TEMA-18

ONDAS EN MEDIOS ELÁSTICOS

ENERGÍA QUE TRANSPORTAN

FENÓMENOS CARACTERÍSTICOS

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA SU ESTUDIO

EL SONIDO COMO EJEMPLO DE ONDAS LONGITUDINALES

CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

Bibliografía

FISICA **Oxford University Press España, S.A .2000**
J. Barrio Gómez de Agüero-Editorial Reverté

Apuntes

CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

INTRODUCCIÓN

Cuando se perturba un sistema perdiendo su posición de equilibrio estable, se producen oscilaciones. La característica más fácilmente reconocible del movimiento oscilatorio es que se repite a si mismo, es decir es periódico.
Hoy, es indispensable, para comprender la física de nuestros días, la idea de onda.
Una onda representa el movimiento de propagación de una perturbación de un punto a otro sin que exista transporte neto de materia.
El sonido, la luz, la radiación térmica, los rayos γ, los rayos X etc, son unos cuantos ejemplos de la Física de nuestros días, que no podrían ser descritos y estudiados sin conocer y expresar la idea de onda.
Desde 1.925, se utilizan las ondas para describir el comportamiento de las partículas que constituyen la materia. En 1.926 ERWIN-SCHRÓEDINGER presentó la ecuación de onda, mediante la cual se establece la relación entre la energía de un electrón y sus propiedades ondulatorias.

$$\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\,\psi = 0$$

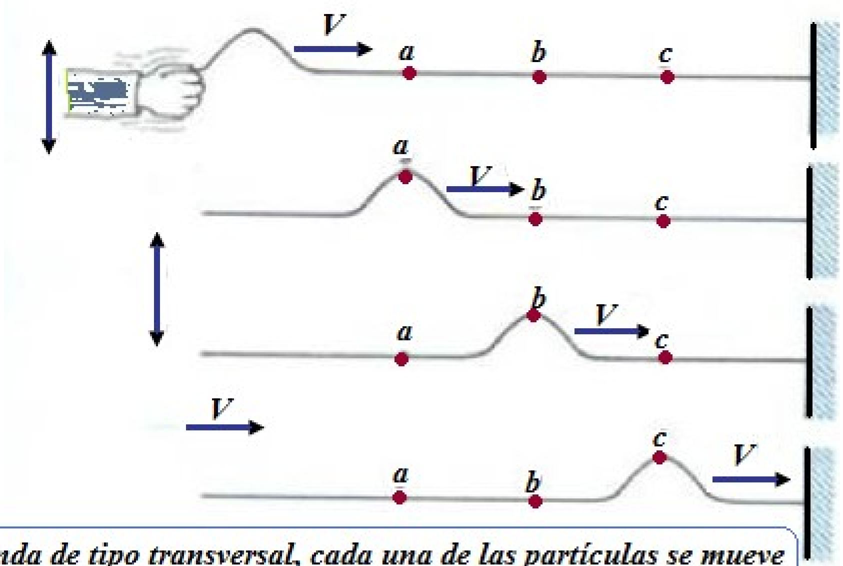
LOUIS DE BROGLIE avanzó la hipótesis complementaria de que la materia tenía propiedades de onda. Postula, que toda partícula en movimiento lleva asociada una radiación cuya longitud de onda es $\lambda = \frac{h}{mv}$
Existen varios tipos de ondas, y en este tema vamos a estudiar las ondas elásticas y electromagnéticas, o sea ondas que se propagan en un medio material, que se propagan debido a las propiedades elásticas del medio, o como las electromagnéticas, que son ondas que se propagan en el vacío.
Los aspectos más importantes de las ondas, son su velocidad de propagación y las modificaciones que sufren cuando cambian las propiedades físicas del medio en el cual se propagan, cuando se les interponen diferentes clases de obstáculos, o cuando varias ondas coinciden en la misma región del espacio.
Aunque los fenómenos ondulatorios son generales, nos limitaremos a considerar el caso de las **ondas senoidales**, es decir, aquellas ondas, que al propagarse producen a cada una de las partículas del medio un movimiento armónico. Quizás parezca esto un caso excesivamente particular, pero no lo es si tenemos en cuenta que cualquier perturbación, cualquier función puede expresarse como superposición de funciones armónicas senoidales. Esta afirmación no es otra cosa que el **TEOREMA DE FOURIER** que nos asegura que combinando ondas senoidales, estamos en condiciones, al menos teóricamente, de describir cualquier tipo de onda.
Luego cualquier movimiento periódico puede expresarse como una combinación de n movimientos armónicos. Siendo la serie de Fourier:

$$\mathbf{f(t)} = \frac{1}{2}\mathbf{a_o + a_1 coswt + a_2 coswt + a_3 coswt + ... + b_1 senwt + b_2 senwt + b_3 senwt + ... +}$$

Todo movimiento periódico puede considerarse como suma de movimientos vibratorios armónicos de frecuencias múltiples de la del movimiento periódico considerado, frecuencia fundamental.
Definíamos que un cuerpo realiza un **movimiento periódico** cuando a intervalos regulares de tiempo, llamados **periodos** todas las variables, de su movimiento, posición, velocidad y aceleración toman el mismo valor.
Entre los movimientos periódicos reciben el nombre de movimientos oscilatorios, aquellos cuyo espacio o distancia al punto de equilibrio pasan por un valor máximo y un valor mínimo

MOVIMIENTO ONDULATORIO

Si sobre las moléculas de un medio elástico, aire, agua, bronce etc, actúan fuerzas elásticas, de tal modo que si en una de ellas se origina una perturbación, ésta se transmite a las demás moléculas. Así si una partícula vibra arrastra consigo a las moléculas próximas obligándolas a vibrar, y éstas obligan a las siguientes y así sucesivamente.
Sujetemos un extremo de una cuerda en una pared y tomemos el otro extremo de la cuerda con la mano y una vez tensada perpendicularmente a la pared, le damos una sacudida. A lo largo de la cuerda se va propagando una oscilación, una ondulación. En un medio, la cuerda, se ha producido una perturbación, sacudida, y ésta se transmite, se propaga, avanzando a lo largo de la cuerda.

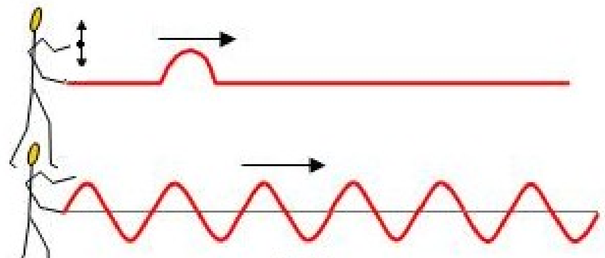


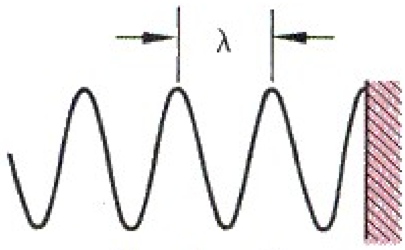
En una onda de tipo transversal, cada una de las partículas se mueve perpendicular a la dirección de propagción de la onda

Cuando dejamos caer una piedra en una superficie en reposo de un estanque, la perturbación producida se transmite por la superficie del estanque, se forma una pequeña ola que avanza con la misma velocidad en todas las direcciones. El movimiento individual de cada una de las partículas, constituye una vibración, y el conjunto de todas ellas, vibrando simultáneamente, constituye el movimiento ondulatorio.
Movimiento ondulatorio.-Es la propagación de un movimiento vibratorio en el seno de un medio elástico a través de sus partículas, las cuales vibrando y obligando a vibrar a las partículas próximas, transmiten la vibración de un centro emisora grandes distancias.
Cada molécula o partícula del medio oscila alrededor de su posición de equilibrio y la perturbación se propagará hasta el límite del sistema, a no ser que se disipe a causa del rozamiento. Las partículas del medio material en que se transmite la perturbación, se ponen en movimiento cuando pasa por ellas la perturbación, pero no viajan por el medio.
En el caso de la cuerda de estudio, no son los elementos de masa de la cuerda los que se transportan sino la perturbación en la forma producida por la sacudida en un extremo. Los elementos de masa de la cuerda, de hecho se mueven en dirección perpendicular a la cuerda, y por tanto perpendiculares a la dirección de propagación del pulso.
Otro ejemplo lo tenemos cuando un corcho flota en la superficie de un estanque en reposo, y se ve afectado por la perturbación producida por una piedra que se ha dejado caer sobre el estanque, al llegar la perturbación al

punto donde está situado el corcho, éste se desplaza verticalmente pero no lo hace horizontalmente, como lo hace la perturbación.
Debemos distinguir dos movimientos diferentes: uno es el de las partículas del medio, partículas de la cuerda que suben y bajan, moléculas de agua que se elevan sobre la superficie en equilibrio del estanque, y el otro es el de la perturbación que avanza.

ONDAS.-Se denomina onda a toda perturbación que se propaga.
Decíamos que una onda representa el movimiento de propagación de una perturbación de un punto a otro sin que exista transporte de energía.
Esta perturbación que se propaga en la cuerda, se denomina onda o pulso, y puede propagarse más de una, es decir cuando se está propagando un pulso podemos producir otro y así sucesivamente. Al conjunto de pulsos que se propagan se denomina **tren de ondas.**


Pulsos que se propagan



Tren de ondas

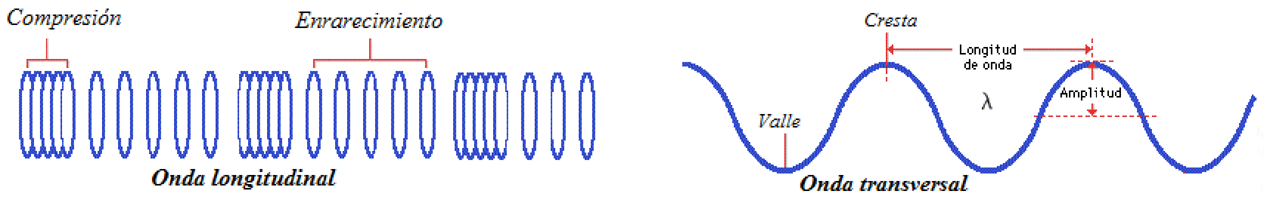
Los trenes de ondas pueden ser periódicos o no periódicos. Un tren de ondas es periódico si el tiempo transcurrido entre la producción de un pulso y el siguiente es siempre el mismo. A este tiempo se le denomina **periodo del tren de ondas.**
Atendiendo al medio de propagación, las ondas se clasifican en:
1.-**Ondas mecánicas**, que son aquellas que necesitan un medio material para transmitirse. Un ejemplo de ondas mecánicas es el sonido, que consiste en la propagación de variaciones de densidad a través de un medio sólido, líquido o gaseoso, pero que no se transmite a través del vacío.
2.-**Ondas electromagnéticas**, son aquellas que no requieren un medio material para su propagación y pueden transmitirse en el vacío. Son ejemplo las ondas de radio, las microondas, la luz visible etc.
¿Qué es realmente lo que se transmite en una onda? En una onda se propaga energía, así en las ondas mecánicas se transmite energía mecánica y en las ondas electromagnéticas, energía electromagnética producida por oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos.
Debemos recalcar que una onda a pesar de no ser un ente material, si es una entidad física real, pues transporta energía e interacciona con la materia.
De hecho, el mundo real se describe básicamente en función de los conceptos, materia y ondas, y de la interacción entre ambos.
Según la relación que exista entre la dirección de propagación y la dirección de vibración de cada partícula, o sea entre la dirección relativa de la perturbación y el avance de esa perturbación, las ondas pueden ser: a) **Longitudinales**
b) **Transversales**
Ondas longitudinales.-Son las ondas en las que las partículas vibran en la misma dirección de la propagación. Las ondas sonoras o la onda que se propaga a través de un muelle.
Ondas Transversales.-Son aquellas ondas en las que las partículas vibran perpendicularmente a la dirección de propagación. Las ondas que se propagan en una cuerda, la propiedad perturbada es la posición de las partículas de la cuerda, que oscilan en la dirección perpendicular a la de desplazamiento de la onda.

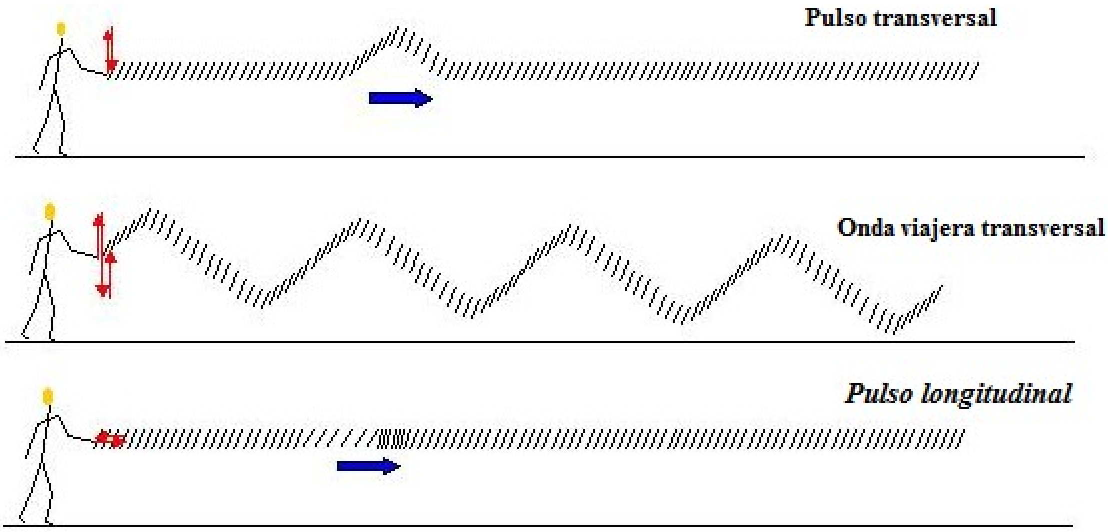
Las ondas transversales más importantes son las electromagnéticas, en las que la propiedad perturbada, es el campo eléctrico y el magnético.
Existen ondas, como las que se propagan en la superficie del agua, las olas, que no son estrictamente transversales. Las moléculas de agua de la superficie efectúan, al paso de la onda, movimientos casi circulares, es decir, hacia arriba y hacia abajo, transversales, pero también hacia delante y hacia atrás, longitudinales.
Según el número de dimensiones en que se propaga la onda, estas pueden ser:

Unidimensionales.-Si se propaga en una única dirección, como es el caso de la transmisión de una onda en una cuerda.

Bidimensionales.-Si se propaga en dos direcciones, como las ondas de agua de un estanque.

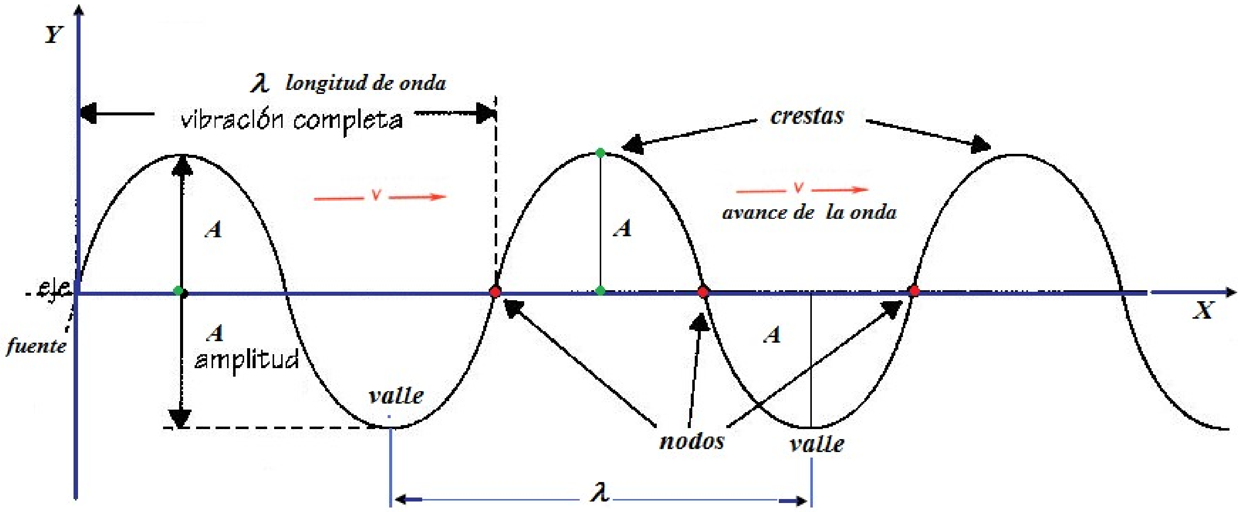
Tridimensionales.-Se propaga en todas las direcciones. Un ejemplo de estas ondas esféricas, que se transmiten en un medio isótropo, aquel cuyas propiedades son idénticas en todas las direcciones, es el sonido, la luz y las radiaciones electromagnéticas en general.





REPRESENTACIÓN DE UNA ONDA

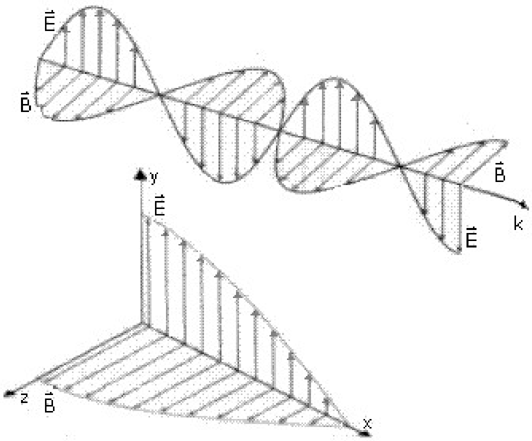
Una onda que se transmite por la superficie del agua o por una cuerda tensa se representa mediante variaciones de la posición de las partículas del medio. En estos casos, la representación de la onda responde fielmente a la percepción visual del fenómeno que se muestra en la figura:

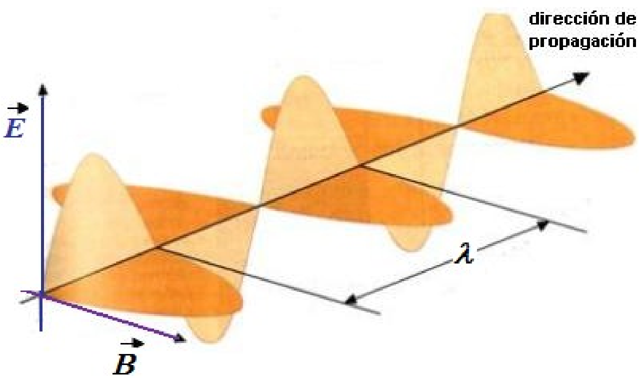


Sin embargo, en el caso de las ondas más comunes en la naturaleza no se percibe visualmente ningún tipo de ondulación. Sólo se aprecia el fenómeno ondulatorio cuando lo representamos gráficamente los cambios de la magnitud perturbada en función del tiempo

Cuando nos referimos a la transmisión del sonido por el aire, lo que en realidad representamos es la variación de la presión del aire, mediante compresiones y enrarecimientos, ya sea en función de la distancia al foco emisor o del tiempo. Cuando esa variación es periódica, la representación gráfica se asemeja a la de las ondas que se propagan en una cuerda.

Tratándose de algún tipo de radicación electromagnética, como la luz, cuando decimos que se propaga en forma de ondas, lo que queremos indicar es que un campo eléctrico y magnético varían de forma oscilatoria con el tiempo y la distancia. Al representar dichas variaciones, obtenemos esa representación que nos resulta tan familiar, pero que no tiene nada que ver con ningún movimiento de partículas del medio material, que, además, en el caso de la radiación electromagnética no tiene por qué existir.





Sin embargo, el hecho de que en los fenómenos comentados exista una magnitud que varía de forma similar con el tiempo o la distancia hace que el tratamiento matemático de todos ellos, aparentemente tan diversos, sea similar. Es por eso que el estudio del movimiento ondulatorio adquiere un papel tan relevante en la Física.

MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

Fase.- La fase de un punto vibrante es un instante dado, es su estado de movimiento, definido por la elongación, dirección, sentido y velocidad. Según ello diremos:

a) Dos puntos tiene **igual fase,** si se mueven en el mismo sentido, y sus elongaciones son iguales en valor y signo
b) Dos puntos tienen **fase opuesta** si sus elongaciones son iguales en valor, pero de signo opuesto.

El lugar geométrico de todos los puntos que en un instante determinado se encuentran en igualdad de fase se denomina superficie de onda o **frente de onda.**

Longitud de onda (λ) es la distancia que separa dos puntos consecutivos que tienen igual fase.

Periodo (T) es el tiempo que tarda la vibración que se propaga en recorrer un espacio igual a la longitud de onda.

Frecuencia (ν) es el número de ondas que se propagan en la unidad de tiempo, siendo $T = \frac{1}{\nu}$

PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS MECÁNICAS

Para que una onda mecánica se propague, el medio en el que se propaga debe cumplir dos condiciones: 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 del medio son las que determinan finalmente la velocidad a la que se propaga una onda.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS MECÁNICAS

Una propiedad general de las ondas es que su velocidad depende de las propiedades del medio y que es independiente del movimiento de la fuente relativo al medio. Por ejemplo, la velocidad de una onda en una cuerda depende solamente de las propiedades de la cuerda, la velocidad de una onda sonora producida por la bocina de un tren depende sólo de las propiedades del aire y no del movimiento del tren.

Cuando un pulso, o sea una onda solitaria, producida por una perturbación instantánea, transversal se propaga a lo largo de una cuerda tensa, su velocidad de propagación es:

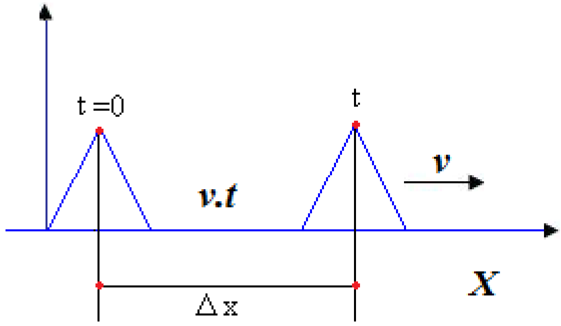
$$v = \sqrt{\frac{\textit{propiedad elástica}}{\textit{propiedad inercial}}} \qquad v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

T= tensión de la cuerda

μ= masa por unidad de longitud, densidad lineal

Depende de la tensión de la cuerda y de la densidad lineal la velocidad de propagación.

En las ondas longitudinales se producen condensaciones y enrarecimientos de la materia, lo que lleva consigo unas grandes variaciones de la densidad en el medio donde se propagan. Ondas longitudinales son las ondas del sonido, las emitidas por el tambor cuando golpeamos la membrana.



Teniendo en cuenta las características de los estados de agregación de la materia, se comprende fácilmente, que las ondas transversales sólo pueden propagarse en los medios sólidos, en cambio las ondas longitudinales pueden propagarse en cualquier medio. Así diremos:

Ondas longitudinales cualquier medio
Ondas transversales medio sólido

En los medios sólidos la velocidad de propagación de las ondas longitudinales viene dada por la expresión:

$v=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ Donde E = módulo de Young y ρ = densidad del medio

Siendo $E = \frac{F/S}{\Delta\ell/\ell}$ el módulo de Young representa la fuerza por unidad de sección necesaria para conseguir un alargamiento igual a la longitud inicial. Siendo las unidades N/m^2.

En el caso de los fluidos, las ondas longitudinales producen variaciones periódicas de presión que corresponden a las sucesivas condensaciones, $\Delta P>0$ y enrarecimientos, $\Delta P<0$ del medio y viene dada la velocidad de propagación por la expresión:

$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ Donde K =módulo de compresibilidad y ρ = densidad del fluido

$K = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V}$ El coeficiente de compresibilidad K representa la sobrepresión necesaria para conseguir una variación relativa de volumen igual a la unidad. Sus unidades son las de presión. En caso de gases $K = \gamma P$, siendo $\gamma = \frac{Cp}{Cv}$ el coeficiente adiabático. La relación entre los calores específicos a presión y volumen constante del gas, depende su valor del número de átomos de la molécula gaseosa.

$\gamma = 1,66$ para moléculas **monoatómicas**
$\gamma = 1,40$ para moléculas **diatómicas**
$\gamma = 1,33$ para moléculas **triatómicas**

La velocidad de las ondas longitudinales para gases nos queda: $v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$ $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$

$P = \frac{\rho RT}{M}$ gases ideales

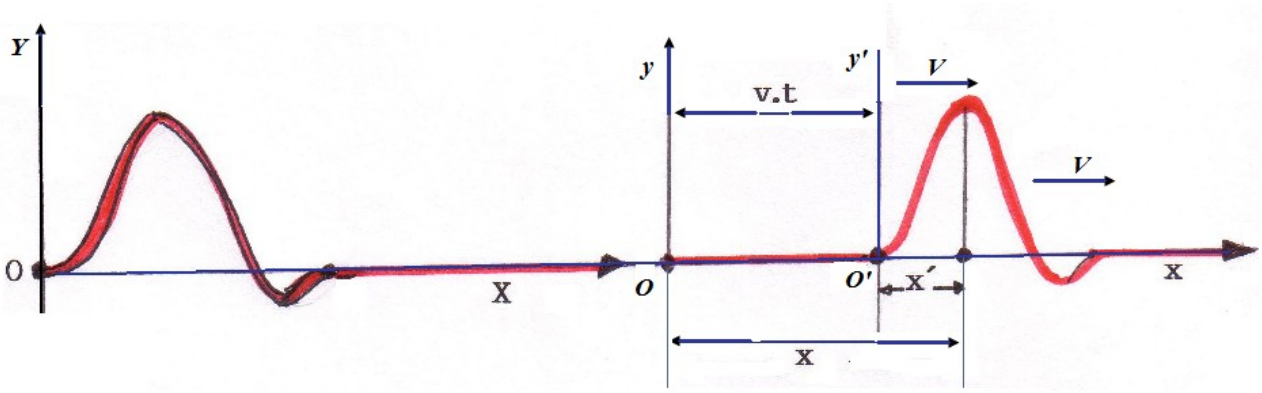
Diremos que la velocidad de propagación de un movimiento ondulatorio longitudinal en un gas es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta e independiente de la presión. Siendo γ = coeficiente adiabático

R = constante de los gases
T = temperatura absoluta
M = mas molecular

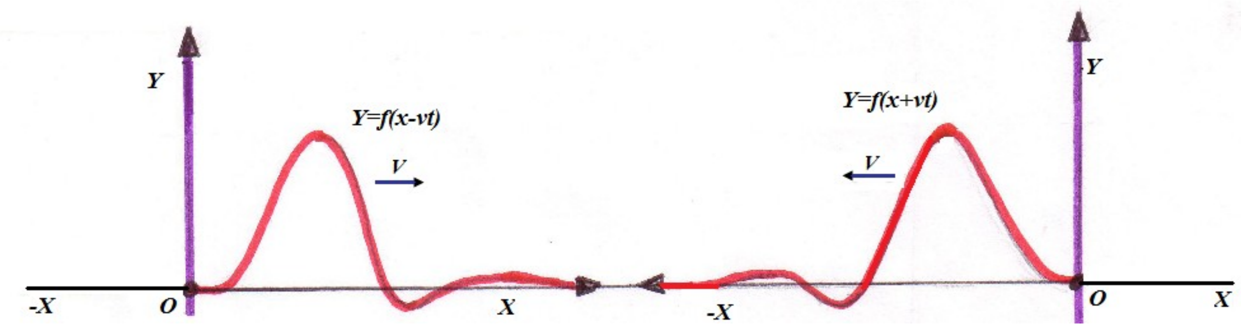
ECUACIÓN DE PROPAGACIÓN DE UNA ONDA MECÁNICA

Analizaremos ahora el movimiento de un pulso que se transmite por una cuerda. Trataremos de encontrar una expresión matemática que nos describa la propagación de dicho pulso.
Como se observa en la figura, la cuerda presenta una ondulación en una zona, mientras que el resto de la cuerda permanece recta. En consecuencia, los valores de Y dependen de los valores de X. Pero, además, la onda avanza, por lo que dichos valores de Y serán también función del tiempo. Con ello podemos decir:

La expresión matemática que representa la propagación de una onda es una función de la coordenada de la dirección de avance y del tiempo. Y = f(x, t) Dicha función se denomina función de onda.



Para tratar de determinar la forma en que aparecen relacionadas las variables (x, t) en la función de onda, analizaremos el movimiento de una onda que se mueva hacia la derecha, visto desde dos sistemas de referencia distintos: uno fijo, O, y otro, O´, que avanza con el pulso y con su misma velocidad.
Para el observador situado en el sistema O, los valores de Y son función de x, t. Sin embargo, para el observador que se mueve con el pulso, los valores de Y' sólo son función de x', pues en su sistema la onda permanece estática. Ahora bien en ambos casos se está describiendo la misma onda, por lo que: f(x,t)= f(x')
Como puede comprobarse en la figura, las coordenadas de ambos sistemas de referencia se relaciona del siguiente modo: Y = Y' y x´= x-vt
Así, la función del movimiento de una onda que avanza hacia la derecha es: Y =f(x-vt)
Por un razonamiento semejante, puede demostrarse que la función que describe una onda que se desplaza hacia la izquierda tiene esta otra forma Y =f(x+vt).
Resumiendo, podemos decir que: La función que representa un onda cualquiera que se desplaza en la dirección del eje x tiene la forma general: Y = f(x $\pm$ vt)
El signo es negativo cuando la onda se desplaza hacia la derecha, o sea en el signo positivo del eje x.
El signo es positivo cuando la onda se desplaza hacia la izquierda, o sea el signo negativo del eje x
En ambos casos, v es la velocidad de propagación de la onda.



ONDAS ARMÓNICAS

Existe un tipo muy importante de ondas que se denominan **ondas armónicas**, debido a que la función de onda que las describe es una función sinusoidal, (seno o coseno), de x (dirección de propagación) y t. La expresión de dichas ondas, como detallaremos a continuación, puede ser de dos tipos:

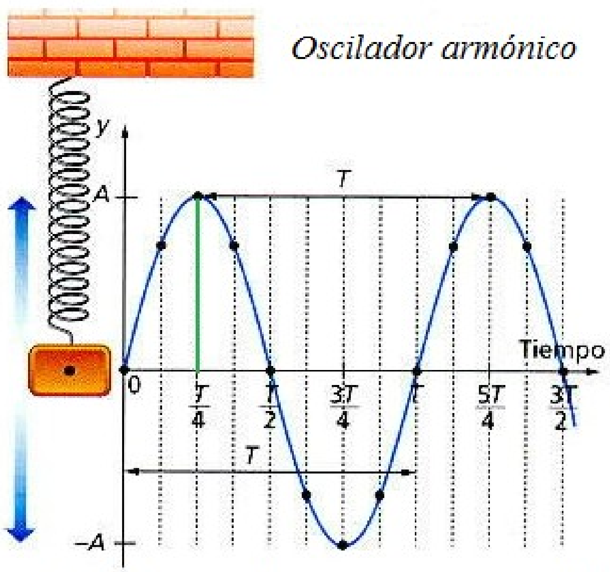
Y(x, t) = A sen k(x±vt)   **Y(x, t) =A cos k(x±vt)**

Donde A es la amplitud que caracteriza a la onda, k es un constante que se denomina número de onda, y v es la velocidad de propagación de la onda.

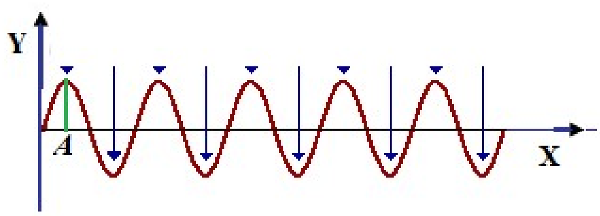
Su representación gráfica es la que nos muestra la figura, y que nos resulta familiar, pues se asemeja a la gráfica x-t de un oscilador armónico, si bien en esta ocasión se ha representado la amplitud frente a la dirección de propagación x para evidenciar que se trata de una onda. En cualquiera de los casos existe la siguiente relación clara entre un oscilador armónico y una onda armónica:

La perturbación que se propaga en forma de onda armónica es producida por un oscilador armónico.

Un ejemplo de onda mecánica armónica es la que se transmitiría a través de una cuerda unida a un oscilador armónico.



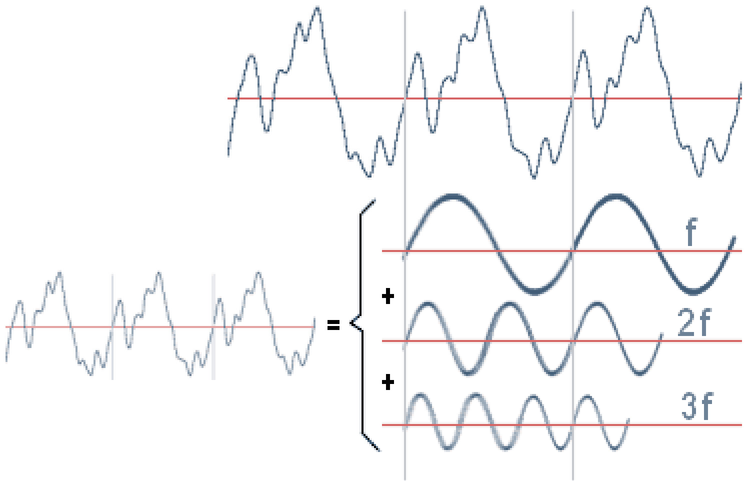
Oscilaciones de un resorte suspendido



Onda armónica que responde a la ecuación

Y(x,t) =A senK(x-vt)

Rara vez encontramos 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, como puede verse en la figura. Hecho que fue puesto de manifiesto en 1.822 por J .Fourier.



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.

PARÁMETROS DE UNA ONDA ARMÓNICA

Dado el carácter periódico que presenta una onda armónica, podemos definir una serie de parámetros que permanecen constantes durante su propagación.

Longitud de onda (λ).-Es la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en idéntico estado de perturbación, o sea entre dos puntos consecutivos en idéntica fase.

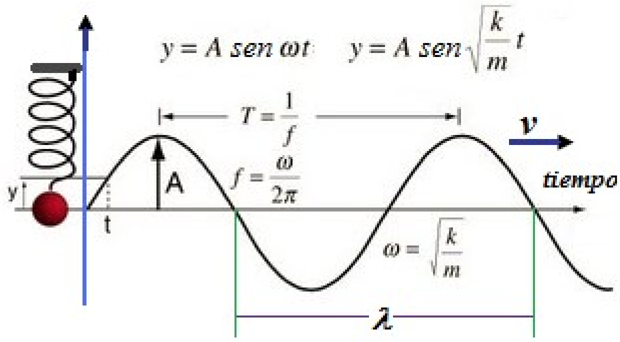
Periodo (T).-Es el tiempo que tarda un punto cualquiera en repetir un determinado estado de perturbación u oscilación.

Frecuencia (f).-Es el número de veces que un determinado punto repite cierto estado de perturbación u oscilación por unidad de tiempo. La frecuencia es la inversa del período $f = \frac{1}{T}$

Velocidad de propagación (v).-Teniendo en cuenta que es el desplazamiento efectuado por la onda en unidad de tiempo, si consideramos los parámetros que hemos definido hasta el momento, observamos que la onda recorre una distancia λ en un tiempo T, por lo que $v = \frac{\lambda}{T}$

Número de onda (k).-Se define como el número de longitudes de onda que hay en una distancia 2π, es decir $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

El número de onda ($\bar{\nu}$): en el campo de la espectroscopía aparece también el parámetro que hemos denominado número de onda. En este caso es común definirlo como el número de longitudes de onda que hay por unidad de longitud, de modo que $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$



Relaciones de interés entre los parámetros

Una vez que han sido definidos los parámetros característicos de una onda armónica, estamos en condiciones de establecer determinadas relaciones importantes entre algunos de ellos. Así sabemos que: $\mathbf{v = \lambda . f}$, $\mathbf{k = \frac{2\pi}{\lambda}}$, $\mathbf{\lambda = v.T}$, $\mathbf{k = \frac{2\pi}{vT}}$, $\mathbf{w = \frac{2\pi}{T}}$, $\mathbf{k = \frac{w}{v}}$

O sea $k = \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{v}}$, el número de onda resulta ser la relación entre frecuencia angular y la velocidad de propagación.

ECUACION DE UNA ONDA ARMÓNICA

Consideremos una onda armónica que se propaga hacia la derecha a lo largo del eje X, tal y como nos muestra la figura anterior. La ecuación que representa dicha onda viene dada por la expresión, que para este caso es: $\mathbf{Y(x, t) = A\ sen\ k(x - vt)}$

Recordemos que también podemos escribirla como función coseno. Al estudiar las oscilaciones armónicas, vimos que la elección de una u otra función suele hacerse según el estado inicial de la perturbación.

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores entre parámetros, y dado que $k = \frac{w}{v}$, podemos escribir $\mathbf{v} = \frac{w}{k}$ por lo que: $\mathbf{Y(x, t) = A\ sen\ k(x - \frac{w}{k} t)}$ De este modo, se obtiene como ecuación representativa de una onda armónica que se mueve hacia la derecha la siguiente:

$\mathbf{Y(x, t) = A\ sen(kx - \omega t)}$, cuando la onda se desplaza hacia la derecha, si lo hiciera hacia la izquierda $\mathbf{Y(x, t) = A\ sen(kx + \omega t)}$

Es muy probable encontrar la ecuación de una onda armónica escrita de diversas maneras tales como: $\mathbf{Y(x,t) = A\ sen(kt \pm \omega t)}$ o bien $\mathbf{Y(x,t) = A sen(\omega t \pm kx)}$

Como: **sen(a+b) = sen(b+a)** y , por otra parte, **sen(a-b) = sen(b-a± π),** podemos decir que las ecuaciones: A sen(kx- ωt) y A sen(ωt-kx) representan 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.

Con la función coseno nos ocurre algo parecido: $Y(x,t) = A\cos(kx \pm \omega t)$

$Y(x,t) = A\cos(\omega t \pm kx)$

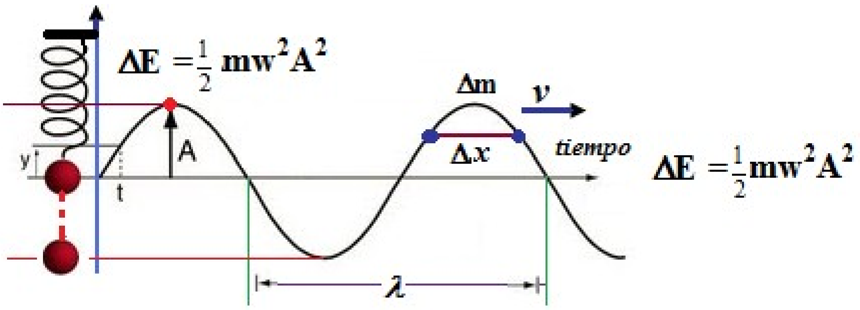
Como **cos(a-b) =cos(b-a),** las ecuaciones: **Acos(kx-wt)** y **Acos(wt-kx)** representan, en ambos casos, una onda armónica que se desplaza hacia la derecha.
En todas las ecuaciones puede aparecer también en el argumento del seno o del coseno una posible corrección de fase,**δ,** que se mide en radianes.
Recordando que. $\omega = \frac{2\pi}{T}$ y $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

ENERGÍA TRANSMITIDA POR LAS ONDAS ARMÓNICAS

Las ondas, como ya hemos dicho, propagan energía, esto se percibe de un modo cualitativo al observar cómo un objeto que flota en el agua comienza a oscilar cuando llega a él la perturbación producida por la piedra arrojada.
También se aprecia el transporte de energía por las ondas en el caso de las ondas sísmicas producidas en los terremotos, así como en las ondas electromagnéticas procedentes del Sol.
En este tema nos fijamos en las ondas mecánicas, que se propagan por un medio. En este caso, consideraremos que la onda mecánica es, además, armónica.
Como vamos a ver, el fenómeno del transporte de energía en las ondas armónicas es cualitativamente distinto según la onda sea unidimensional, bidimensional o tridimensional.

Energía en una onda armónica unidimensional.

Un oscilador armónico unido al extremo de una cuerda puede producir una onda armónica que se desplaza por dicha cuerda, tal como nos muestra la figura.



Durante la propagación de la onda, cada punto de la cuerda efectúa movimientos armónicos simples que oscilan verticalmente, en la dirección perpendicular a la de propagación de la onda.
La energía que hace que cada punto de la cuerda oscile con cierta amplitud proviene del oscilador que perturba el estado de la cuerda y se transmite por toda la cuerda, pues todos los puntos de ella acaban oscilando. La energía total de un oscilador armónico viene dada por la expresión:

$\mathbf{E = \frac{1}{2} kA^2}$, **d**onde $\mathbf{k = mw^2}$

Según esta expresión, la energía correspondiente a un segmento de cuerda de longitud Δx y masa Δm será: $\mathbf{\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m w^2 A^2}$ Si designamos por **μ** a la masa por unidad de longitud, densidad lineal, podemos decir que **Δm =μ.Δx** y por tanto $\mathbf{\Delta E = \frac{1}{2} \mu \Delta x w^2 A^2}$, expresión que corresponde a la energía de un segmento de cuerda de longitud Δx.

Si elegimos como longitud del segmento la propia longitud de la onda, podremos hablar de la energía contenida en una longitud de onda como: $E=\frac{1}{2}\mu\lambda\, w^2A^2$, si tenemos en cuenta que $w=2\pi f$, concluimos con que: $\mathbf{\Delta E = 2\mu\Delta x\pi^2 f^2 A^2}$

Expresión que nos indica que:

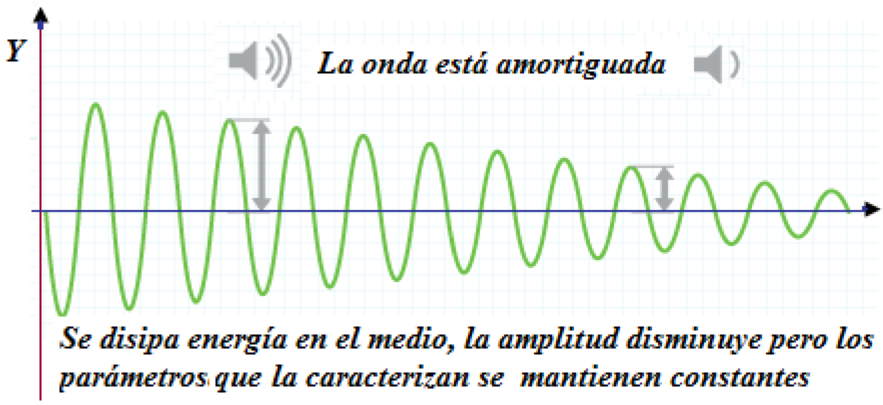
a) La energía transmitida en una onda armónica es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado de la amplitud.

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.

En general, y puesto que la onda se propaga, es más conveniente hablar de **la energía transmitida por unidad de tiempo o potencia de la onda.**

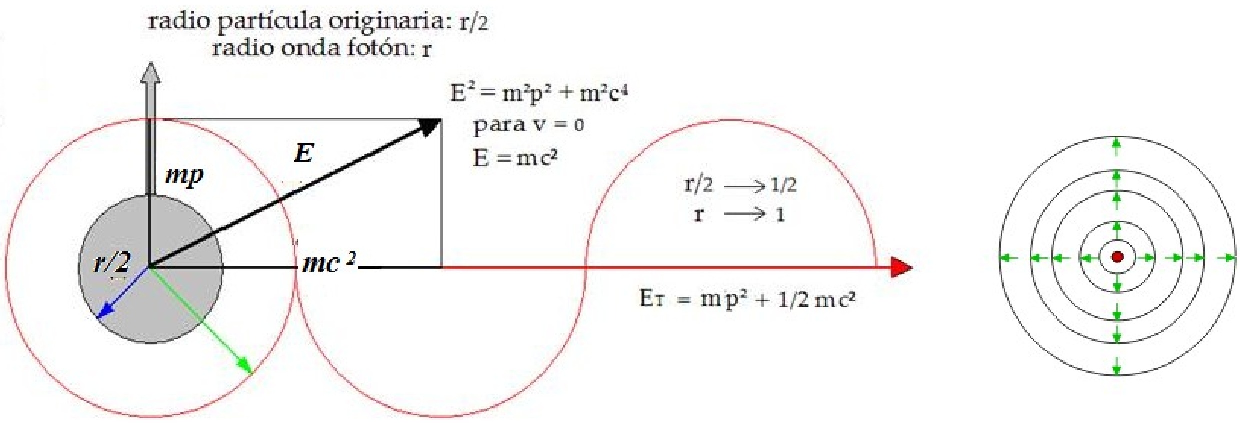
$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = 2\mu\pi^2 f^2 A^2 \frac{\Delta x}{\Delta t} = 2\mu\pi^2 f^2 A^2 v \Rightarrow \mathbf{P = 2\mu\pi^2 f^2 A^2 v}$$

Es decir, la potencia de una onda armónica es directamente proporcional a su velocidad de propagación y al cuadrado de la amplitud y de la frecuencia.



Energía transmitida en las ondas armónicas circulares

Abordaremos ahora el análisis de las ondas bidimensionales. Para ello, consideraremos el caso más clásico, el de una onda circular que se propaga en un medio isótropo.

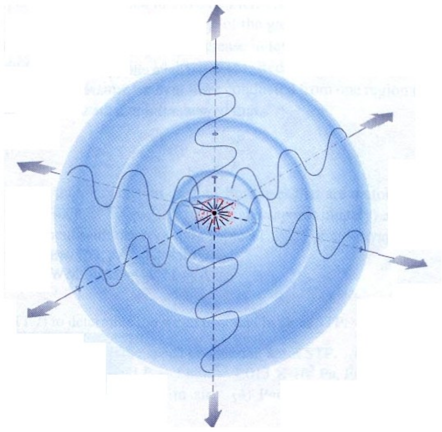


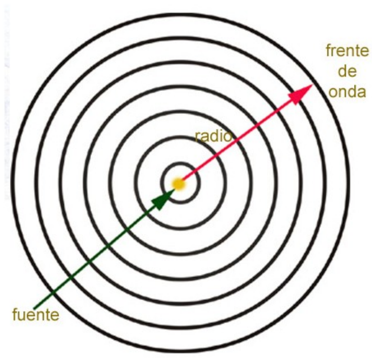
Todos hemos visto alguna vez cómo las ondas circulares que se forman cuando tiramos una piedra en un estanque van haciéndose cada vez más pequeñas a medida que se alejan del foco emisor, como nos muestra la figura.
La explicación de este fenómeno tiene que ver con la conservación de la energía y su distribución en frentes de onda cada vez mayores como así lo podemos comprobar en la figura superior.
Este concepto de frente de onda suele emplearse cuando una onda se propaga en dos o tres dimensiones.
Se define ***FRENTE DE ONDA*** *como la línea que une todos los puntos que, en un mismo tiempo, se encuentran en idéntico estado de oscilación o perturbación***.**

En las ondas circulares los frentes de onda son circunferencias que unen las crestas o los valles de las olas, como las que se aprecian en la figura.
Imaginemos una serie de ondas circulares generadas por un oscilador armónico **O** situado en el centro.
La energía transmitida por las ondas proviene del oscilador y viene dada por: $\mathbf{E = \frac{1}{2} mw^2A^2}$
La conservación de la energía que se transmite exige que ésta se reparta en los sucesivos frentes de onda, que son cada vez mayores. Si consideramos que el medio es isótropo, podemos definir una densidad lineal o masa por unidad de longitud, μ. Puesto que los frentes de onda son circunferencias, la masa correspondiente a un frente de onda de radio r será $\mathbf{m= \mu 2\pi r}$. Así pues, la energía correspondiente al frente de onda A, que nos muestra la figura, en un momento dado de oscilación será: $\mathbf{E_A = \frac{1}{2} \mu 2\pi r_A w^2 A^2}$
Y si la expresamos en función de la frecuencia, f, tendremos: $\mathbf{E_A=4\pi^3\mu f^2 r_A A^2_A}$
Y si la expresamos para el frente de onda B, tendremos: $\mathbf{E_A=4\pi^3\mu f^2 r_B A^2_B}$
Puesto que la energía se conserva, y dado que l a 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: $\mathbf{E_A= E_B}$ □ $\mathbf{r_A A^2_A= r_B A^2_B=conste.}$
Lo que significa que: **A medida que una onda circular se propaga y se aleja del foco emisor, su amplitud decrece según:** $\mathbf{A \,\alpha\, \frac{1}{\sqrt{r}}}$ **α = proporcional**

Energía transmitida en las ondas armónicas esféricas

Para ilustrar lo que ocurre con las ondas armónicas que se propagan en tres dimensiones, nos centraremos en las ondas que se transmiten en medios isótropos. En este caso, los frentes de onda son superficies esféricas, de ahí que estas ondas se denominan ondas esféricas. El sonido, la luz de un foco puntual, las ondas de choque de una explosión, etc, son ejemplos de este tipo de ondas.
En este caso, podemos realizar un análisis similar al anterior, pero teniendo en cuenta que ahora los frentes de onda no son líneas circulares, sino superficies esféricas. Por tanto, hablaremos de densidad superficial, ρ, entendida como masa por unidad de superficie. Puesto que la superficie de una esfera viene dada por la expresión $4\pi r^2$, la masa correspondiente a un frente de onda esférico A, como nos muestra la figura será: $\mathbf{m=\rho 4\pi r^2_A}$





La energía en dicho frente de onda en un momento determinado vendrá dada por:

$\mathbf{E_A = \frac{1}{2}\rho 4\pi^2 r_A^2 w^2 A_A^2}$ y para otro frente de onda B $\mathbf{E_B = \frac{1}{2}\rho 4\pi^2 r_B^2 w^2 A_B^2}$

Puesto que, por el principio de conservación, la energía debe ser la misma, y dado que la onda es armónica, se desprende que: $E_A = E_B \Rightarrow (r^2A^2)_A = (r^2A^2)_B \Rightarrow \mathbf{r^2 A^2 = cte}$

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 una consecuencia de la disipación de la energía, sino que es, precisamente, una exigencia de su conservación.

A medida que una onda esférica se propaga alejándose del foco emisor, su amplitud decrece según $\mathbf{A \,\alpha\, \frac{1}{r}}$

Sin embargo, podemos entender mejor este fenómeno, desde un punto de vista cualitativo, si lo explicamos en términos de intensidad, entendida como **intensidad a la energía que llega por unidad de tiempo a una unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación.**

$I = \frac{E}{S.t}$ que en el caso de una onda esférica $I = \frac{1/24\pi r^2 \rho w^2 A^2}{4\pi r^2 t} = \frac{\rho\omega^2 A^2}{2.t} \Rightarrow I = \frac{\rho\omega^2 A^2}{2.t}$

Lo que significa que la **intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, y, puesto que el cuadrado de la amplitud de una onda esférica es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco emisor.**

La intensidad (I) de una onda esférica es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, de modo que, al aumentar ésta, la intensidad disminuye según la ecuación: $I \,\alpha\, \frac{1}{r^2}$

La unidad de intensidad de onda del S.I es el Julio por metro cuadrado y por segundo

$I \equiv (\frac{julio}{m^2.s})$ o bien $(\frac{watio}{m^2})$

La **constante solar** y la energía irradiada por el Sol, con ayuda de los satélites puestos en órbita alrededor de la Tierra, se ha podido calcular que la intensidad de la radiación solar que incide perpendicularmente en 1 m^2 de superficie exterior de nuestra atmósfera es de 1,3 kw/m^2. Este valor es prácticamente invariable y por ello se denomina **constante solar**. Con él es posible conocer la energía irradiada en la superficie solar mediante un cálculo sencillo. Dicha energía resulta ser de $3,8.10^{23}$ KJ por segundo, es decir, $3,8.10^{23}$ Kw.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS ONDAS

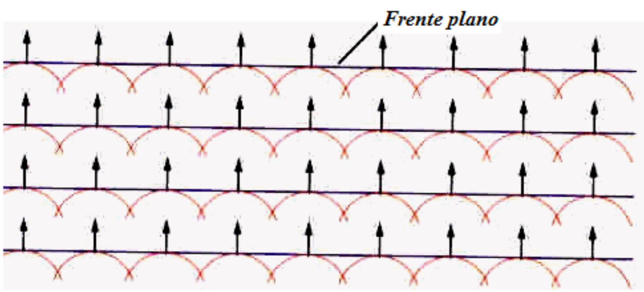
Las ondas comparten algunas propiedades con el movimiento de las partículas, como son la **reflexión** y la **refracción**.
Existen otras propiedades típicamente ondulatorias que no se dan en el movimiento de las partículas, como la **difracción,** la **interferencia** y la **polarización,** si bien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

PRINCIPIO DE HUYGENS

Analizaremos cada fenómeno, haciendo uso de un método propuesto por **Christian Huygens.** En 1690, Huygens publica su **Tratado sobre la luz.** En él expone un sencillo modelo de propagación de ondas que permite explicar los fenómenos ondulatorios, según el cual una onda se propaga en forma de **frente de onda**, entendiendo por tal la superficie que une todos los puntos del medio alcanzados por el movimiento ondulatorio en el mismo instante.
Frente de una onda esférica cuyo foco emisor está a mucha distancia de un observador pueden considerarse planos cuando llegan a dicho observador.
Para explicar la propagación de los frentes de onda, partía de una suposición básica: un foco emisor puntual emite ondas esféricas en un medio isótropo. A partir de esta suposición, Huygens propone lo siguiente:

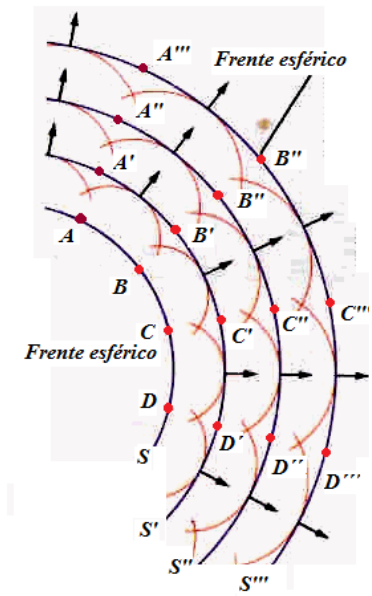
a) Todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se comporta como un foco emisor de ondas secundarias que se propagan en la dirección de perturbación.
b) La superficie envolvente a todas las ondas secundarias, tangente, en un instante dado constituye el siguiente frente de ondas.

Supongamos un frente de ondas S, tal como nos muestra la figura, los puntos A, B y C de este frente se comportan como focos emisores de ondas secundarias que se propagan en la dirección del avance de la onda. Si la onda se propaga en un medio isótropo con velocidad v, el radio de las ondas secundarias, en un instante t cualquiera, será v.t
El nuevo frente de ondas S' será la superficie tangente a todas las semicircunferencias u ondas secundarias. A su vez, los puntos A', B' y C' se convierten en focos emisores que darán lugar al frente S'', y así sucesivamente.
A la luz de lo explicado, un frente de ondas esférico producirá posteriores frentes de ondas también esféricos, mientras que un frente de ondas plano, originará sucesivos frentes de onda planos.



TRAZADOS DE FRENTE DE ONDAS

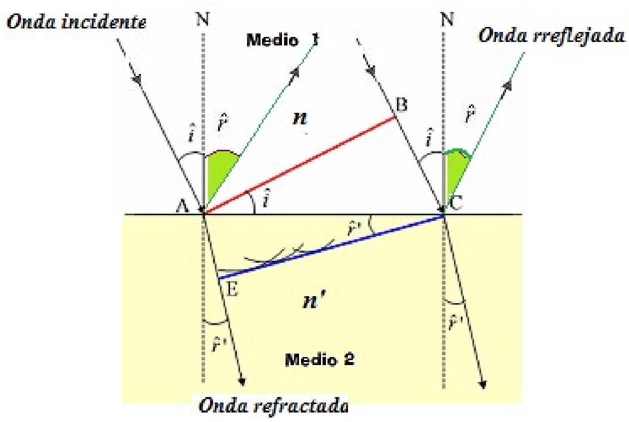
Modelo de Huygens para la propagación de las ondas

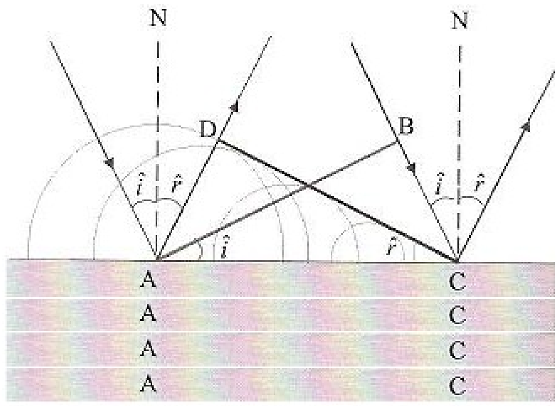


La reflexión y la refracción según el modelo de Huygens

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 pro el mismo medio, mientras que la otra parte pasa a propagarse por esotro medio, donde, al ser distinto, lo hará con diferente velocidad. La primera fracción de la onda recibe el nombre de **onda reflejada**, y la segunda se denomina **onda refractada.**

Este fenómeno guarda similitud con lo que ocurre si hacemos que se propaga en un muelle unido a otro distinto, como se observa en la figura, aunque es este caso la dirección de propagación no se modifica. Desde un punto de vista energético, está claro que la energía de la onda incidente se reparte entre la onda reflejada y la refractada.

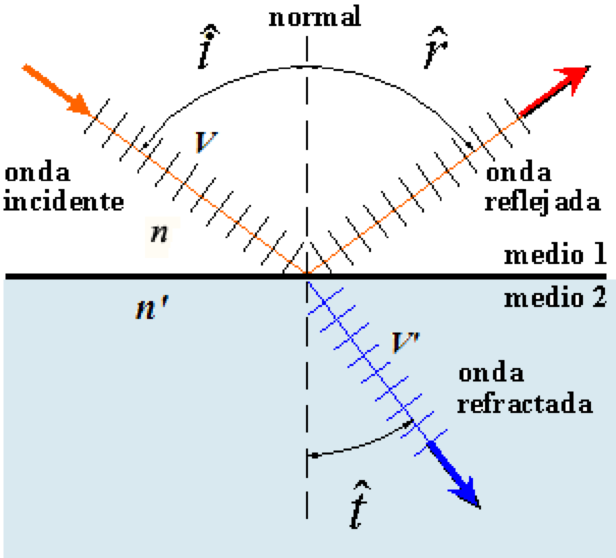




Veamos cómo se explica la **reflexión**. Supongamos una onda incidente que avanza en frente de onda planos (S_1, S_2…) en cierto instante contacta con la superficie de separación de los dos medios y hace que el punto A se convierta en foco emisor de ondas esféricas reflejadas. Si la velocidad de propagación en este medio es v, la onda secundaria emitida por A tendrá un radio igual a v al cabo de un segundo, pero el frente de onda incidente se habrá desplazado hasta A', que se convertirá en nuevo foco emisor. Al siguiente segundo, la onda secundaria emitida por A' tendrá un radio v, mientras que la emitida por A tendrá ya en ese mismo instante un radio 2v. Al dibujar los frentes de onda reflejados, observaremos dos hechos importantes.

a) Los frentes de onda reflejados tienen la misma forma que los incidentes si la superficie reflectante es plana.
b) El ángulo de incidencia, i, es igual que el ángulo de reflexión, r.

Para el análisis del fenómeno de **refracción**, los mismos puntos considerados en el caso anterior pueden ser focos emisores de ondas refractadas que se propagan por otro medio. Si la velocidad de propagación en ese medio es v', la onda secundaria refractada en a tendrá un radio 2v' a os dos segundos a partir de que el frente incidente llega a A, mientras que la emitida por A' tendrá en ese instante un radio v'. Como se puede observar en la figura, los frentes de onda refractados s mueven en distinta dirección que los incidentes y se producen dos situaciones diferentes que dependen de la velocidad de propagación de los dos medios.



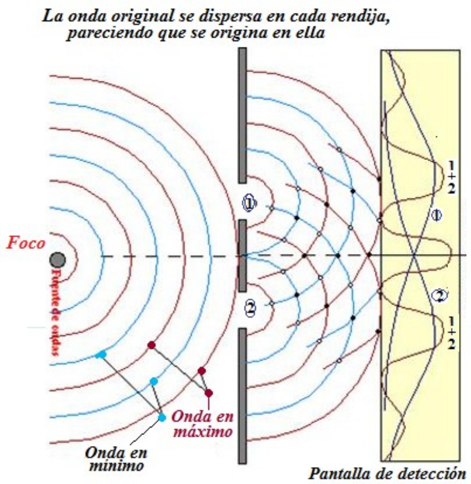
1.-Si **v'>v**, la dirección en que se propagan los frentes de onda refractados se aleja de la normal a la superficie de separación, es decir, el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia (r>i)

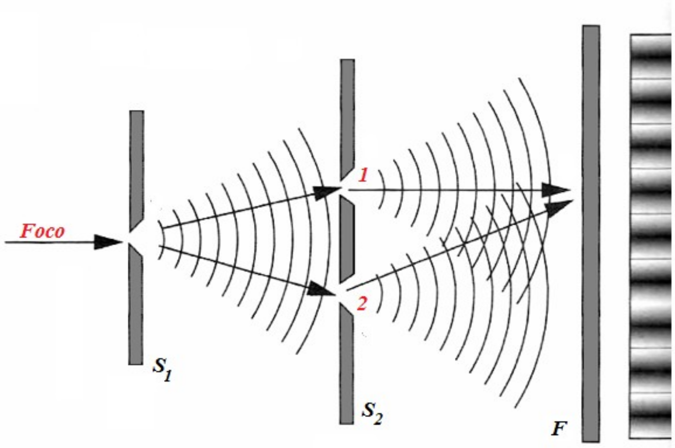
2.-Si **v'<v** la dirección en que se propagan los frentes de onda refractados se acerca a la normal a la superficie de separación, es decir, el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia (r<i)

El método de Huygens daba una explicación a la ley de refracción, que había sido enunciada de un modo empírico en 1621 por Wilebrord Snell (1591-1626), profesora de Leyden, y que establecía que: $\frac{Seni}{Senr} = \frac{v}{v'}$ esta es conocida como la **ley de Snell de la refracción**

La difracción según el modelo de Huygens

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





Se llama **difracción** al fenómeno por el cual una onda modifica su dirección de propagación al encontrare con aberturas y obstáculos.

Esto puede predecirse muy bien en el caos de las ondas que se propagan en el agua. En la figura se observa lo que ocurre a un frente de ondas plano cuando se encuentra con una abertura estrecha. La onda atraviesa el orificio, pero se convierte en circular, o esférica si se propaga en tres dimensiones. Este hecho permite que la onda llegue a puntos situados detrás de los obstáculos que limitan la abertura, cosa que no ocurriría nunca en el mundo de las partículas: aquí las partículas que consiguiesen atravesar el orificio seguirían moviéndose en línea recta; sería impensable que chocaran con algún cuerpo situado detrás del obstáculo.

El modelo de Huygens permite explicar este fenómeno. Los puntos de la porción del frente de ondas que atraviesan la abertura se convierten en focos emisores de ondas secundarias. Según sean las dimensiones de la abertura en relación con la longitud de la onda incidente, los frentes de onda difractados tendrán una forma u otra, como puede observarse en la figura. 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 o las del obstáculo que se van a sortear son comparables con la longitud de onda.
La observación de este suceso, junto con el de la producción de interferencias, permitió desvelar el comportamiento ondulatorio de la luz.

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN EL MOVIMIENTO ONDULATORIO

Hasta el momento hemos hablado de aspectos relativos a la propagación en un medio de una sola onda. Si embargo, lo más habitual es que en un mismo medio se propaguen varias ondas. Cuando ocurre esto, nuestra experiencia nos permite ver lo que ocurre. Así cuando en una habitación hablan varias personas, por ejemplo, sus voces se propagan por el mismo medio, el aire, sin estorbarse lo más mínimo. Del mismo modo, si lanzamos a la vez dos piedra a un estanque de aguas tranquilas, las ondas producidas se entrecruzan y siguen cada una su camino.
Sin embargo, en ambas situaciones tiene lugar un interesante fenómeno: el ruido producido cuando varias personas hablan en una misma habitación es mayor que cuando lo hace una sola; igualmente, cuando las ondulaciones del agua se entrecruzan, las olas parecen reforzarse en determinadas zonas mientras que en otras da la impresión de que se anulan. Estos hechos, como vamos a ver, pueden explicarse haciendo uso del **principio de superposición**

El principio de superposición *dice: 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.*

Debemos aclarar que este principio es aplicable en los llamados "medios lineales", es decir, en aquellos medios en los que la fuerza restauradora se comporta según la ley de Hooke. El interés del principio de superposición reside en que es aplicable a muchos tipos de ondas, como las sonoras, las electromagnéticas, las producidas en la superficie del agua o las de las cuerdas.
Vamos a ver que dos ondas pueden llegar a combinar sus efectos en un punto de dos modos: a) reforzándose b) anulándose. En ambos casos diremos que las ondas interfieren: en el primero, de manera constructiva, y en el segundo de una forma destructiva.

Interferencia entre ondas armónicas

Hagamos un sencillo análisis de lo que ocurre cuando dos ondas armónicas de la misma amplitud**, número de onda y frecuencia angular**, pero diferente fase, se encuentran viajando en el mismo medio y en la misma dirección. Con estas condiciones, podemos expresar las ecuaciones de una de ellas de la siguiente forma: **Y_1 =A sen(kx-wt)** **Y_2 =A sen(kx-wt-δ)**
Aplicando el principio de superposición cuando dichas ondas coinciden en un punto x del medio y en un instante t, la perturbación y en ese punto será la suma algebraica de ambas perturbaciones.
Por tanto $Y = Y_1 + Y_2 =$ A sen[sen(kx-wt)+sen(kx-wt-δ)]
Si hacemos a=(kx-wt) y b= (kx-wt-δ) y teniendo en cuenta que:

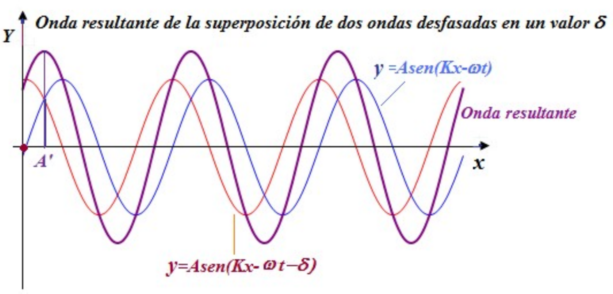
$$\textbf{sen a + sen b} = 2\cos(\frac{a-b}{2})sen(\frac{a+b}{2})$$

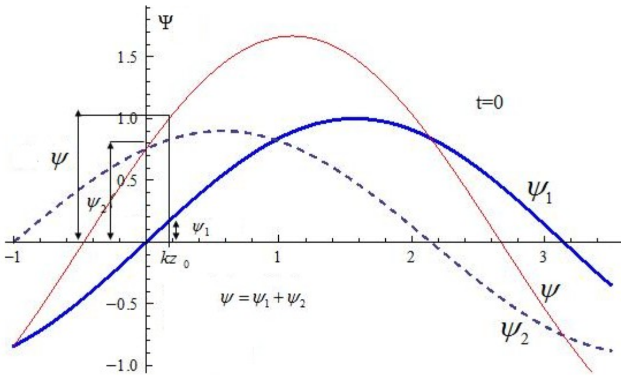
Entonces la perturbación resultante en cualquier punto x vendrá dada por:

$$\mathbf{Y = 2Acos(}\frac{\delta}{2}).sen(kx - wt - \frac{\delta}{2})$$

Si atendemos a esta expresión de la perturbación resultante, podemos extraer las siguientes conclusiones:

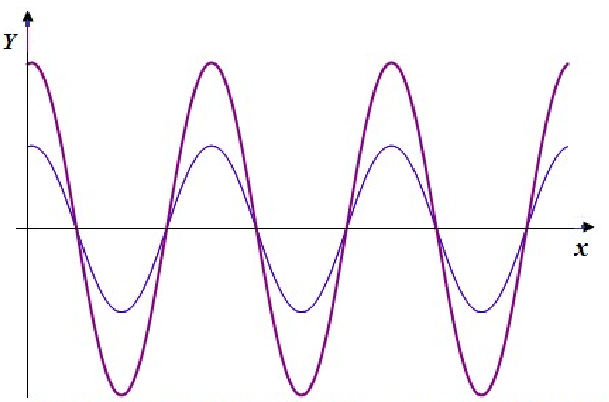
1.-La onda resultante de la interferencia de dos ondas armónicas, es también armónica y tiene la misma longitud de onda y frecuencia que las ondas individuales.



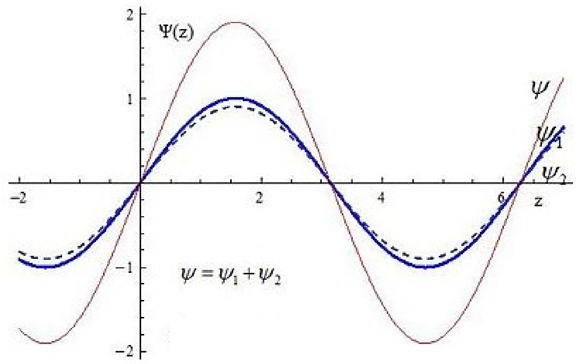


2.-La amplitud de dicha onda resultante **A’ =2Acos** $\frac{\delta}{2}$

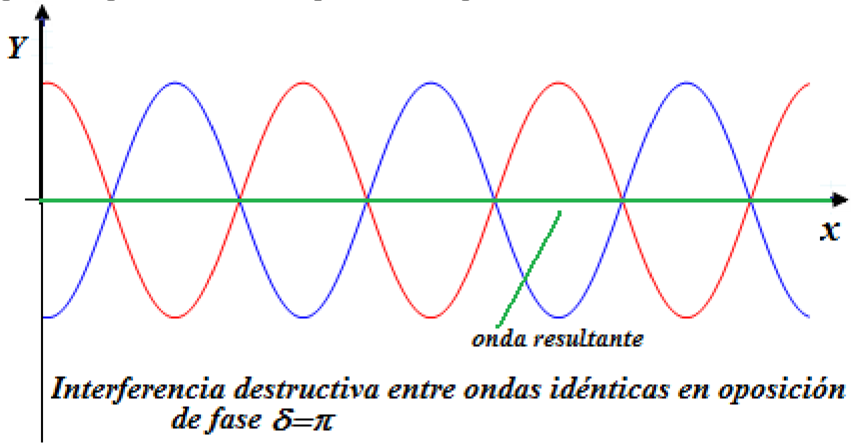
Cuando las ondas están en consonancia de fase o sea δ =0
Cuando esto ocurre, el desfase entre ambas ondas es nulo, esto es, vale cero, con lo que la amplitud de la onda resultante es: A’ =2Acos $\frac{\delta}{2}$ como δ=0 A’ =2Acos0 **A’ =2ª**



Superposición de ondas armónicas en consonacia de fase δ=0

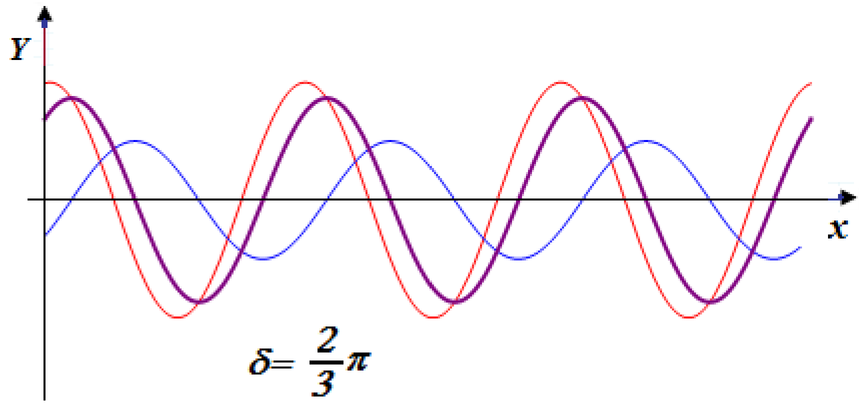


Es decir, como puede observarse en la figura adjunta, la amplitud se duplica en este caso.
Podemos afirmar que: **Cuando dos ondas en consonancia de fase interfieren entre sí, lo hacen de manera constructiva.**
O sea cuando δ =0, 2π, 4π, etc. En consonancia de fase
Cuando las ondas están en oposición de fase o sea δ=π
En esta caso, A' =2 A$\cos\frac{\delta}{2}$ como δ =π A' =2A$\cos\frac{\pi}{2}$ como $\cos\frac{\pi}{2}$=0 , obtenemos que la amplitud de la onda resultante A'=0
En consecuencia, las ondas interfieren de manera destructiva, anulando sus efectos. Es la situación que se representa en la figura, en la que las crestas de una onda coincidan con los valles de la otra.

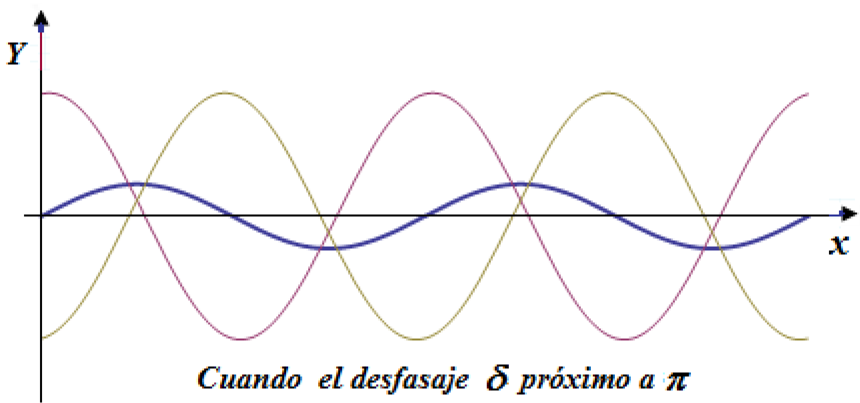


Interferencia destructiva entre ondas idénticas en oposición de fase δ=π

Cuando dos ondas en oposición de fase interfieren entre sí, lo hacen de manera destructiva.
En aquellos casos en los que el desfase entre las dos ondas se encuentre entre δ(0-π) radianes, la onda resultante tendrá una amplitud comprendida ente A' (2 A-0). Si la diferencia de fase es prácticamente nula, la amplitud será casi 2 A, pero si la diferencia de fase se aproxima a π, entonces la amplitud de la onda resultante será casi nula. Estas situaciones intermedias pueden verse en las figuras adjuntas.



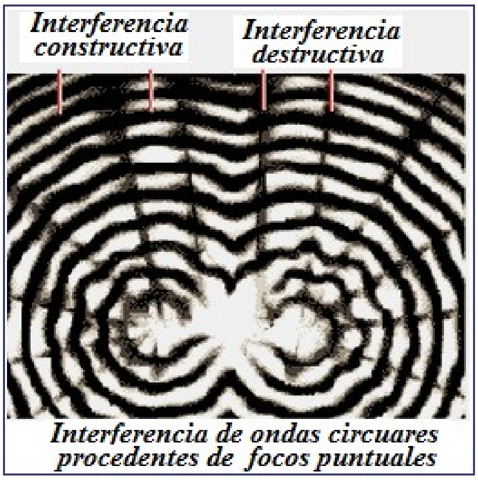
$\delta = \frac{2}{3}\pi$

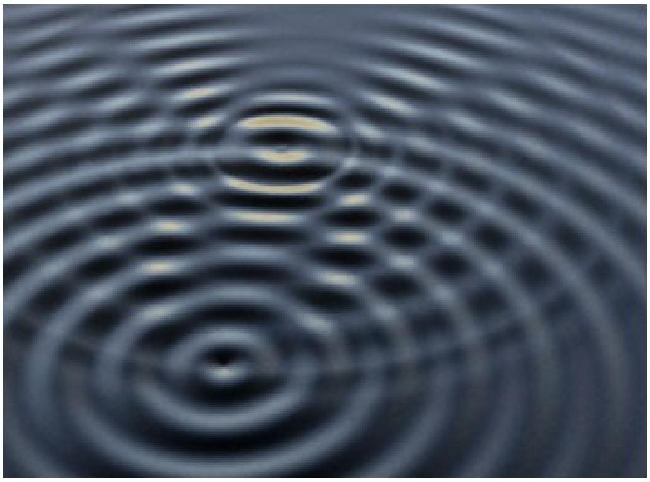


Cuando el desfasaje δ próximo a π

En la práctica, las ondas que interfieren entre sí pueden provenir de la misma fuente o de fuentes que están en consonancia de fase.

Diagrama de interferencia entre ondas circulares producidas por fuentes cercanas en fase en una cubeta de ondas.



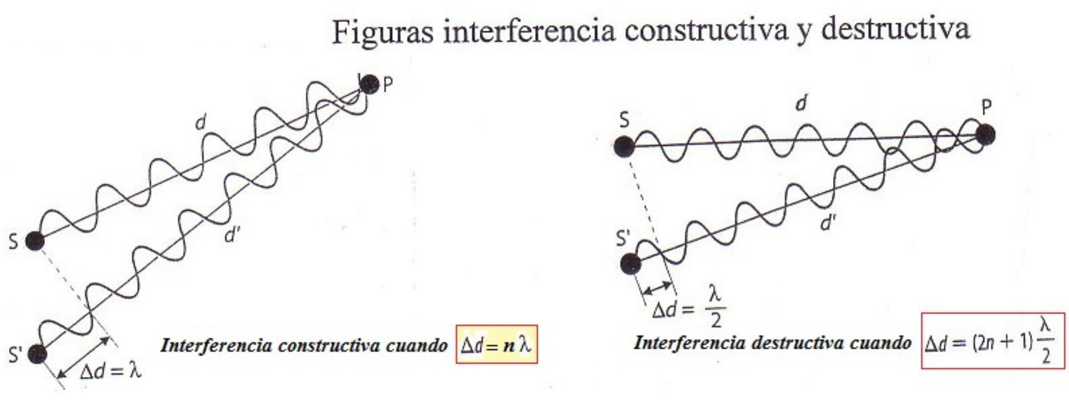


En este caso, la diferencia de fase entre las ondas que interfieren se debe a la diferencia que hay entre las distancias que recorre cada una hasta el punto de encuentro. Si suponemos que la distancia entre las fuentes es lo suficientemente pequeña como para considerar que ambas ondas tienen la misma amplitud en un punto alejado, como nos muestra la figura, y podemos comprobar que:

La interferencia será constructiva, cuando la diferencia entre las distancias recorridas por la ondas se un múltiplo entero de la longitud de onda. En los puntos en los que se satisfaga esa condición, se producirán máximos. Así pues, la condición de los máximos es $\Delta d = n\lambda$ *donde n = 0,1,2,3 etc.*

La interferencia será destructiva si la diferencia entre las distancias es de media longitud de onda o un múltiplo impar de ella. En los puntos en los que se satisfaga esa condición, las ondas se anularán mutuamente, dando lugar a mínimos. Así pues, la condición de mínimos es:

$$\Delta d = (2n+1)\,\frac{\lambda}{2}$$



ONDAS ESTACIONARIAS

Un fenómeno peculiar de superposición de ondas, de gran trascendencia en el mundo de la música por ejemplo, es el que da lugar a las denominadas ondas estacionarias.
En las figuras se observa una cuerda fija en sus dos extremos; en uno de ellos se vibrar la cuerda con diversas frecuencias de oscilación. Para unas frecuencias de oscilación adecuadas, el resultado que se aprecia es de una onda confinada entre los extremos, o no viajera, en la que existen unos puntos determinados que oscilan con amplitud máxima, llamados **vientres** o **antinodos**, y otros puntos fijos que no oscilan y que se denominan **nodos.** El número de **nodos y vientres** depende de la frecuencia de oscilación, como vamos a ver.
Se producen ondas estacionarias debido a qué cuando se produce una perturbación continuada en uno de los extremos, se genera un tren de ondas que se refleja en el otro extremo, de modo que lo que sucede en última instancia es un fenómeno de superposición entre ondas idénticas que se propagan en el mismo medio en sentidos opuestos.
Al analizar el fenómeno a partir de esta idea, comprobaremos que las conclusiones que se obtienen concuerdan con la observación de este hecho. Para ello consideraremos dos ondas idénticas que se mueven en sentidos opuestos.

$\mathbf{Y_1 = A\,sen(kx+wt)} \qquad \mathbf{Y_2 = A\,sen(kx-wt)}$

$\mathbf{Y = Y_1+Y_2 = A[sen(kx+wt)+sen(kx-wt)]}$ Considerando. a = kx+wt y b= kx-wt

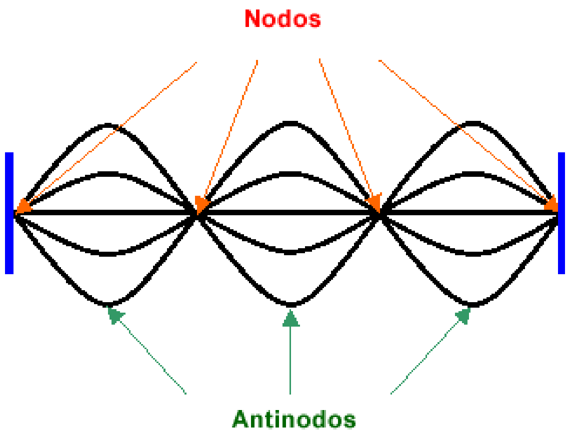
Aplicando la relación trigonométrica: sen**a**+sen**b**= $2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right).sen\left(\frac{a+b}{2}\right)$ obtenemos la ecuación de onda resultante: $\mathbf{Y = 2A sen(kx).cos(wt)}$ **Ecuación de onda estacionaria**

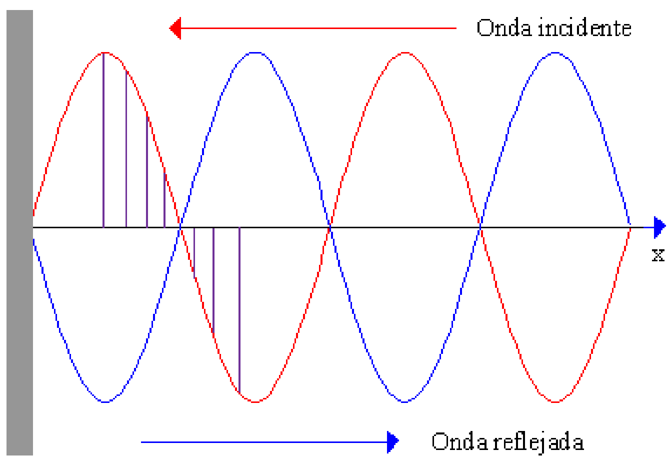
A partir de esta ecuación, y dado que en la onda que se propaga por un medio todos los puntos oscilan con la misma amplitud, podemos concluir que una onda estacionaria:

a) La amplitud es función de la posición x, de modo que determinados puntos oscilan con amplitud máxima y otros no oscilan

b) La frecuencia es igual a la de las ondas armónicas que se superponen

La amplitud de una onda estacionaria es función de x, de modo que hay puntos que no oscilan





Hemos encontrado una explicación al hecho que vemos en la figura superior acerca de la existencia de nodos y antinodos. Trataremos ahora de determinar la posición de dichos nodos y antinodos.

Localización de nodos

En los nodos, la amplitud de oscilación es cero, cosa que ocurrirá:
Y = 2.A.sen(kx).coswt cuando **sen kx = 0,** por lo que los valores posibles de kx =0, π,2π, 3π,4π etc. Y puesto que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, podemos encontrar la relación entre las posiciones x y la longitud de la onda estacionaria, de modo que: $x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, 2\lambda$ etc.

Es decir, los nodos se encuentran ubicados en: $x = n.\frac{\lambda}{2}$

Localización de los vientres o antinodos

Los vientres o antinodos son los puntos donde la amplitud es máxima, por lo que satisfarán que **sen kx =1** Ello ocurre cuando $kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \frac{7\pi}{2}, etc$

O sea las vientres se encuentran ubicados en: $\mathbf{x = (2n+1)}\frac{\lambda}{4}$

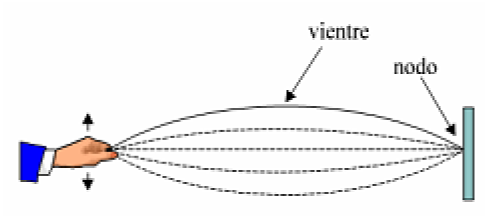
Ahora bien, al comienzo hemos afirmado que, al provocar oscilaciones con frecuencias determinadas en una cuerda que tenga sus dos extremos fijos, podemos conseguir el establecimiento de ondas estacionarias. Analicemos cuáles deben ser esas frecuencias

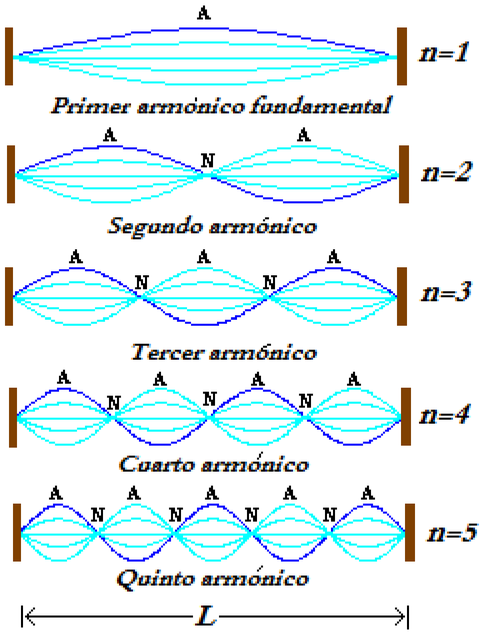
Frecuencias de ondas estacionarias en una cuerda fija por ambos extremos

Consideremos una cuerda de longitud ℓ, fija por ambos extremos, como nos muestra la figura, los extremos fijos constituyen nodos, por lo que la condición que debe cumplirse es que: $\ell = n\frac{\lambda}{2}$ donde n =1,2,3…, y dado que $\lambda = \frac{v}{f}$ donde v es la velocidad de propagación de la onda, nos queda: $\ell = n\frac{v}{2f} \Rightarrow \mathbf{f = n}\frac{v}{2\ell}$

Es decir, dando a n los valores 1,2,3…, obtenemos las posibles frecuencias que darían lugar al establecimientos de ondas estacionarias. Dichas frecuencias reciben el nombre de **armónicos.**
Las expresiones que se observan en la figura de arriba nos permiten entender el mecanismo por el que se "**afinan**" las cuerdas de los instrumentos musicales al tensarlas o destensarlas. A partir de la expresión: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ y $f = n.\frac{v}{2\ell} \Rightarrow \mathbf{f =} \frac{n}{2\ell}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$

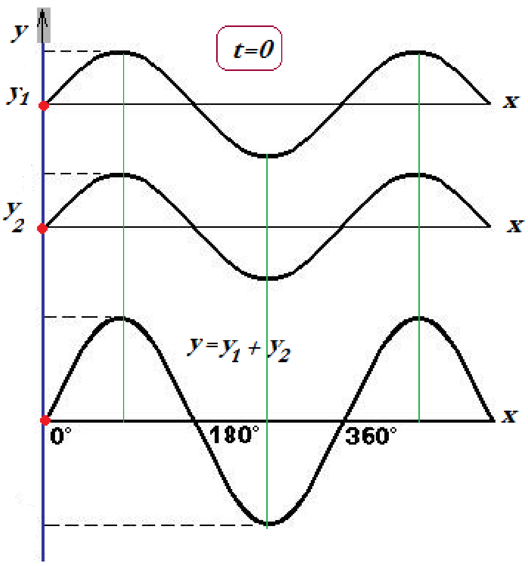
Luego el sonido emitido por las cuerdas cambia al variar su tensión $\mathbf{f=}\frac{n}{2\ell}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$

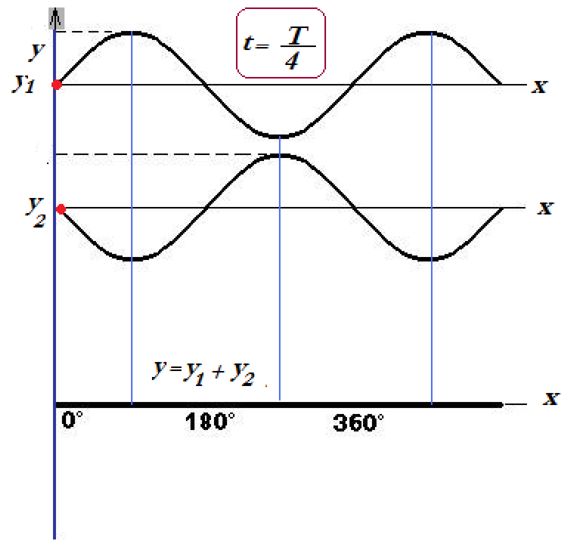




Explicación gráfica del aspecto de una onda estacionaria

Tenemos que explicar gráficamente por qué en una onda estacionaria se producen nodos y vientres, partiendo de dos ondas similares que viajan en sentidos opuestos. Para ello, analizaremos la fotografía instantánea de la onda estacionaria en diferentes tiempos.
Consideremos que en t =0 las ondas que se superponen tienen el aspecto que se aprecia en la figura adjunta.





La onda resultante de la superposición es la que aparece dibujada en negro y cuya amplitud es de 2 A

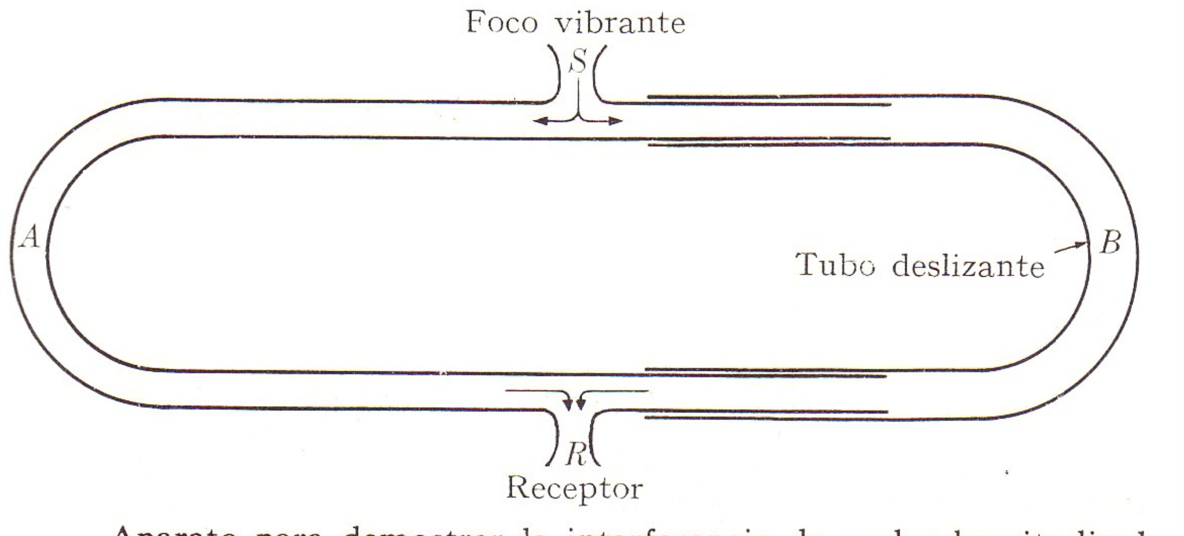
En un instante t = $\frac{T}{4}$, las ondas se han desplazado relativamente media longitud de onda, por lo que en ese instante se encuentran en oposición de fase y la interferencia es destructiva.

Sin embargo, otro cuarto de periodo después, es decir cuando t = $\frac{T}{2}$, las ondas vuelven a estar en consonancia de fase, pero invertidas con respecto a la situación inicial. Se produce entonces la onda resultante de amplitud 2 A, pero invertida con respecto al tiempo inicial.
Al cabo de otro cuarto de periodo, cuando t = $\frac{3T}{4}$, las ondas vuelven a estar en oposición de fase y a producir una interferencia destructiva. El ciclo se repite de nuevo a partir de aquí. Sin embargo, al comparar todas las figuras de las ondas resultantes en cada intervalo de tiempo, observamos que hay puntos fijos que nunca oscilan, **nodos**, y otros que oscilan con amplitud máxima de arriba abajo, **vientres.**
Por tanto, cabe imaginar que una onda estacionaria es el resultado de una secuencia de interferencias constructivas y destructivas. Sin embargo, hay un importantísimo detalle que no podemos obviar:
La existencia de nodos o puntos que no oscilan implica que una onda estacionaria, a diferencia de las viajeras, no transporta energía de un punto a otro.

En una onda estacionaria, la energía no se transmite de un punto a otro, sino que se confina. Alos vientres le corresponden máximos de energía mientras que los nodos tienen energía nula. Sin embargo, la energía total es la suma de las energías de las ondas que dan lugar a la onda estacionaria.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

El fenómeno de interferencia entre dos ondas longitudinales en el aire puede demostrase con ayuda del aparato que representamos en la figura:



Aparato para demostrar la interferencia de ondas longitudinales

Una onda emitida por un diafragma S accionado eléctricamente, es enviada dentro de un tubo metálico, en el cual se divide en dos partes, una sigue el camino SAR y la otra sigue el camino SBR, que puede modificarse haciendo deslizar hacia la derecha el tubo B, que dispone de expansiones.
Supongamos que la frecuencia del foco vibrante se de 1.100 vibraciones por segundo. Como la velocidad del sonido en el aire es v =330 m/s, entonces como λ =v.T = $\frac{v}{f}$

$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{33000}{1100} = 30cm \Rightarrow$ La λ =30cm

Si ambas trayectorias SAR y SBR son de igual longitud, las dos ondas llegaran a R simultáneamente y las vibraciones producidas por ellas estarán en fase. La vibración resultante tendrá una amplitud igual a la suma de las dos amplitudes individuales y el fenómeno de intensificación puede ponerse de manifiesto bien con el oído aplicado a R o con la ayuda de un micrófono provisto de amplificador y altavoz.

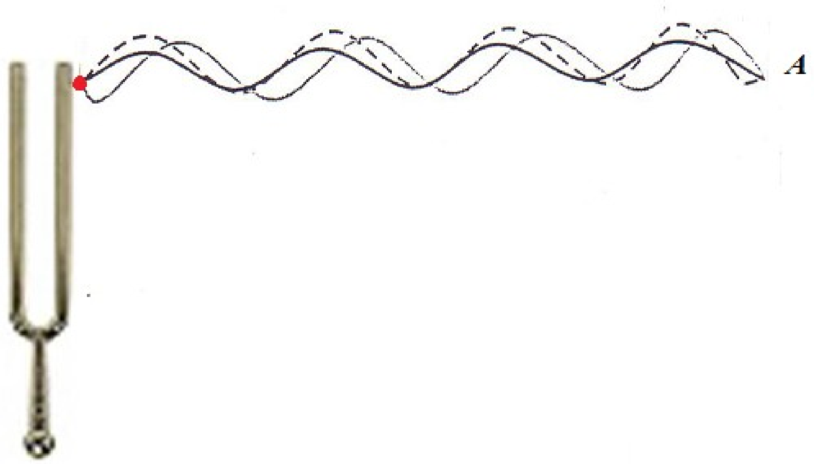
Supongamos que desplazamos el tubo hacia fuera una distancia de 7,5cm, por consiguiente hacemos la trayectoria SBR 15cm mayor que la trayectoria o camino SAR, por tanto la onda de la derecha habrá recorrido una distancia que excederá en $\frac{\lambda}{2}$ a la trayectoria recorrida por la onda de la izquierda, y la vibración producida en R por la onda de la derecha estará, por tanto, en oposición de fase con la producida por la onda de la izquierda.

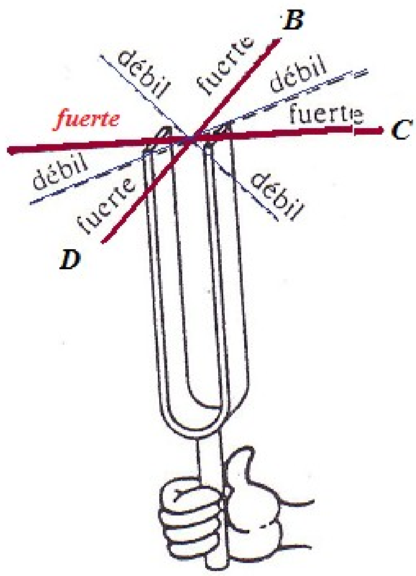
La interferencia descrita se pone de manifiesto por una reducción acusada del sonido en R.

Si movemos el tubo otros 7,5cm de modo que el recorrido SBR menos el recorrido SAR sea de 30cm, o sea una longitud de onda (λ=30cm), como hemos visto, las dos vibraciones en R se reforzarán, que ocurre cuando la diferencia en los dos recorridos sea de un número entero de longitudes de onda **d =n$\boldsymbol{\lambda}$.**

Resumiendo diremos: La intensificación del sonido en el interferómetro tiene lugar cuando la diferencia de recorrido es de 0,λ,2λ,…nλ, por lo contrario la atenuación del sonido en el interferómetro tiene lugar cuando la diferencia de recorrido es de $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}$, etc.

Una experiencia demostrativa de las interferencias ocurre cuando hacemos girar, como nos muestra la figura, delante del oído un diapasón previamente excitado o perturbado, se observa que durante una vuelta completa el sonido se **extingue** en cuatro posiciones y se **refuerza** en otras cuatro.





Esto es debido a que las ondas emitidas por una de las ramas del diapasón se encuentran, en esas cuatro posiciones, en **fase** con las ondas emitidas por la otra rama, es decir que en esas cuatro posiciones pasan ambas ondas al mismo tiempo por sus máximos e condensación y enrarecimientos, sumándose sus efectos y reforzando el sonido. En cambio, en las otras cuatro posiciones, que forman ángulos de 45º con las anteriores, se encuentran ambas ondas en fase opuesta, es decir, que al mismo tiempo que una de ellas pasa por su máximo e condensación, la otra pasa por su máximo de enrarecimiento neutralizándose así sus efectos, sin que el aire se condense ni enrarezca y extinguiéndose el sonido.

EL SONIDO

El sonido, es la sensación sonora que experimente el nervio acústico por medio de los diferentes órganos del oído.
El sonido, es el movimiento vibratorio longitudinal que da lugar a la sensación sonora.
Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales: ondas mecánicas, porque necesitan de un medio material para su propagación, y longitudinales, porque las partículas del medio oscilan en la misma dirección en que se propaga la onda. Una demostración palpable del carácter mecánico de estas ondas es un experimento que se realiza con mucha frecuencia en muchos museos de ciencia y que consiste en hacer el vacío en una campana de vidrio en cuyo interior hay un despertador sonando. A medida que el aire se extrae del interior de la campana, el sonido va extinguiéndose hasta desaparecer pro completo aunque el despertador siga vibrando.
Las ondas sonoras se propagan en medios sólidos, líquidos y gaseosos. En los tres casos, las partículas materiales del medio oscilan en la misma dirección de propagación de la onda.
El proceso que engloba la **producción, transmisión y recepción** de las ondas sonoras por el oído es lo que de nomina **sonido.** Todo este proceso requiere:
a) **Una fuente productora de ondas sonoras.** Son fuentes sonoras, por ejemplo, los altavoces, el martillo neumático, los instrumentos musicales, el diapasón etc.
b**) Un medio transmisor por el que se propagan las ondas sonoras.** Este medio debe presentar propiedades elásticas. En nuestro entorno es el aire.
c**) Un receptor o detector de sonidos,** que transforme la energía transmitida por las vibraciones mecánicas producidas por las ondas sonoras en otras formas de energía.
Según todo esto, podemos concluir que: **el sonido** es la propagación de la vibración de un cuerpo elástico a través de un medio material.

PRODUCCIÓN Y PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

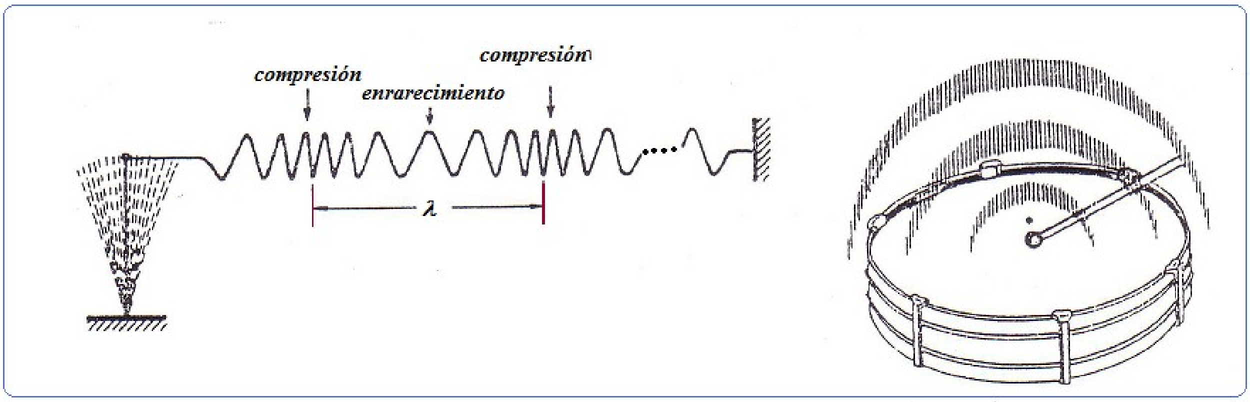
Si se toma una regla metálica, y se inmoviliza uno de sus extremos con un tornillo mordaza, tal y como nos lo muestra la figura. Si ahora separamos de la posición de equilibrio el extremo no sujeto al tornillo y lo dejamos oscilar: Probablemente no se perciba sonido alguno, al principio, pero si vamos acortando la parte saliente de la regla metálica, llegará un momento en que comenzaremos a oír algún sonido.
Lo que ocurre es que la regla comprime la capa de aire que está en contacto con ella por el lado hacia el que se mueve, y ello hace que aumente la presión, mientras que la capa de aire que está en contacto con el otro lado se enrarece, su presión disminuye.
Los movimientos de vaivén de la regla hacen que las compresiones y enrarecimientos de aire se suceden de forma alternada en el tiempo y se propaguen por el medio.
La propagación de estas compresiones y enrarecimientos del aire constituyen una onda mecánica longitudinal.

Ahora bien, cuándo decimos que son sonoras esta ondas mecánicas longitudinales, y la respuesta es que cuando las percibimos como sonido a través de nuestros oídos. Esto ocurre en el momento en que la frecuencia de oscilación se encuentra entre 20 y 20.000 Hz. Esto explica por qué sólo se percibe sonido cuando acortamos suficientemente la regla metálica, al recortarla lo que hacemos es aumentar la frecuencia de oscilación, hasta que encontramos las frecuencias audibles. Así podemos decir:

Todo cuerpo que oscile con una frecuencia comprendida entre 20 y 20.000Hz crea una onda sonora en el medio circundante, ya sea sólido, líquido o bien gas.

En cuanto a la forma en que se propagan, hay un hecho común en los tres estados: **las partículas del medio circundante oscilan en la dirección de propagación de la onda.**

Esto produce como puede observarse en la figura adjunta, variaciones alternadas de la densidad del medio que, al propagarse, constituyen la onda.



Dado que en el caso de los gases, como el aire, la densidad y la presión se encuentran estrechamente relacionadas las variaciones de la densidad se traducen en variaciones de la presión, es por ello por lo que se dice:

Las ondas sonoras se propagan por un medio gaseoso mediante una secuencia alternada de compresiones y enrarecimientos.

Las ondas mecánicas longitudinales de frecuencias más bajas que las audibles se denominan **ondas infrasónicas**. Un ejemplo son las ondas sísmicas. Por el contrario, aquellas frecuencias que son superiores a las audibles se denominan **ondas ultrasónicas** y se emplean en los sónares que permiten cartografiar el relieve submarino en las ecografías.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Hemos visto que, para que una onda mecánica se propague en un medio, éste debe tener dos propiedades: **inercia y elasticidad.** En general, la velocidad de propagación de una onda mecánica viene dada por la expresión: $v = \sqrt{\dfrac{\textit{propiedad elástica}}{\textit{propiedad inercial}}}$, por lo tanto:

La velocidad a la que se propaga el sonido no depende de su intensidad o de sus cualidades, sino únicamente de las propiedades del medio.

Cuanto mayor sea la rigidez del medio, mayores serán también las fuerzas restauradoras que hacen que las partículas recuperen sus posiciones originales. De este modo, en general, el sonido se propaga con mayor velocidad en los medios más elevada en los sólidos que en los líquidos o gases.

En los fluidos, la velocidad de propagación del sonido viene dada por la siguiente expresión: $v=\sqrt{\dfrac{\chi}{\rho}}$, donde χ es el módulo de compresibilidad, que mide la relación entre el cambio de presión y la variación relativa de volumen, es decir, las propiedades elásticas del medio, mientras que ρ representa la densidad y mide, por tanto, la propiedad inercial del medio.
En los sólidos, la expresión lleva el módulo de Young, que representa las propiedades del sólido.

Velocidad del sonido en los distintos medios.

MEDIO	TEMPERATURA (C°)	VELOCIDAD (m/s)
Aire	0	331,46
Argón	0	319
Dióxido de Carbono	0	260,3
Hidrógeno	0	1286
Helio	0	970
Nitrógeno	0	333,64
Oxigeno	0	314,84
Agua destilada	20	1484
Agua de mar	15	1509,7

MEDIO	TEMPERATURA (C°)	VELOCIDAD (m/s)
Mercurio	20	1451
Aluminio	17-25	6400
Vidrio	17-25	5260
Oro	17-25	3240
Hierro	17-25	5930
Plomo	17-25	2400
Plata	17-25	3700
Acero inoxidable	17-25	5740

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN LOS GASES

En los gases la velocidad de propagación depende de factores como la temperatura, puesto que, al aumentar la temperatura, las moléculas de los gases chocan con mayor frecuencia y transmiten más rápidamente la perturbación.
Teniendo en cuenta que la propagación que la propagación del sonido en un medio gaseoso tiene lugar a través de compresiones y enrarecimientos, puede considerarse, dada su rapidez, un proceso adiabático en el que no se transfiere calor al medio. En el caso de los gases ideales, podemos sustituir el coeficiente de compresibilidad por la siguiente expresión: $\mathbf{B=\gamma . P_o}$. donde P_o es la presión del gas antes de sufrir cualquier perturbación, y γ el coeficiente adiabático, que relaciona los calores específicos a presión y volumen constante de la siguiente manera: $\gamma=\dfrac{C_p}{C_v}$, sabiendo que $P_o = \dfrac{RT}{V}$, para n =1 mol de gas y como además $\rho = \dfrac{M}{V}$, donde M es la masa molar, y sustituyendo en la ecuación nos queda la expresión: $v=\sqrt{\dfrac{\gamma RT}{M}}$, expresión que nos muestra como la velocidad de propagación del sonido en los gases depende de la temperatura.

INTENSIDAD DEL SONIDO Y SENSACIÓN SONORA

Se definió la intensidad de una onda como la cantidad de energía que llega por unidad de tiempo a la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación. Su ecuación es: $\mathbf{I} = \dfrac{E}{S.t}$

Si consideramos que el medio en el que se propaga el sonido es isótropo, los frentes de ondas sonoras emitidos por una fuente puntual son superficies esféricas. Aplicando las conclusiones derivadas del estudio de la energía transmitida por las ondas armónicas, obtuvimos la expresión:

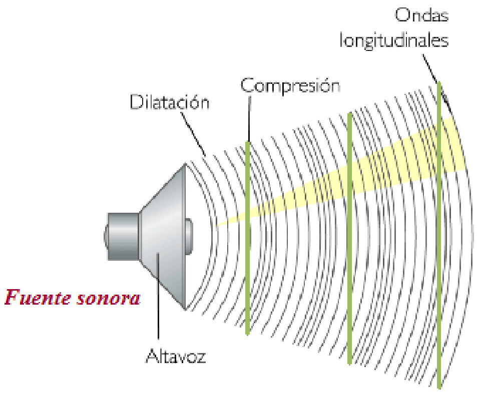
$$\mathbf{I} = \frac{\rho . w^2 . A^2}{2.t}$$

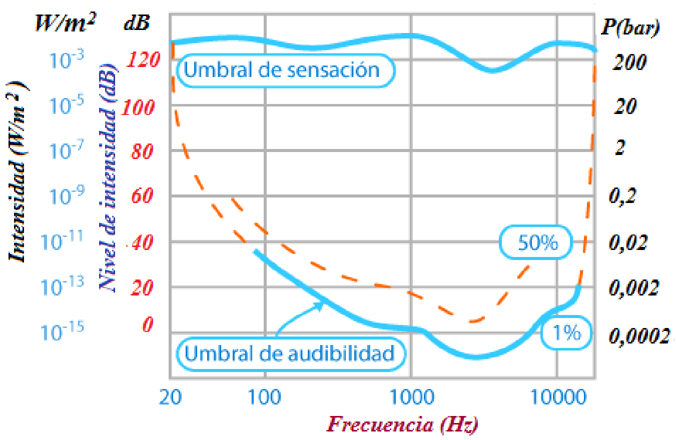
Por lo que podemos establecer que la intensidad del sonido:

a) Es proporcional al cuadrado de la amplitud y al cuadrado de la frecuencia angular.

b) Disminuye al alejarse del foco emisor conforme a $\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{r}^2}$, debido a que la amplitud es inversamente proporcional a la distancia al foco emisor.

La intensidad del sonido en un medio isótropo, en donde se propaga en todas las direcciones, sigue la ley del inverso del cuadrado de la distancia.





Teniendo en cuenta que en la propagación de sonido la amplitud puede contemplarse desde el punto de vista de la oscilación de las partículas del medio o de las variaciones de presión, se puede demostrar que la intensidad del sonido se relaciona con las variaciones de presión producidas por la fuente sonora según la expresión: I = $\frac{\Delta P}{2\rho v}$, donde ΔP representa los cambios de presión, que son equivalentes a la amplitud; ρ es la densidad del medio, que el caso del aire es de 1,22 kg/m^3, y v es la velocidad de propagación del sonido.

Como receptor de sonidos, el ido humano abarca un amplísimo espectro de intensidades, que van desde los casi imperceptibles 10^{-12} W/m^2, considerados como **umbral de audición**, hasta aproximadamente 1 W/m^2, que correspondería a una sensación auditiva dolorosa, por ejemplo la producida por una taladro neumático funcionando a dos metros de distancia. Por el contrario, la intensidad de una conversación en tono normal sería de unos 10^{-6}W/m^2.

INTENSIDAD SONORA-ESCALA

En general, cuando percibimos los sonidos, podemos distinguir entre sonidos fuertes y sonidos débiles, y esa percepción está relacionada con la intensidad. Esta relación, sin embargo dista mucho de ser lineal y, como veremos también depende de la frecuencia del sonido.

Debido al amplio rango de intensidades que abarca el oído humano, suele emplearse una escala logarítmica de intensidades relativas llamada **escala de nivel de intensidad.** De acuerdo con dicha escala, se define **nivel de intensidad, β, de una onda sonora, como:**

$$\boldsymbol{\beta = 10 \log \frac{I}{I_o}}$$ Los niveles de intensidad se miden en decibelios (dB)

Donde I es la intensidad de la onda sonora, e I_o es un nivel de referencia que se denomina intensidad umbral y cuyo valor es $I_o = 10^{-12}$ W/m^2.
Si en la expresión anterior consideramos que $I = I_o = 10^{-12}$W/m^2, el nivel de intensidad, β es de 0 decibelios, mientras que si elegimos I= 1 W/m^2, el nivel de intensidad nos queda:$\beta = 10 \log \frac{1}{10^{-12}}$
▯$\beta = 10 \log 10^{12}$ ▯$\beta = 10.12 = 120$ dB, que corresponde dicho nivel de intensidad al umbral del dolor.

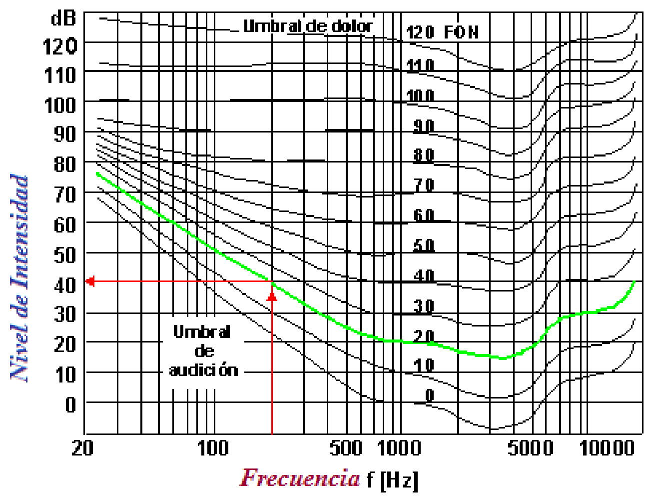
Nivel de intensidad (dB)	*Intensidad(W/m2)*	*Sonido*
0	10^{-12}	Umbral de audición
10	10^{-11}	Susurro de las hojas
20	10^{-10}	Cuchicheo (a 1 m de distancia)
30	10^{-9}	Casa tranquila
40	10^{-8}	Casa normal, oficina tranquila
50	10^{-7}	Oficina normal
60	10^{-6}	Conversación normal, tráfico normal
70	10^{-5}	Oficina ruidosa, calle animada
80	10^{-4}	Tráfico intenso, comedor escolar
90	10^{-3}	Ferrocarril subterráneo
100	10^{-2}	Taller de maquinaria, discoteca
120	10^{0}	Taladro neumático (a 2 m de distancia), avión comercial despegando; umbral del dolor
140	10^{2}	Avión a reacción (a 30 m de distancia)

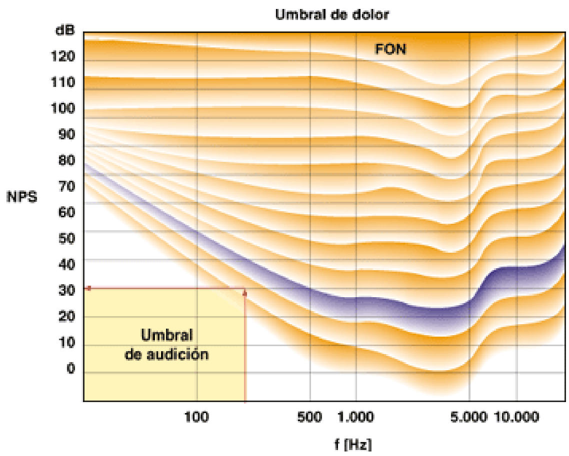
Niveles de intensidad e intensidades sonoras de diversas fuentes de sonido.

SENSACIÓN SONORA

La sensación sonora es el factor subjetivo que involucra los procesos fisiológicos y psicológicos que tienen lugar en el oído y en el cerebro. Esa sensación sonora nos lleva a calificar los ruidos como débiles, fuertes, desagradables etc. Dicha sensación, como se ha puesto de manifiesto en numerosos experimentos, no sólo depende de la intensidad, sino también de la frecuencia del sonido.

Representación gráfica de la sensación sonora frente a la frecuencia





Curvas de igual sonoridad o isofónicas

Las curvas corresponden a una misma sensación sonora y ponen de manifiesto la dependencia que existe entre sensación y frecuencia. Así, por ejemplo, si elegimos como sonido de referencia una señal de 1.000 Hz, con un nivel de intensidad de 40dB, resulta que el sonido es de 100 Hz con un nivel de intensidad de 62dB no produce la misma sensación sonora.

Igualmente, analizando las curvas, es posible observar de qué modo la dependencia de la sensación sonora con respecto a la frecuencia disminuye cuanto mayor sea el nivel de la intensidad, de manera que, a partir de unos 90dB, la sensación sonora apenas depende ya de la frecuencia salvo en la zona de mayor sensibilidad auditiva, que, como se ve en la figura de arriba, está comprendida entre los 3.000 y 4.00Hz.

La **sensación sonora** se mide en **fon** o **fonio**. Un sonido de una frecuencia determinada tiene una sensación sonora de un **fon**, cuando es percibido por el oído igual de intenso que un sonido de *1 dB* a la frecuencia de *1000 Hz*.

Mientras que la intensidad de un sonido es una medida invariante desde el punto de vista físico, el fon es una unidad físicamente variable que depende de la frecuencia del sonido.

De acuerdo con la definición de **fon**, a la frecuencia de 1.000 Hz el número de fonos y de decibelios coinciden, es decir 1 fon = 1 dB.

FENÓMENOS ONDULATORIOS DEL SONIDO

Las ondas sonoras, como ondas que son, también presentan las propiedades generales estudiadas, y por ello, pueden reflejarse, refractarse, interferir con otras ondas y difractarse.

LA REFLEXIÓN DEL SONIDO

En muchos museos de ciencia existen antenas parabólicas dispuestas a cierta distancia un afrente de la otra y cuando alguien habla con un tonote voz normal cerca de una de ellas, el sonido llega con nitidez al oído de otra persona situada en la otra antena. La razón es la siguiente: si el sonido se emitiese directamente al aire, en forma de ondas esféricas, su intensidad decrecería conforme a $1/r^2$. Si embargo, al dirigir el sondo hacia la antena parabólica, el fenómeno de reflexión, como puede comprobarse en la figura, hace que se propague en una misma dirección, evitando la amortiguación con la distancia. Posteriormente, la reflexión en la segunda antena hace converger el sonido en el oído de la otra persona, que lo escucha con claridad.

El mismo fenómeno explica el funcionamiento de un megáfono, cuya finalidad consiste en dirigir la voz en un cono de dirección limitado, evitando así la amortiguación por efecto de la distancia, tal como nos muestra la figura adjunta.
Esto explica, igualmente, por qué al juntar las manos en la boca en forma de altavoz nos hacemos oír a mayor distancia.
La reflexión del sonido de lugar a dos fenómenos interesantes: el eco y la reverberación

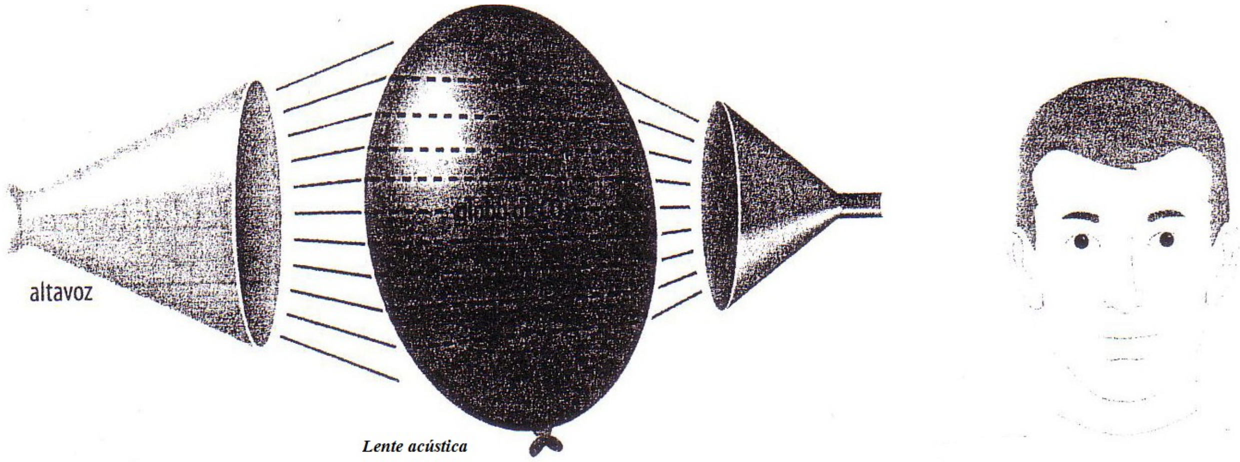
Eco.-El ser humano es capaz de distinguir entre dos sonidos si llegan a su oído con una diferencia de 0,1 segundo. Esto significa que, al considerar como valor de la velocidad del sonido el de 340m/s, podríamos distinguir entre dos sonidos simultáneos cuyas fuentes emisoras se encontrasen entre sí a una distancia de 34 m. En el caso de que nuestra propia voz se reflejase en una superficie, percibiríamos dos sonidos diferentes, eco, cuando la distancia mínima a la superficie reflectante fuese de 17 m, de modo que el sonido, el incidente más el reflejado, recorra los 34 m necesarios.

Reverberación.-Cuando el tiempo que tarda en llegarnos el sonido reflejado es menor que 0,1 segundos, no percibimos eco, pero sí un peculiar efecto sonoro, como si el sonido reflejado se superpusiera y alargase. Es esa extraña sensación que se produce al hablar en una habitación sin amueblar, donde las reflexiones del sonido con las paredes no llegan a producir eco, sino lo que se conoce como reverberación.
Este fenómeno de reverberación determina las cualidades acústicas o sonoras de los locales, y en muchas ocasiones s necesaria la existencia de cierta reverberación cuidadosamente calibrada para garantizar la adecuada acústica, como sucede en los auditorios.

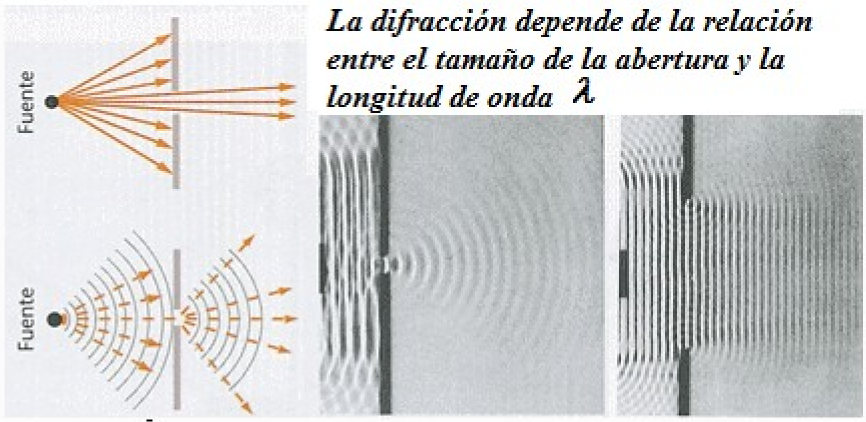
LA REFRACCIÓN DEL SONIDO
Hemos escuchado sonidos procedentes de alguna fuente que sabemos que está lejana, como la bocina de un tren o los altavoces de una orquesta. Lo peculiar de estos fenómenos es que, a tales distancias, sería normal que no nos llegara, pero en cambio los oímos.
Como ya hemos visto, y lo comprobamos en la figura adjunta, una onda se desvía de su trayectoria al pasar de un medio a otro cuya velocidad de propagación es diferente. Esto es lo que ocurre cuando un sonido es emitido en la superficie; al ascender sufre diversas refracciones debido a que, a medida que se aleja de la superficie, la temperatura de las distintas capas de aire aumenta, con lo que se incrementa también la velocidad de propagación. Estas diversas refracciones se producen, por tanto, con distinto ángulo de refracción, mayor a medida que aumenta la velocidad, lo que provoca la desviación de la trayectoria de la onda sonora hasta que ésta llega de nuevo al suelo. Esto hace que el sonido se oiga a grandes distancias. Este fenómeno es muy típico de las noches invernales, en las que las temperaturas del aire que está en contacto con la tierra es más baja.
Un caso muy curioso de refracción del sonido es el que se da en las llamadas **lentes acústicas**, cuyo principio de funcionamiento es idéntico al de las lentes ópticas. En la figura adjunta, el sonido emitido por un altavoz es recogido y escuchado a través de una trompetilla que tiene forma de embudo. Si entre el altavoz y la trompetilla intercalamos un globo lleno de CO_2, medio en el que la velocidad de propagación del sonido es menor, se producen refracciones que se indican

siguiendo el criterio visto en la unidad anterior. De este modo, el sonido es dirigido hacia la trompetilla y se escucha más amplificado que cuando no se intercala el globo

LA DIFRACCIÓN DEL SONIDO



Las ondas sonoras también dan lugar a fenómenos de difracción, es decir, bordean los objetos que se interponen en su camino. Dicho fenómeno es el responsable de que podamos escuchar el claxon de un coche a la vuelta de una esquina o de una curva cerrada. Es una práctica corriente hacer sonar el claxon cuando la curva no tiene la suficiente visibilidad, ahora bien si el sonido no tuviera naturaleza ondulatoria, de nada serviría esa costumbre. La figura adjunta ilustra, siguiendo el principio de Huygens, el fenómeno que permite oír sonidos producidos a la vuelta de la esquina.



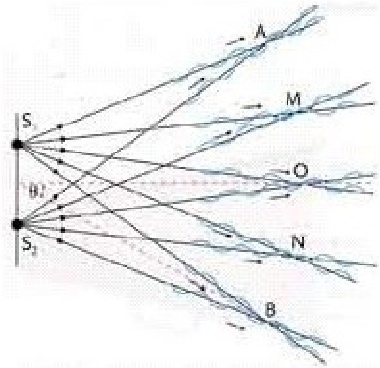
INTERFERENCIAS SONORAS

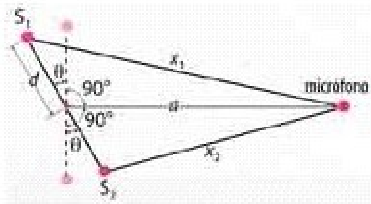
El siguiente experimento pone de manifiesto el fenómeno de interferencia del sonido, actuación simultánea de dos o más ondas sonoras, y sirve para determinar su longitud de onda.

Supongamos dos altavoces pequeños que actúan como focos emisores de sonido y que se hallan situados en los extremos de una misma caja hueca, para evitar otras posibles interferencias con la pared que se encuentra detrás. Dichos altavoces están conectados a un mismo generador electrónico de sonido, por lo que vibran en fase y envían al aire ondas idénticas. La caja, como se ve en la figura, tiene libertad para girar en torno a un eje vertical que pasa por cu centro. A cierta distancia de la caja se sitúa un micrófono que actuará como detector y que se encuentra conectado a un osciloscopio que nos muestra la onda resultante de la interferencia de ambos altavoces. A medida que la caja gira lentamente, da lugar a interferencias constructivas o destructivas que según lo visto en relación con la interferencia por diferencia de caminos recorridos, producirá máximos en los puntos A, B y O cuando las ondas lleguen en fase, y mínimos en los puntos M y N, cuando lleguen desfasados.

Si consideramos que la distancia entre las fuentes es lo suficientemente pequeña como para que ambas ondas tengan la misma amplitud en un punto alejado, y dado que la condición de máximos se da cuando la diferencia entre las distancias recorridas es un múltiplo entero de la longitud de onda, podemos decir que : $\mathbf{x_1\text{-}x_2= n\lambda}$, donde n = 0,1,2..

Así pues, si se hace rotar la caja un ángulo θ hasta que se produce el primer máximo, se cumplirá





que: $x_1\text{-}x_2 = \lambda$. Como se observa en la figura y aplicando el teorema de los cosenos:

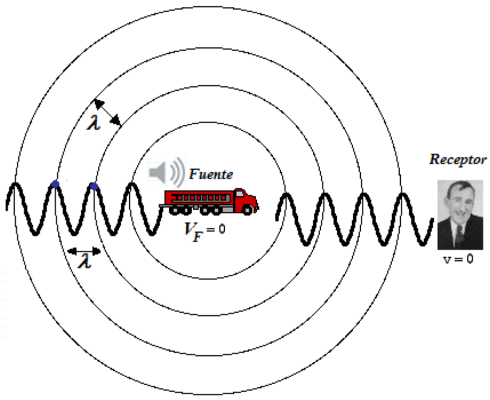
$$x_1^2 = d^2+a^2-2da\cos(90+\theta) \qquad x_2^2 = d^2+a^2-2da\cos(90-\theta)$$

Si conocemos los valores de d, a y θ podemos determinar los de x_1 y x_2 que nos permitirán calcular la longitud de onda λ del sonido emitido.

EFECTO DOPPLER

El pitido de un tren que se aproxima a nosotros es más agudo, mientras que se hace más grave a medida que se aleja, lo mismo se nota cómo cambia el sonido de la bocina de un coche que se acerca, pasa a nuestro lado y finalmente se aleja. Todos estos fenómenos están relacionados con el efecto Doppler, llamado así en honor a su descubridor, el físico austríaco Christian Doppler(1803-1853), consiste en la variación de la longitud de ondas de cualquier tipo de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento

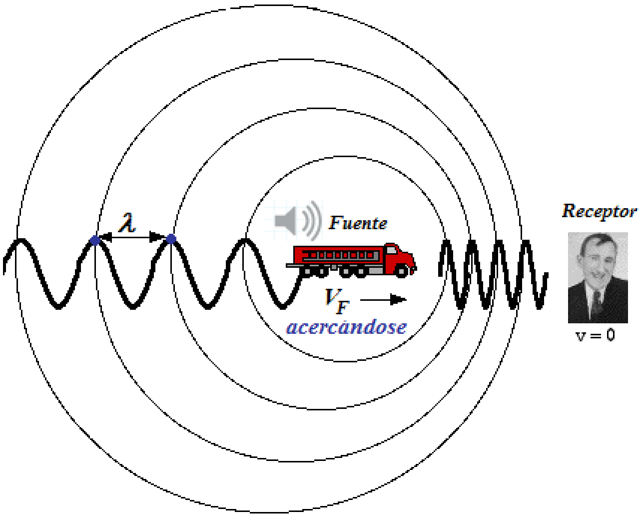
Trataremos de explicar por qué cambia el tono o frecuencia del sonido que se percibe cuando la fuente sonora o el propio observador, o ambos a la vez, se encuentran en movimiento.

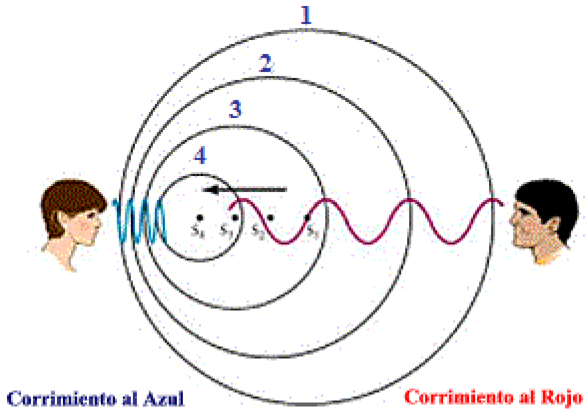


Se conoce como efecto Doppler el fenómeno debido al movimiento relativo de la fuente sonora y el observador por el que cambia la frecuencia que se percibe de un sonido.

Fuente sonora en movimiento y observador en reposo

Imaginemos una fuente sonora F que se desplaza hacia la derecha. Si al cabo de un tiempo t representamos la situación de los distintos frentes de onda, obtendremos una gráfica como la que nos muestra la figura adjunta.





En ella se aprecia que los frentes de onda no son circunferencias concéntricas; por el contrario, la separación entre las ondas es menor en el lado hacia el que se mueve la fuente sonora y mayor en el opuesto. Esto se traduce en que, para un observador que se hallase en reposo a la derecha y que viera acercarse la fuente, la longitud de onda efectiva sería menor y, en consecuencia, la frecuencia mayor que la que correspondería al sonido emitido por la fuente si ésta estuviera en reposo. Es decir percibiría un tono más agudo.

Si la fuente se mueve con una velocidad v_F y v es la velocidad del sonido en el medio, la Velocidad aparente de de propagación de las ondas para ese observador será $v-v_F$ y, por tanto, la longitud de onda que medirá aquél será menor. En lugar de ser $\lambda = v.T$, como correspondería a una situación de reposo, tendremos la ecuación:

$$\lambda' = (v-v_F).T = \frac{v-v_F}{f}$$

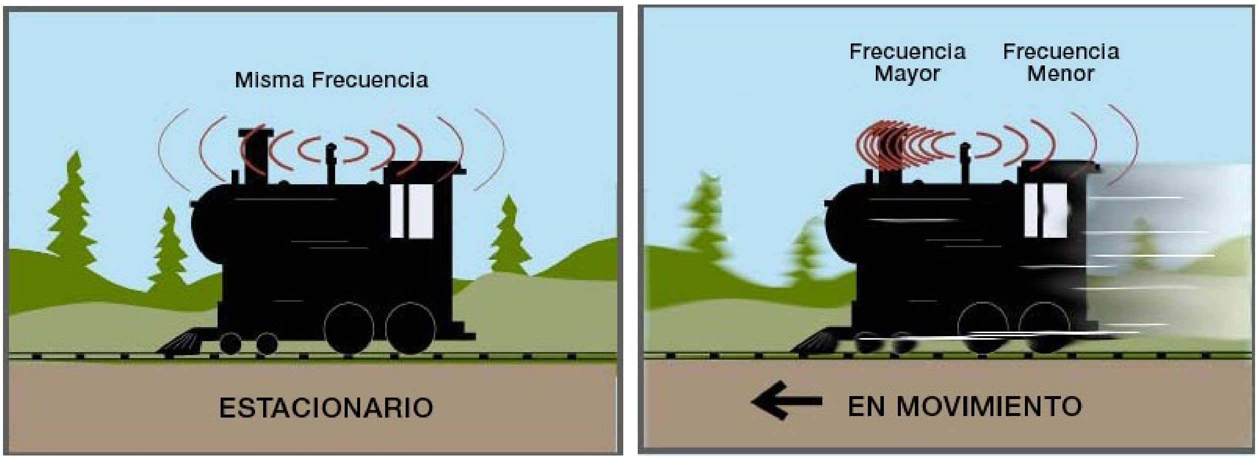
Por su parte, la frecuencia que percibirá el observador hacia el que se acerca la fuente será:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f\left(\frac{v}{v-v_F}\right) \Rightarrow f' = f\left(\frac{v}{v-v_F}\right)$$ siendo f' >f, como habíamos previsto.

Por el contrario, para el observador que se hallase en reposo a la izquierda y que viera la fuente alejándose, la longitud de onda sería mayor y la frecuencia menor, por lo que percibiría un tono más grave. En este caso la longitud de onda es: $\lambda' = (v+v_F).T = \frac{v+v_F}{f}$

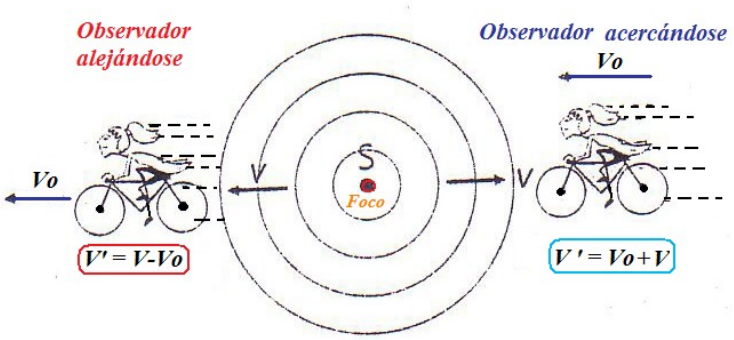
Y la frecuencia que percibirá el observador a medida que la fuente se aleja es: $f' = f\left(\frac{v}{v+v_F}\right)$ donde f' <f , lo que corresponderá a un tono más grave que el original.

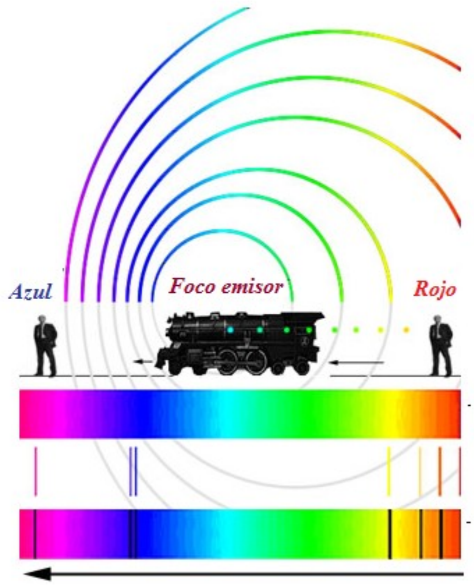
Las frecuencias del sonido varían según el tren se acerque o se aleje



Fuente sonora en reposo y observadores movimiento

Como puede verse en la figura de abajo, la modificación que experimenta el tono en este caso no se debe a la variación de la longitud de onda, que siempre será la misma, sino a la distinta velocidad con a que llegan al observador los frentes de onda según se acerque o se aleje de la fuente sonora.





f’ $\frac{v'}{\lambda}=\frac{v+v_o}{v/f}$ es decir f’ =f($\frac{v+v_o}{v}$), por tanto f’>f el observador percibe el sonido más agudo, como ocurría cuando la fuente se acercaba a él.

Si el observador se aleja de la fuente, la velocidad a la que le llegan los frentes de onda será v’ $=v-v_o$, por lo que, de un modo análogo al anterior, llegamos a que f’=f($\frac{v-v_o}{v}$) , por tanto, f’<f, por lo que el observador percibirá un sonido más grave, al igual que cuando la fuente se alejaba de él.

Fuente sonora y observador en movimiento

Combinando los casos anteriores, obtenemos que la frecuencia percibida por el observador cuando **la fuente y observador se acercan al mismo tiempo** es:

$$f' = f\left(\frac{v + v_o}{v - v_F}\right)$$

Y si **el observador y la fuente se alejan a la vez**, la frecuencia será: $f' = f\left(\frac{v - v_o}{v + v_F}\right)$

Podemos llega a una ecuación general, que luego nosotros analizamos y le damos los signos correspondientes: $f' = f\left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_F}\right)$

Siendo v la velocidad de sonido en el medio, v_o, la velocidad del observador y v_F la velocidad del foco.

Cuando el observador y el foco se acercan, es el caso más favorable, luego los signos son: + en el numerador y - en el denominador.

Cuando los dos se alejan, el caso más desfavorable, - en el numerador y + en el denominador.

Si el observador se acerca y el foco se aleja, + en el numerador y – en el denominador

Si el observador se aleja y el foco se acerca, - en el numerador y + en el denominador

El efecto Doppler tiene muchas aplicaciones prácticas, una de ellas son los sistemas de radar aplicados al tráfico, que permiten medir la velocidad a la que se mueve un vehículo. Se envía radiación de una determinada frecuencia f, que, al reflejarse en el objeto en movimiento, es devuelta con otra frecuencia ligeramente distinta f'. Midiendo luego las pulsaciones que se producen al interferir entre sí ambas ondas, puede determinarse la velocidad del vehículo: $f' = f\left(\frac{v \pm v_v}{v}\right)$ v_v= velocidad vehículo.

En el campo de las ondas luminosas, una de las consecuencias que más implicaciones tiene en las teorías que explican el cosmos es el llamado efecto Doppler cosmológico.

Cuando se registra el espectro de un objeto celeste en dos momentos diferentes, suele ocurrir que las líneas del espectro aparecen desplazadas hacia frecuencias menores, **corrimiento hacia el rojo,** si el objeto se aleja de nosotros, o hacia frecuencias mayores, **corrimiento hacia el azul**, si el objeto se acerca hacia nosotros. Midiendo esos corrimientos, puede determinarse la velocidad relativa del objeto en cuestión.

No obstante, dado que las ondas luminosas se propagan a una velocidad enorme, el efecto Doppler es, en este campo, insignificante y sólo se aprecia cuando la velocidad del foco se aproxima a la de la luz.

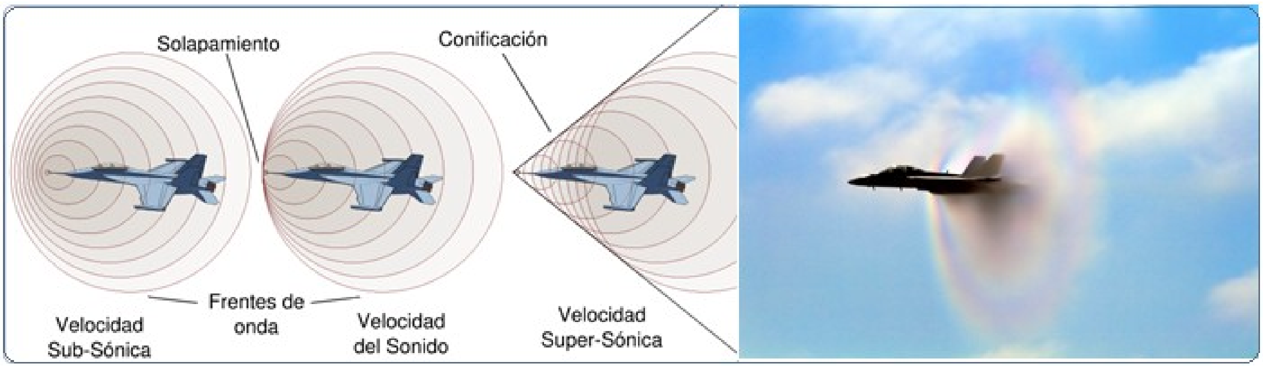
LA BARRERA DEL SONIDO

Si una fuente sonora se mueve con una velocidad igual a la de propagación de los frentes de onda que emite, tendremos la situación que se ilustra en la figura adjunta.

En ese instante, los frentes de onda tangentes constituyen una barrera que opone gran resistencia a ser atravesada. No obstante, si la fuente supera la velocidad del sonido, seguirá moviéndose sin problemas, pero ahora los frentes de onda aparecerán superpuestos y formarán un frente cónico conocido como onda de choque u onda de Mach. Cuando estas ondas de choque llegan a tierra, se percibe un estampido bastante desagradable en forma de explosión. La relación entre la velocidad de la fuente v_F y la velocidad del sonido v se conoce como número Mach.

$$\textbf{Número Mach} = \frac{v_F}{v}$$

Esta imagen corresponde al momento en que un avión rompe la barrera del sonido formando un fenómeno conocido como “nube de Prandtl-Glauert”.



El fenómeno de Prandtl-Glauert es un punto en el que ocurre una caída repentina de la presión del aire y se considera como la causa de la famosa nube de condensación visible que aparece cuando un avión atraviesa la barrera del sonido. Se trata de un ejemplo de singularidad matemática en aerodinámica.

CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

Tanto los organismos internacionales como los centros de investigación en materia acústica recomiendan que el sonido ambiental no supere los 65dB. Los estudios que se han llevado a cabo hasta el momento demuestran que exposiciones más o menos prolongadas a niveles de intensidad superiores no solamente pueden acarrear problemas auditivos, como la pérdida irreversible de la capacidad auditiva, sino también otras complicaciones, como irritabilidad, falta de concentración, estrés, fatiga, alteraciones respiratorias, problemas digestivos etc.
El problema de contaminación acústica tiene su máxima expresión en zonas urbanas, en especial en aquellos puntos en los que la densidad del tráfico es elevada, y en áreas colindantes con aeropuertos. Los niveles de intensidad de ruido recomendados se superan ampliamente tanto en locales de ocio, como discotecas, pubs, etc, como en numerosos centros laborales e industriales. A este respecto, la contaminación acústica se ha convertido en uno de los problemas contemplados en las normativas de seguridad e higiene en el trabajo.
Las medidas contra la contaminación acústica suelen ser de dos tipos:

-Pasivas. No actúan contra los focos emisores, sino que tratan de amortiguar la propagación del sonido o su impacto. Ejemplos de estas medidas serían la insonorización de locales o viviendas, los muros de apantallamiento levantados en vías urbanas, las barreras verdes, arbolado denso o las medidas de protección individual en el trabajo, como el empleo de cascos antirruido.

-**Activas**. Actúan contra los focos emisores de ruido. En esta línea se engloban el uso de silenciadores y filtros para reducir la emisión de ruidos en los motores, así como las investigaciones para la optimización de los mismos. También pertenecen a este tipo de medidas las tendentes a fomentar el transporte público o a reducir o prohibir el tráfico rodado en algunas zonas de los cascos urbanos.

No cabe duda de que resulta necesario aplicar ambos tipos de medidas en las zonas urbanas e industriales. Sin embargo, sería deseable que en la lucha contra la contaminación acústica se otorgara preferencia a las iniciativas de tipo activo.

España es uno de los países más ruidosos del mundo, y Andalucía, a su vez, es una de las regiones más ruidosas de España.