidad** del medio da lugar a la aparición de fuerzas restauradoras cuando una porción del mismo es apartada de su posición de equilibrio.
- La **inercia** del medio es la que en última instancia explica el tipo de movimiento debido a la perturbación.

Ambas propiedades son las que determinan finalmente la velocidad a la que se propaga la onda.

Veamos el caso sencillo de la propagación de un pulso en una cuerda:

Si se fija uno de los extremos de una cuerda larga a la pared y se genera un pulso en el otro extremo mediante una única y rápida oscilación, dicho pulso se propaga a lo largo de la cuerda. Se puede determinar la velocidad de propagación del pulso, midiendo el tiempo que tarda el pulso en recorrer la longitud de la cuerda.

Si se mide dicha velocidad con la cuerda en diferentes estados de tensión, se ve que dicha velocidad es mayor cuanto más tensa esté la cuerda. Si se utiliza una cuerda más pesada, verás que la propagación es menor.

En general, está comprobado que la velocidad de propagación de una onda en un medio puede expresarse como: $v = \sqrt{\frac{propiedad\ elástica}{propiedad\ inercial}}$.

Así, la velocidad de propagación de un pulso en una cuerda viene dada por: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, donde T es la tensión de la cuerda y μ, la densidad lineal de masa, es decir, la masa por unidad de longitud de la cuerda (propiedad inercial).

4. ONDAS ARMÓNICAS

Se producen ondas armónicas o sinusoidales cuando la partícula que origina la onda (o centro emisor) vibra con un movimiento armónico simple[1]. El estado de vibración de una partícula cualquiera del medio (que se moverá con m.a.s.), depende de la posición de la partícula y del instante de tiempo en consideración. Rara vez encontramos en la naturaleza ondas perfectamente armónicas. A pesar de ello, su estudio es de gran utilidad, pues muchas de las ondas ordinarias pueden considerarse como una composición de diversas ondas armónicas. Fue **Fourier** quien introdujo la representación de una función cualquiera en forma de una serie de senos y cosenos, método conocido como **análisis de Fourier**. Por este motivo, el estudio de las ondas armónicas, expresadas en forma de senos y cosenos, al ser consideradas como la base fundamental de ondas más complejas, adquiere tanta importancia.

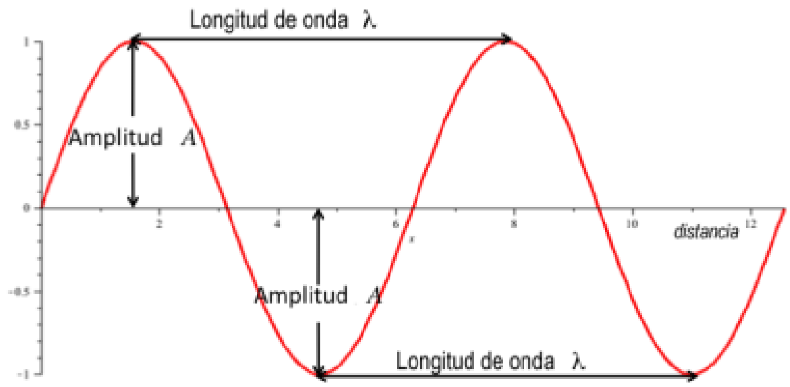
Las ondas armónicas tienen una serie de parámetros constantes que las caracterizan y que aparecen implícitamente en la ecuación o función de onda que las representa.

4.1. Magnitudes características de las ondas armónicas.

Periodo, T: Es el tiempo que tarda en dar una oscilación completa la partícula que origina el movimiento ondulatorio. Es equivalente al tiempo que transcurre entre dos ondas consecutivas en un punto fijo del espacio o al tiempo que tarda un punto cualquiera del medio en repetir un determinado estado de oscilación. Se mide en segundos.

Frecuencia, υ o f: Es el número de veces que un determinado punto del medio repite cierto estado de oscilación por unidad de tiempo. Corresponde al número de oscilaciones que realiza en un segundo la

[1] De todos los movimientos vibratorios que tienen lugar en la naturaleza, los más importantes son los armónicos simples. Se llaman así porque se pueden expresar mediante funciones armónicas, como son el seno y el coseno . La ecuación general de un movimiento armónico simple es $X=A\text{sen}(\omega t+\varphi)$ si el movimiento es en la dirección horizontal.
Los movimientos armónicos simples son característicos de los cuerpos elásticos y son producidos por fuerzas que son en todo momento proporcionales y de sentido contrario al desplazamiento de la partícula con respecto a la posición de equilibrio. Este tipo de fuerzas reciben el nombre de fuerzas recuperadoras y su expresión matemática es la conocida **ley de Hooke.**



partícula que origina el movimiento ondulatorio. Se mide en ciclos por segundo (s^{-1}) o hertzios. El periodo y la frecuencia son inversos.

Longitud de onda, λ: Es la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en idéntico estado de oscilación (distancia entre dos puntos consecutivos que están en fase. Corresponde a la distancia que ha avanzado la onda en un periodo. Se mide en metros en el S.I.

Elongación, y: Es la posición en cualquier instante, respecto a la posición de equilibrio, de las partículas que oscilan. El valor de la elongación de una partícula cualquiera del medio viene dado por la ecuación de la onda y(x,t). Se mide en metros en el S.I.

Amplitud: Es la máxima elongación con la que vibran las partículas del medio. Es decir, el máximo desplazamiento, medido desde la posición de equilibrio, que experimentan las partículas del medio. Solo depende de la cantidad de energía que propague la onda. Se mide en metros en el S.I.

Número de onda, k: Se define como el número de longitudes de onda en una distancia de 2π. $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Se mide en rad/m o m^{-1}.

Velocidad de propagación de la onda o velocidad de fase: Las ondas viajan con una velocidad específica, la cual depende de dos propiedades del medio: elasticidad y rigidez. Si el medio es homogéneo e isótropo, la velocidad de propagación es la misma en todas las direcciones. Entre la velocidad de fase, la longitud de onda y el periodo o frecuencia existe la siguiente relación: $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$.

Igualmente, como $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y λ=vT → $k = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$.

Es decir, el número de ondas resulta ser la relación entre la frecuencia angular y la velocidad de propagación de la onda. La frecuencia angular se mide en rad/s y recibe también el nombre de pulsación.

En el campo de la espectroscopía, el número de ondas se define como el número de longitudes de onda por unidad de longitud, es decir k=1/λ y se nombra también como frecuencia reducida.

En una onda también interviene la velocidad de oscilación de las partículas del medio a través del cual se propaga la onda. Esta velocidad depende de el espacio que recorre cada partícula del medio, en cada instante de tiempo, o sea de su elongación, por unidad de tiempo. La obtendremos derivando con respecto al tiempo la elongación: $v = \frac{dy(x,t)}{dt}$.

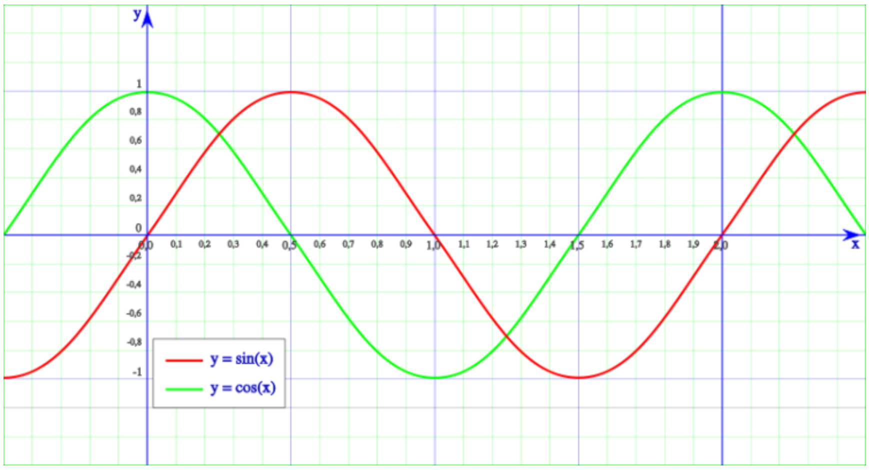
Fase, (ωt+φ): Indica el estado de oscilación, o fase del movimiento, en cualquier instante de cualquier partícula del medio. La fase permite calcular la elongación en cualquier instante. La fase inicial, o constante de fase, φ, indica el estado de vibración en el instante t=0 de la partícula que oscila y da origen al movimiento ondulatorio.

4.2. Ecuación de una onda armónica unidimensional

La ecuación de onda es la expresión matemática que permite obtener la elongación o estado de vibración de una partícula cualquiera del medio en cualquier instante t.

Consideremos una onda armónica, que se propaga hacia la derecha a lo largo del eje X. La oscilación de las partículas del medio tiene lugar en la dirección Y. La elongación dependerá del punto del medio que consideremos y el instante de tiempo. Podemos escribir la ecuación de una onda de estas características como:

$$y(x,t) = Asen(kx - \omega t + \varphi)$$



Podemos utilizar también la función coseno, la elección de una u otra función se hace en función del estado inicial de la perturbación.

Normalmente se elige la función coseno, cuando en t=0, la partícula situada en x=0, presenta un desplazamiento máximo, es decir y(0,0)=A. A=Acosφ, por lo que φ=0.

Por el contrario se elige la función seno, cuando en el instante inicial, la partícula que origina el movimiento está en la posición de equilibrio. y(0,0)=0. Por lo tanto 0=Asenφ, por lo tanto φ=0.

Así:

$y(x,t) = Acos(kx - \omega t)$, corresponde a una onda que viaja en la dirección del eje X, hacia la derecha y el centro emisor estaba en el estado de máxima elongación en el instante inicial. Si ponemos coseno, la fase inicial es nula.

$y(x,t) = Asen(kx - \omega t)$, corresponde a una onda que viaja hacia la derecha en la dirección del eje X y el centro emisor se encontraba en la posición de equilibrio en t=0. Si ponemos seno, la fase inicial es nula.

Si la onda viaja hacia la izquierda, la ecuación queda: $y(x,y) = Acos/sen(\omega t + kx)$ dependiendo de las condiciones iniciales.

Es muy probable que encuentres la ecuación de la onda armónica escrita de diversas formas. Puedes encontrar: $y(x,t) = Asen(\omega t \pm kx)$ o bien $y(x,t) = Asen(kx \pm \omega t)$[2], o también con la función coseno: $y(x,t) = Acos(\omega t \pm kx)$ o $y(x,t) = Acos(kx \pm \omega t)$[3].

Todas las ecuaciones que hemos puesto hasta aquí, son válidas si el centro emisor en t=0, está en el estado de máxima elongación (coseno), o en la posición de equilibrio (seno). Esto no tiene que ser así necesariamente. Si ocurre que en centro emisor en t=0, está en un estado intermedio de oscilación, entonces la fase inicial no se anula, por lo que la ecuación se puede expresar de forma general como:

$$y(x,t) = Asen/\cos(\omega t \pm kx + \varphi)$$

[2] Como sen(a+b)=sen(b+a), y por otra parte, sen(a-b)=sen(b-a$\pm\pi$), podemos decir que las ecuaciones con el signo menos entre la parte espacial y temporal representan a una onda armónica que se desplaza hacia la derecha, mientras que las ecuaciones similares con signo positivo representan una onda que se desplaza hacia la izquierda.

[3] Como cos(a-b)=cos(b-a), las ecuaciones con el signo menos representan una onda armónica que se desplaza hacia la derecha y con el signo más hacia la izquierda.

donde φ es la constante de fase cuyo valor se determina a partir de las condiciones iniciales y tomará valores diferentes según que hayamos elegido seno o coseno para escribir la ecuación de onda.

Teniendo en cuenta que $\omega = \frac{2\pi}{T}$ y $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$, también puede variar la expresión de la ecuación de onda.

Serían equivalentes: $y(x,t) = Asen(\omega t \pm kx + \varphi) = Asen2\pi\left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda} + \varphi\right) = Asen\omega\left(t \pm \frac{x}{v} + \varphi\right) \ldots$

IMPORTANTE:

- La ecuación de una onda permite calcular la elongación o estado de vibración de cualquier punto del medio en cualquier instante.
- Esta elongación depende de dos variables, por eso recibe el nombre de función de onda.
- Si en la ecuación se fija el valor de x, la ecuación de la onda nos da el valor de la elongación de una partícula concreta del medio en cualquier instante.
- Si se fija el valor de t, la ecuación de la onda representa la forma de la onda en cualquier punto en un instante determinado.
- En el movimiento ondulatorio no hay que confundir la velocidad de propagación o velocidad de fase, de avance de la onda, con la velocidad transversal de oscilación de las partículas: La velocidad de fase es $v = \lambda/T$ y la de vibración transversal de las partículas se obtiene derivando la ecuación de onda respecto de t: $v = \frac{dy}{dt}$

5. PROPIEDADES PERIÓDICAS DE LA FUNCIÓN DE ONDA ARMÓNICA

La ecuación de una onda armónica es **doblemente periódica,** respecto del **tiempo**, t, y respecto de la **posición,** x.

5.1. Una onda armónica es periódica en el tiempo con un periodo T.

Esto quiere decir que la elongación de una partícula determinada x toma el mismo valor en los tiempos t, t+T, t+2T, etc.

Comprobemos:

a) Elongación de la partícula para t: $y(t,x) = Acos(\omega t - kx)$
b) Elongación de la misma partícula para t´=t+nT:

$$y(t+nT,x) = Acos(\omega(t+nT) - kx) = Acos(\omega t + \omega nT - kx) = Acos(\omega t + 2\pi n - kx) =$$

$$Acos[(\omega t - kx) + 2\pi n] = Acos(\omega t - kx) = y(t,x)$$

5.2. Una onda armónica es periódica en el espacio, con un periodo λ.

Esto quiere decir que, en un instante dado t, coincide el estado de vibración en las posiciones x, x+λ, x+2λetc.

a) Estado de vibración en cualquier instante de la partícula en la posición x: : $y(t,x) = Acos(\omega t - kx)$.
b) Estado de vibración de la partícula en cualquier instante de la partícula x+λn:

$$y(t,x+n\lambda) = Acos(\omega t - k(x+n\lambda)) = Acos(\omega t - kx - kn\lambda) = Acos(\omega t - kx - 2\pi n) =$$

$$Acos[(\omega t - kx) - 2\pi n] = Acos(\omega t - kx) = y(t,x)$$

Por tanto el estado de vibración de las partículas x, x$\pm\lambda$, x$\pm 2\lambda$, ...

Como consecuencia de la doble periodicidad de la onda:

- Todos los puntos del medio que distan entre sí $n\lambda$ (un número entero de longitudes de onda, están en fase), es decir, tienen el mismo estado de vibración.
- Todos los puntos que equidistan del centro emisor están en fase entre sí. Esto nos permite definir lo que se conoce como el **frente de onda, el lugar geométrico de todos los puntos de la onda que en un instante dado están en fase.**
- Según sea el frente de onda, las ondas se clasifican en:
  1. Ondas planas si el frente de onda es una superficie plana.
  2. Ondas circulares si los frentes de ondas son circunferencias concéntricas. Se forman en ondas bidimensionales.
  3. Ondas esféricas si los frentes de onda son superficies esféricas cuando la onda es tridimensional.
  4. Si el medio es homogéneo e isótropo, la dirección de propagación es siempre perpendicular al frente de onda. Cada dirección de propagación recibe el nombre de **rayo.**

6.ESTUDIO CUALITATIVO DE ALGUNAS PROPIEDADES DE LAS ONDAS

Las ondas comparten algunas propiedades con el movimiento de las partículas, como son la **reflexión** y la **refracción**. Existen otras propiedades típicamente ondulatorias que no se dan en el movimiento de las partículas, como la **difracción,** la **interferencia** y la **polarización.**

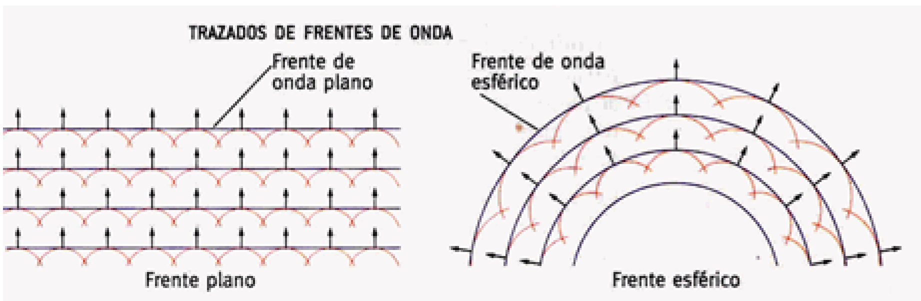
Algunos de estos fenómenos, como la reflexión y la difracción tienen una explicación sencilla utilizando un método geométrico que propuso en 1678 el científico holandés Christian Huygens. Esta construcción es válida para cualquier tipo de onda y permite además explicar, como se pasa de un frente de ondas al siguiente y, por tanto, como se propaga la energía a través de un medio.

6.1. Principio de Huygens

En su Tratado sobre la luz, Huygens expone un sencillo modelo de propagación de ondas que permite explicar los fenómenos ondulatorios.

Ya definimos en el punto anterior el **frente de onda** como el lugar geométrico de todos los puntos de la onda que están en fase (tienen el mismo estado de oscilación). Huygens partía de la suposición básica de que un foco puntual emite ondas esféricas en un medio isótropo. A partir de esta suposición, Huygens propone lo siguiente:

- Todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se comporta como un foco emisor de ondas secundarias que se propagan en la dirección de la perturbación.
- La superficie tangente (envolvente) a todas las ondas secundarias en un instante dado constituye el nuevo frente de ondas.



Los frentes de onda esférico cuyo foco emisor está a mucha distancia del observador pueden considerarse planos cuando llegan a dicho observador. En este caso los rayos son líneas rectas paralelas.

Al observar la imagen podemos explicar la propagación de ondas planas y esféricas fácilmente a partir del principio de Huygens.

6.2. Reflexión y refracción de ondas

Cuando una onda que se propaga por un medio llega a la superficie de separación con otro medio distinto, parte de la onda se refleja y sigue propagándose por el mismo medio, mientras que la otra parte pasa a propagarse por el otro medio, donde al ser distinto, lo hará con otra velocidad. La primera fracción de la onda recibe el nombre de **onda reflejada**, y la segunda se denomina **onda refractada.**

Un ejemplo de lo anterior consistiría en hacer que se propague una onda por un muelle unido a otro distinto, aunque en este caso la dirección de propagación no se modifica.

En el enlace: https://youtu.be/ir8csHeRWyU puedes ver un ejemplo de onda reflejada en una cuerda.

Reflexión: https://youtu.be/U_XBnH6gZd8

La reflexión es un fenómeno propio de cualquier tipo de ondas y se define como el cambio de dirección dentro del mismo medio que experimenta la onda al incidir sobre una superficie de separación entre dos medios.

La reflexión de las ondas cumple las siguientes leyes conocidas como **leyes de Snell**:

- El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales.
- Los rayos incidente, reflejado y la normal están en el mismo plano.

El **rayo incidente** coincide con la dirección de propagación de la onda que llega a la superficie reflectora y es perpendicular al frente de onda.

El **rayo reflejado** es la dirección en la que se propaga la onda reflejada.

La **normal** es la línea perpendicular a la superficie que refleja en el punto de incidencia.

El **ángulo de incidencia (i)** es el ángulo formado por la normal y el ángulo incidente.

El **ángulo de reflexión** es el formado por la normal y el rayo reflejado.

Refracción: La refracción se produce cuando una onda llega a una superficie de separación entre dos medios distintos y la atraviesa pasando al segundo medio. Consiste en el cambio de dirección de la onda al pasar a un medio en el que se propaga a distinta velocidad.

En la refracción, los frentes de onda refractados se mueven en distinta dirección que los incidentes y se producen dos situaciones diferentes que dependen de la velocidad de propagación de los dos medios.

- Si $v_2 > v_1$, la dirección en que se propagan los frentes de onda refractados se aleja a la normal a la superficie de separación, es decir, el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia. (Fig.1)
- Si $v_2 < v_1$, la dirección en que se propagan los frentes de onda refractados se acerca a la normal a la superficie de separación, es decir, el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia. Fig.2

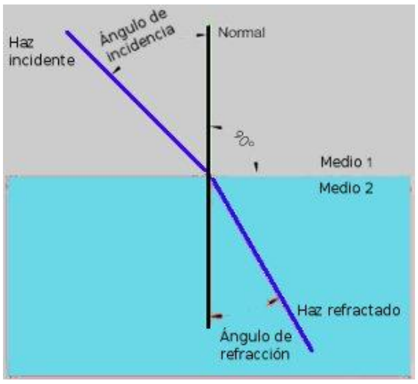


Fig.1

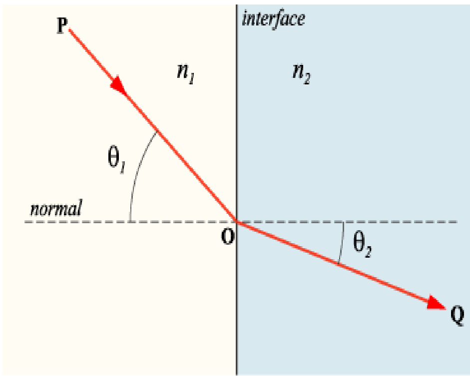


Fig.2

El método de Huygens daba una explicación a las leyes de la refracción enunciadas de un modo empírico por **Snell:**

- El rayo incidente, el rayo refractado y la normal están en el mismo plano.
- El cociente entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción es igual al cociente entre las velocidades de propagación de la onda en los medios 1 y 2.

$$\frac{\boldsymbol{sen\hat{\imath}}}{\boldsymbol{sen\hat{r}}} = \frac{\boldsymbol{v_1}}{\boldsymbol{v_2}} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{v_2 sen\hat{\imath} = v_1 sen\hat{r}}$$

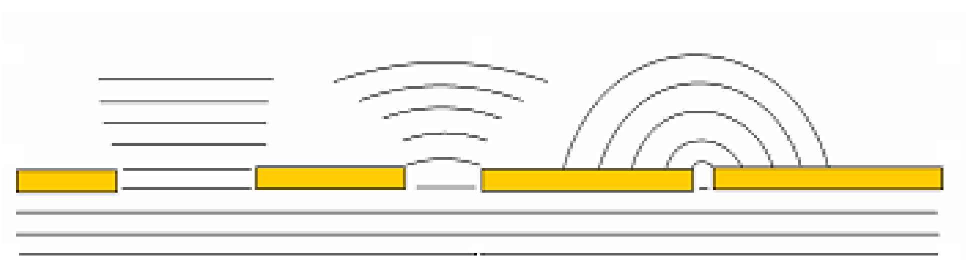
6.3. Difracción.

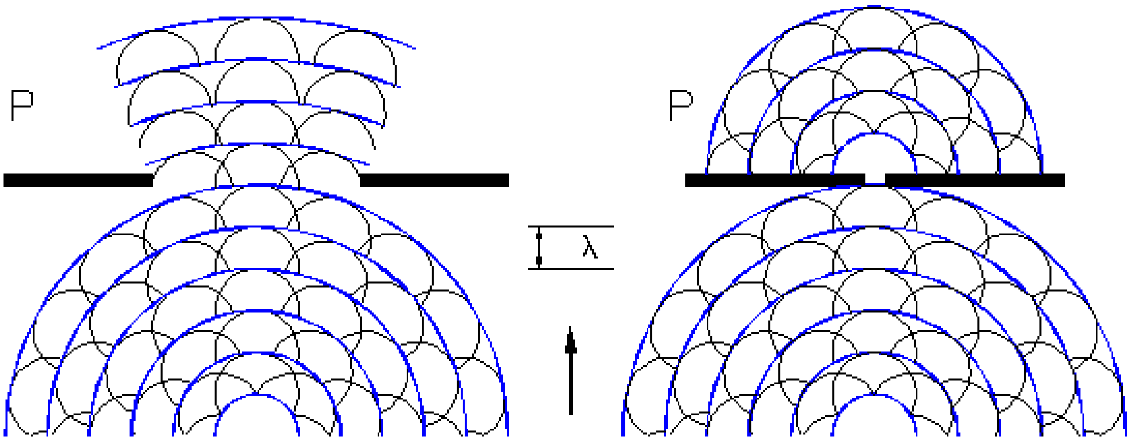
Otro de los logros del modelo de propagación de ondas de Huygens es que permitía explicar un fenómeno típicamente ondulatorio: la difracción, que no ocurre en el mundo de las partículas.

Se llama difracción al fenómeno por el cual una onda modifica su dirección de propagación al encontrarse con aberturas u obstáculos.

Los puntos del frente de ondas que no están tapados por el obstáculo se convierten en centros emisores de nuevos frentes de ondas (principio de Huygens), logrando que la onda bordee el obstáculo. Según sean las dimensiones de la abertura en relación con la longitud de onda de la onda incidente, los frentes de onda difractados tendrán una forma u otra. **Si la abertura es muy grande comparada con la longitud de onda, el fenómeno de difracción apenas es relevante. Adquiere importancia cuando las dimensiones de la abertura u obstáculo a sortear son comparables con la longitud de onda.**

En la imagen, puedes ver la importancia del tamaño de la abertura en el fenómeno de difracción.





Construcción de Huygens para la difracción.

6.4. Polarización.

La polarización es un fenómeno que **sólo se produce en ondas transversales**. Se llama plano de polarización al formado por la dirección de propagación y la dirección de vibración. Un ejemplo de onda polarizada sería la onda transversal que se propaga por una cuerda. En el siguiente enlace puedes ver en qué consiste la polarización. https://youtu.be/2L_quhham2Q

Recuerda que en las ondas transversales la dirección de propagación es perpendicular a la dirección de vibración de las partículas del medio. Si la dirección de propagación de las partículas es el eje X, las partículas deben vibrar en el plano YZ. Se dice que una onda está polarizada linealmente si la vibración se realiza siempre a lo largo de la misma recta del plano YZ. Se llama plano de polarización al plano formado por la dirección de propagación y la dirección de vibración. Un ejemplo de onda polarizada sería la inda transversal que se propaga por una cuerda.

La onda producida por un solo foco está normalmente polarizada. Las ondas transversales producidas por varios focos independientemente no están polarizadas.

Las ondas electromagnéticas, transversales, son producidas por las transiciones de los electrones de distintos átomos sin que exista entre ellas ninguna relación de fase, por eso las ondas electromagnéticas normales no están polarizadas.

6.5. Superposición de ondas: interferencia.

Hasta ahora hemos hablado de distintos fenómenos de propagación de una onda en distintos medios, pero, ¿qué ocurre cuando en un medio se propagan varias ondas a la vez? Como siempre en Física, haremos uso del principio de superposición.

La perturbación producida en un punto por dos o más ondas es igual a la suma algebraica de las perturbaciones producidas en dicho punto por cada una de las ondas consideradas de modo aislado.

Este principio es aplicable solo en los llamados medios lineales, es decir, aquellos en los que la fuerza restauradora que hace oscilar a las partículas del medio, cumple la ley de Hooke.

Veremos que dos ondas pueden llegar a combinar sus efectos en un punto de dos modos: reforzándose, en cuyo caso de **interferencia constructiva en el punto,** o anulándose, en cuyo caso hablaremos de **interferencia destructiva.**

El caso más interesante es cuando las ondas que interfieren son **coherentes**, es decir, cuando tienen las mismas características: misma amplitud, frecuencia, longitud de onda y una diferencia de fase constante.

Las ondas que proceden de focos distintos no son coherentes. En el caso de la luz, por ejemplo, para conseguir ondas coherentes, se utiliza un haz de luz monocromática (con una longitud de onda fija), que ilumina una rendija en la que se produce una primera difracción, con lo que la luz puede alcanzar a otras dos rendijas que harán de focos emisores de las ondas que van a interferir.

Analizaremos el caso más sencillo de dos ondas armónicas coherentes que se encuentran viajando en un mismo medio y en la misma dirección. En este caso, podríamos escribir para cada onda:

$$y_1(x,t) = A\,cos(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = Acos(kx - \omega t)$$

Aplicando el principio de superposición, cuando dichas ondas coinciden en un punto x del medio, en un instante t, la perturbación en x será la suma algebraica de ambas perturbaciones. Por tanto:

$$y = y_1 + y_2 = A[cos(kx_1 - \omega t) + cos(kx_2 - \omega t)]$$[4]

Teniendo en cuenta que:

$$cosa + cosb = 2cos\left(\frac{a-b}{2}\right)cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \quad a = kx_1 - \omega t \;;\; b = kx_2 - \omega t,$$

la perturbación resultante en cualquier punto x vendrá dada por:

$$y_1 + y_2 = 2Acos\left(\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1\right) \cdot \cos\,(kx - \omega t)$$

La ecuación anterior corresponde a una onda viajera, armónica, con la misma frecuencia y longitud de onda que las ondas que se superponen pero con una amplitud $2Acos\left(\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1\right)$, variable, dependiendo de la diferencia de caminos recorridos por ambas ondas hasta el punto de referencia.

A. Interferencia constructiva: Habrá interferencia constructiva, y por lo tanto, la amplitud será máxima e igual a 2A, cuando $cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)\right)$ sea 1, es decir, cuando $\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)$ =nπ → $x_2 - x_1 = n\pi.$
Las ondas llegarán en fase en todos aquellos puntos en los que la diferencia entre las distancias a los focos es un número entero de longitudes de onda.

B. Interferencia destructiva. La interferencia será destructiva y por lo tanto la amplitud será nula cuando $cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)\right)$ =0. Lo anterior se cumple cuando $\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)$=(2n+1)$\frac{\pi}{2}$
Las ondas llegan en oposición de fase en todos aquellos puntos en los que la diferencia entre las distancias a los focos es un número impar de semilongitudes de onda.

En resumen:

[4] Cada onda ha recorrido una distancia x_1 y x_2, desde los focos de emisión respectivos, hasta el punto de interferencia.

- La interferencia es un fenómeno producido por el encuentro de dos o más ondas que partiendo del mismo foco o de focos distintos llegan simultáneamente a un mismo punto del medio en que se propagan.
- En el punto de encuentro la amplitud de la onda resultante de la interferencia, si las ondas son coherentes, puede valer desde cero (interferencia destructiva) hasta el doble de la amplitud de las ondas que interfieren (interferencia constructiva).
- Después del encuentro, es decir, rebasados los puntos de interferencia, la amplitud, la frecuencia y la velocidad de cada onda son las mismas que tendrían si no se hubieran encontrado.

7. TRANSMISIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE UN MEDIO

Cuando una onda avanza transporta energía en la dirección y sentido de avance de la onda.

- **¿Cuánta energía transporta la onda?**

Una onda armónica transmite la energía de un oscilador armónico. La energía mecánica del oscilador armónico viene dada por la expresión:

$$\frac{1}{2}KA^2 = \frac{1}{2}m\omega^2A^2 = \frac{1}{2}m4\pi^2f^2A^2 = 2m\pi^2f^2A^2$$

Por lo tanto, la energía que transporta una onda armónica es **proporcional al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado de la amplitud.**

- **¿Cómo influye la distancia en la transmisión de la energía?**

Si tenemos un foco puntual, esta energía se irradia en todas direcciones en forma de ondas esféricas a una velocidad v, si el medio es isótropo y homogéneo. Para estas ondas tridimensionales, la energía del foco se irá repartiendo sobre superficies concéntricas cada vez mayores cuyo centro es el foco emisor.

Al cabo de un tiempo t_1, la energía se habrá repartido entre las partículas que forman el frente de onda de radio $r_1=vt_1$. Igual ocurrirá con el frente de onda de radio $r_2=vt_2$ al cabo de un tiempo t_2. En ausencia de rozamiento, la energía mecánica de la onda permanece constante: $E_1=E_2$, donde E_1 es la energía que poseen las partículas situadas en una superficie esférica de radio r_1 y E_2 la energía de las partículas sobre una superficie de radio r_2.

Teniendo en cuenta la expresión obtenida para la energía transportada por la onda:

$$2m_1\pi^2f^2A_1^2 = 2m_2\pi^2f^2A_2^2$$

Siendo, m_1 la masa de las partículas del frente de ondas de radio r_1, y A_1 la amplitud de oscilación de dichas partículas y m_2 y A_2, las correspondientes masa y amplitud de las partículas del frente de radio r_2.

Si suponemos que el frente de onda tiene un espesor dr y que la densidad del medio es ρ, entonces:

$$m_1 = 4\pi r_1^2 dr\rho$$

$$m_2 = 4\pi r_2^2 dr\rho$$

Por lo tanto al igualar las energías: $r_1^2 A_1^2 = r_2^2 A_2^2$

La amplitud de una onda en un punto es inversamente proporcional a la distancia de ese punto al centro emisor. A medida que se aleja del centro emisor, las partículas oscilan con menor energía. Este fenómeno se denomina **atenuación** y tiene lugar solo en ondas bidimensionales y tridimensionales. Se debe a que la misma energía se reparte, en cada frente de onda, entre un número cada vez mayor de partículas. En los medios reales, la onda también se amortigua por pérdida de energía debido a rozamientos, viscosidad, poca elasticidad del medio, etc. En este caso se habla de **absorción.**

- **Intensidad de una onda:** Se llama intensidad de un movimiento ondulatorio en un punto a la cantidad de energía que atraviesa perpendicularmente a la unidad de superficie colocada en ese punto en la unidad de tiempo. Se mide en W/m^2 (watios/m^2).

$$I = \frac{E}{St} = \frac{P}{S}$$

Calculemos la variación de intensidad que se produce a medida que avanza el frente de ondas. Teniendo en cuenta todas las expresiones anteriores:

$I_1 = \frac{E_1}{S_1 t} = \frac{8\pi r_1^2 \rho dr \pi^2 f^2 A_1^2}{4\pi r_1^2 t} = \frac{2\rho\pi^2 f^2 A_1^2 dr}{t}$ es la intensidad en el frente de ondas de radio r_1

$I_2 = \frac{E_2}{S_2 t} = \frac{8\pi r_2^2 \rho dr \pi^2 f^2 A_2^2}{4\pi r_2^2 t} = \frac{2\rho\pi^2 f^2 A_2^2 dr}{t}$ corresponde a la intensidad en el frente de radio r_2

Dividiendo miembro a miembro: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2}$ y teniendo en cuenta que $r_1^2 A_1^2 = r_2^2 A_2^2 \rightarrow \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$ podemos decir:

- La intensidad de una onda es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco.
- La intensidad de una onda es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.