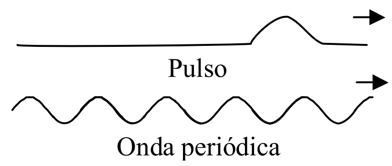
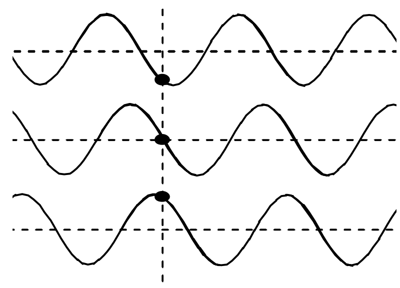
Movimiento ondulatorio.

El movimiento ondulatorio es un proceso por el que se propaga energía de un lugar a otro sin transporte de materia. Se propaga a través de la perturbación de una propiedad del medio que se traslada por el medio sin transporte del medio.

Una onda en la superficie del agua es un cambio en el nivel del agua que se propaga por el agua sin transportar agua, una onda sonora es una perturbación de la presión del aire que se propaga a través del aire, sin transportar aire.



Si tenemos una perturbación aislada que se mueve por el medio, hablamos de un pulso, si tenemos una sucesión de pulsos hablamos de una onda, si esta sucesión de pulsos se repite a iguales intervalos de tiempo hablamos entonces de una onda periódica



Todo punto alcanzado por una onda periódica experimenta un desplazamiento periódico, u oscilación, alrededor de una posición de equilibrio. Puede ser la oscilación de moléculas de aire, como en el caso del sonido que viaja por la atmósfera, de moléculas de agua (como en las olas que se forman en la superficie del mar) o de porciones de una cuerda o un resorte.

En todos estos casos, las partículas oscilan en torno a su posición de equilibrio y sólo la energía avanza de forma continua.

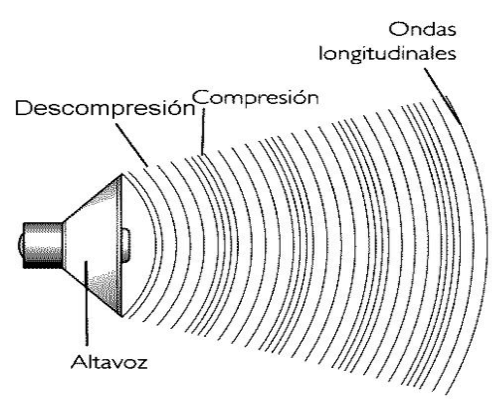
Estas ondas se denominan mecánicas porque la energía necesita de un medio material para transportarse, y sin él no lo haría. El sonido necesita del aire para propagarse y no puede hacerlo en el vacío.

Las ondas electromagnéticas, en cambio, no requieren un medio material para su propagación y pueden propagarse por el vacío. En este caso las oscilaciones corresponden a variaciones en la intensidad de campos magnéticos y eléctricos. Estas ondas, al poderse trasladar por el vacío, no son ondas mecánicas.

Tipos de ondas

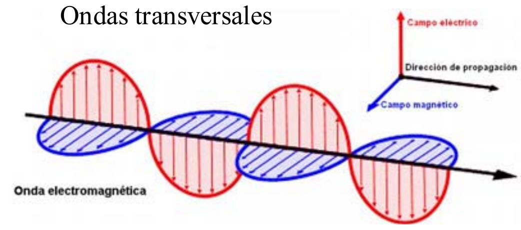
Las ondas se clasifican según la dirección de los desplazamientos de las partículas en relación a la dirección del movimiento de la propia onda. Si la vibración es paralela a la dirección de propagación de la onda, la onda se denomina longitudinal. Una onda longitudinal siempre es mecánica y se debe a las sucesivas compresiones (estados de máxima densidad y presión) y enrarecimientos o descompresión (estados de mínima densidad y presión) del medio.

Las ondas sonoras son un ejemplo típico de esta forma de movimiento ondulatorio. El movimiento oscilatorio de las moléculas de aire en la dirección de la propagación genera zonas de compresión y zonas de descompresión del aire que se van alejando, por el aire, de la fuente del sonido.

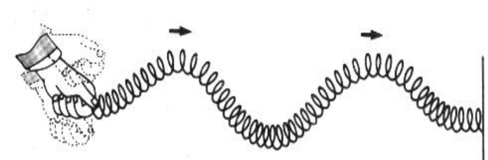


Otro tipo de onda es la onda transversal, en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Las ondas transversales pueden ser mecánicas, como las ondas que se propagan a lo largo de una cuerda o un resorte tenso cuando se produce una perturbación en uno de sus extremos o electromagnéticas, como la luz, los rayos X o las ondas de radio. En esos casos, las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.

Ondas transversales



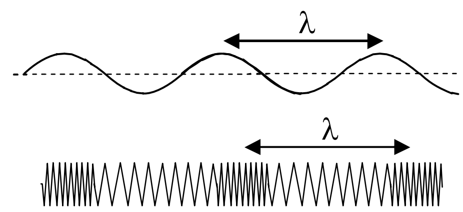
Algunos movimientos ondulatorios mecánicos, como las olas superficiales de los líquidos, pueden ser combinaciones de movimientos longitudinales y transversales, en este caso las partículas de líquido se mueven de forma circular.



Características del movimiento ondulatorio

Longitud de onda (λ)

En una onda transversal, la longitud de onda (λ) es la distancia entre dos crestas o valles sucesivos.



En una onda longitudinal, corresponde a la distancia entre dos compresiones o entre dos enrarecimientos sucesivos.

Frecuencia y período

La frecuencia (f) de una onda periódica es el número de vibraciones por segundo que experimenta un punto alcanzado por ella y el período (T) es el tiempo que dura cada vibración. El período y la frecuencia son siempre uno el inverso del otro. $f = \frac{1}{T}$ y por lo tanto $T = \frac{1}{f}$. El período se mide en unidades de tiempo, en general manejaremos la unidad segundos. La frecuencia se mide en Hertz (Hz) que es lo mismo que decir oscilaciones en cada segundo. Como unidad de medida es 1Hz = 1/s.

Relación entre longitud de onda y frecuencia.

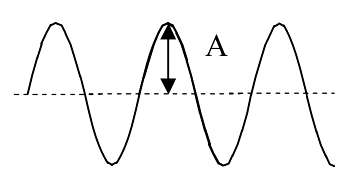
Si generamos una onda periódica estableciendo una sucesión de pulsos a intervalos regulares de tiempo, la distancia entre pulsos (a la que llamamos longitud de onda) será igual a la velocidad con la que se propaga el pulso por el tiempo entre pulsos sucesivos (período). $\lambda = v \cdot T$

Dado que la frecuencia es la inversa del período, podemos decir que la longitud de onda depende de la velocidad de propagación de la onda e inversamente de su frecuencia, su valor resulta del cociente entre la velocidad de propagación de la onda y la frecuencia. $\lambda = \frac{v}{f}$

La velocidad de propagación de la onda puede calcularse, por lo tanto, como la longitud de onda multiplicada por la frecuencia. $V = \lambda \cdot f$. (Atención, la velocidad puede calcularse a partir de λ y de f pero de ninguna manera depende de ellas. La velocidad de una onda sólo depende de las características del medio en el que se mueve).

Amplitud de onda.

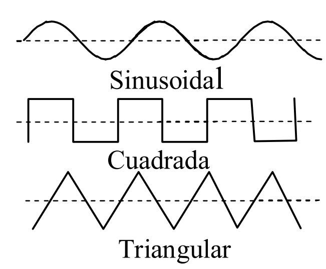
En el caso de una onda mecánica, su amplitud (A) es el máximo desplazamiento, respecto a la posición de equilibrio, de las partículas que vibran.



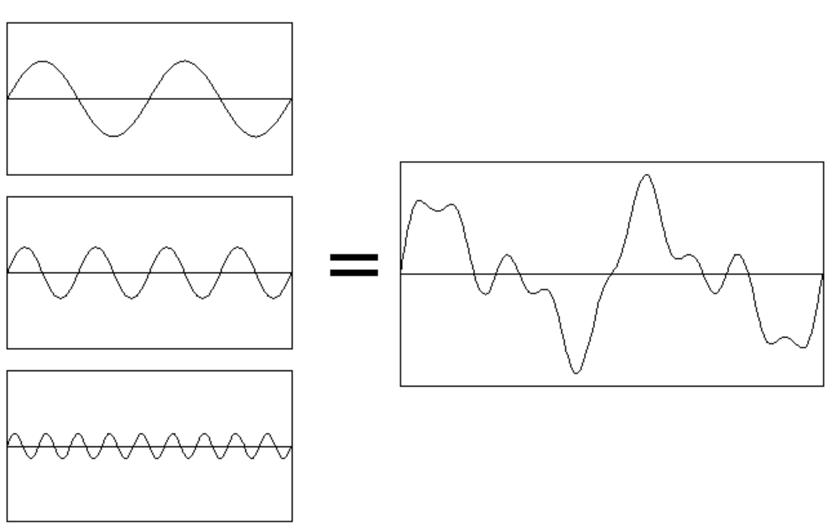
En una onda electromagnética, su amplitud es la intensidad máxima del campo eléctrico o del campo magnético.

Perfil de la onda

Las ondas, en general pueden tener distintas formas, ondas sinusoidales, ondas cuadradas, ondas triangulares, etc.



Pero, resulta que toda forma de onda, por más compleja que esta sea, puede ser formada por la superposición de una serie de ondas sinusoidales con longitudes de onda, amplitud y fases apropiadas.



En este ejemplo si sumamos punto a punto las tres ondas sinusoidales a la izquierda del dibujo obtenemos como resultado la onda de forma compleja de la derecha del dibujo.

Si tenemos una onda compleja, podremos también descomponerla en un conjunto de ondas sinusoidales que serían sus componentes. El procedimiento mediante el cual una forma de onda compleja es descompuesta en las ondas sinusoidales que la componen, se llama análisis de Fourier en honor al matemático francés que en el siglo XIX estudió el tema.

Comportamiento de las ondas

a.- Velocidad.

Como ya se dijo, la velocidad de una onda siempre depende de las características del medio y no de la longitud de onda o de la frecuencia. En el caso de una onda mecánica la velocidad de propagación depende de la elasticidad y densidad del medio.

* Por ejemplo en una onda transversal a lo largo de una cuerda tensa, la velocidad depende solo de dos variables, que son, la tensión de la cuerda y su densidad lineal o sea, su masa por unidad de longitud.

-La velocidad de la onda en una cuerda es $\boxed{v = \sqrt{\frac{Ts}{\mu}}}$ donde Ts es la tensión de la cuerda expresada en Newtons y μ es la densidad lineal de la cuerda expresada en Kg/m. La densidad lineal de la cuerda es el cociente entre la masa de la cuerda y su largo con $\mu = \frac{m_c}{l_c}$.

Si cuadruplicamos la tensión de la cuerda la velocidad se duplica, si usamos una cuerda con el cuádruple de la densidad lineal la velocidad se reduce a la mitad.

** La velocidad del sonido en un gas a T=0ºC puede calcularse como: $\boxed{V = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}}$ donde P es la presión del gas en Newton/m^2, ρ es la densidad del gas en Kg/m^3 y γ es la constante adiabática del gas cuyo valor depende del número de átomos por molécula del gas en cuestión.

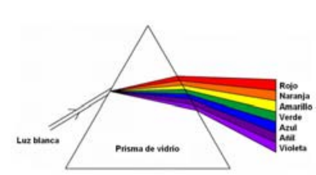
γ = 1,67 para gases de moléculas monoatómicas como podría ser el Helio o el Neón.
γ = 1,40 para gases de moléculas biatómicas, como ser el Oxígeno o el Nitrógeno (este es el valor aplicable al aire que es una mezcla de gases de moléculas biatómicas en su mayor proporción)
γ = 1,27 para gases de moléculas poliatómicas, como por ejemplo el Anhídrido carbónico, (n>2)

Aunque no lo parezca la velocidad resulta independiente de la presión, puesto que si cambia la presión de un gas también varía en la misma proporción su densidad. Por esto, para el cálculo de la velocidad, se utilizan simplemente los valores de P y ρ para 1 Atm de presión.

Esta velocidad en cambio depende de la temperatura del gas, ya que al cambiar esta también cambia la relación entre presión y densidad. Si aumenta la temperatura y el gas se expande, disminuye su densidad y la velocidad aumenta. Si el gas está en un recipiente que no le permite expandirse y lo calentamos, aumenta su presión y también aumenta su velocidad.

La velocidad del sonido en el aire podemos decir que aumenta en 6,0m/s por cada 10ºC de aumento de temperatura respecto a 0ºC.

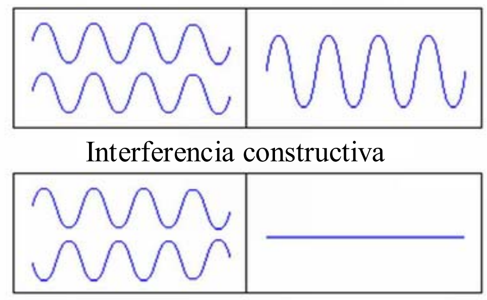
*** La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío (entre ellas la luz) es constante y su valor es de aproximadamente 300.000 km/s y es independiente de la frecuencia de la onda. Al moverse por un medio material transparente esta velocidad disminuye dependiendo del medio y nunca es mayor que en el vacío. (Viajando a través del vidrio la luz viaja a unos 200.000km/s, a través del diamante a unos 124.000km/s). Además al viajar por un medio material su velocidad de propagación pasa a depender también de la frecuencia de la onda. En el vidrio por ejemplo, la velocidad de la luz roja, de menor frecuencia, es ligeramente mayor que la velocidad de la luz azul, de mayor frecuencia. Esto último es responsable del fenómeno de la dispersión, que por ejemplo, permite a un prisma descomponer a la luz blanca en las ondas correspondientes de distintas frecuencias.



Superposición de ondas.

Cuando dos ondas se superponen en un punto, el desplazamiento resultante de ese punto es la suma de los desplazamientos individuales producidos por cada una de las ondas. Si los desplazamientos van en el mismo sentido, ambas ondas se refuerzan; si van en sentido opuesto, se debilitan mutuamente. Este fenómeno se conoce como interferencia. Si se en el punto se refuerzan hablamos de interferencia constructiva en el punto, si en el punto se debilitan hablamos de interferencia destructiva en el punto. Según las características de las dos ondas superpuestas las ondas resultantes podrán tener características muy diversas.

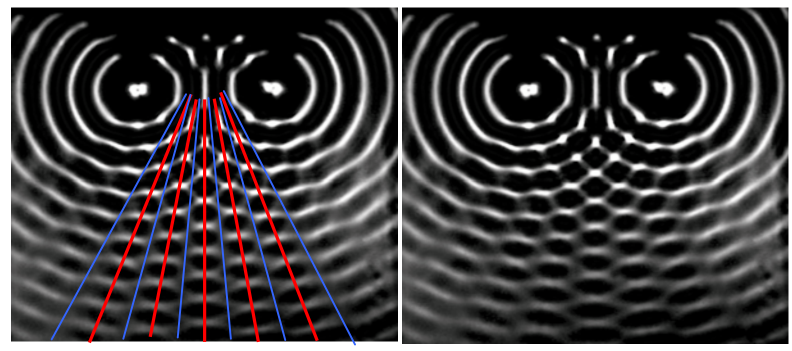
Interferencia de ondas



Si dos ondas de igual frecuencia, que viajan en la misma dirección, en el mismo sentido y con la misma velocidad se superponen, se obtiene una onda de igual frecuencia que las dos superpuestas. Si las dos ondas superpuestas estaban en fase (coinciden cresta de una con cresta de la otra, valle de una con valle de la otra) el resultado tiene una amplitud suma de las amplitudes de las ondas sumadas (Interferencia constructiva). Si estaban en contrafase (cresta de una coincidiendo con un valle de la otra), el resultado tiene una amplitud que es la diferencia de las amplitudes (Interferencia destructiva). Con desfasajes intermedios la amplitud resultante tendrá valores entre los dos extremos.

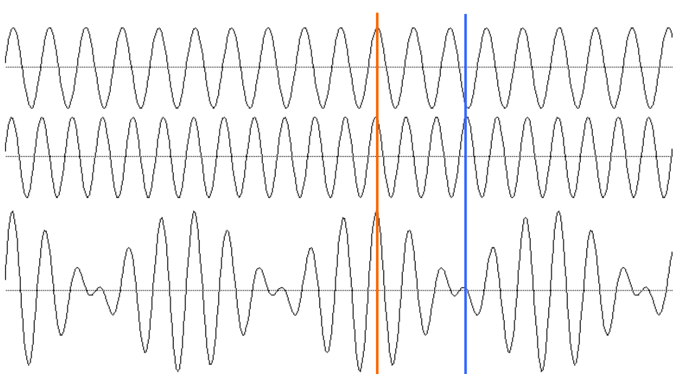
Si las ondas que se superponen se mueven es dos dimensiones, con un frente de onda circular, (como lo harían ondas en la superficie del agua si tocáramos con un dedo en esa superficie) se genera un patrón de interferencia como el de la siguiente foto. En este caso encontramos regiones, a las que llamamos líneas antinodales, donde se genera una interferencia constructiva. En otras regiones, a las que llamamos líneas nodales, se genera una interferencia destructiva.

Líneas nodales en azul



Líneas antinodales en rojo

Batido

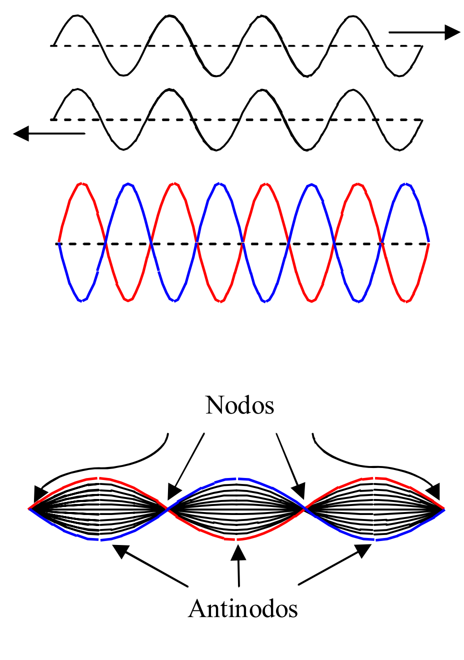


Cuando se superponen dos ondas sinusoidales de igual amplitud y de frecuencias ligeramente diferentes, unos pocos Hz de diferencia, se produce el fenómeno llamado batido o pulsación. El resultado de esta superposición es una onda con una frecuencia igual al promedio entre las frecuencias de las dos ondas que se superpusieron y con una amplitud que varía entre la suma y la resta de las amplitudes de las ondas antedichas. Esta amplitud tiene una frecuencia de variación igual a la diferencia de frecuencias de las dos ondas sumadas.

En el ejemplo ilustrado la onda sinusoidal superior tiene menor frecuencia que la onda sinusoidal del medio. Cuando estas dos ondas se suman, la resultante es la onda representada en el nivel inferior. En la imagen se puede ver dónde las dos primeras ondas interfieren constructivamente (a) y dónde interfieren destructivamente (b). Los máximos en la onda inferior son las pulsaciones que podemos escuchar. Estas pulsaciones son periódicas, su frecuencia es igual a la diferencia de frecuencias de las dos ondas sumadas.

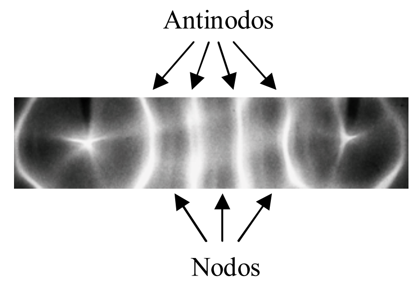
Ondas estacionarias

Cuando en un medio ilimitado interfieren dos ondas de igual amplitud, longitud de onda y velocidad, que se propagan sobre la misma dirección pero en sentidos opuestos, se produce una situación muy particular: la onda resultante tiene una amplitud que varía de punto a punto, pero cada uno de los puntos se mueve con un movimiento oscilatorio en fase con los demás, dando lugar a lo que se conoce como ondas estacionarias.



Esta onda es llamada estacionaria puesto que las crestas y valles resultantes no se desplazan por el medio como lo harían en una onda viajera. De hecho algunos puntos oscilarán con una amplitud que será la diferencia entre las amplitudes de las dos ondas, o sea cero, estos puntos se denominan nodos. Otros puntos en cambio oscilarán de arriba abajo con una amplitud que será la suma de las amplitudes de las dos ondas, estos puntos se denominan antinodos. Los puntos intermedios entre nodos y antinodos oscilan con amplitudes intermedias entre ambos. La distancia entre dos nodos consecutivos corresponde a ½ longitud de onda.

Estas ondas estacionarias podemos observarlas en muchos casos. Si mediante dos generadores puntuales, separados entre si, producimos, en la superficie del agua, dos ondas periódicas de igual frecuencia, podremos observar una onda estacionaria en el segmento que une las dos fuentes puntuales. Veremos que allí a diferencia de lo que pasa en el resto de la superficie del agua las regiones que podemos identificar no se trasladan por la superficie del agua.



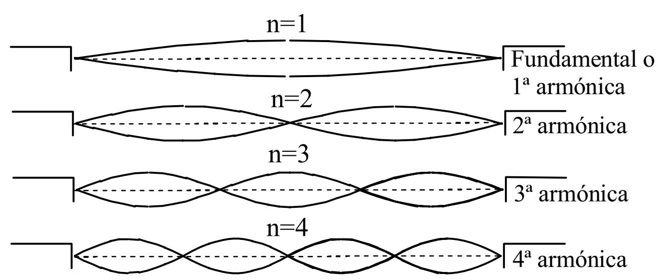
Ondas estacionarias en cuerdas fijas por ambos extremos.

Las ondas estacionarias pueden observarse en una cuerda sujeta por ambos extremos en la que se produce una vibración. La onda que viaja hacia la derecha se encuentra con la que se refleja en el extremo fijo y se produce la interferencia de ambas. Si suponemos que la reflexión es perfectamente eficiente, la onda reflejada estará media longitud de onda retrasada con respecto a la onda inicial. Se producirá interferencia entre ambas ondas y el desplazamiento resultante en cualquier punto y momento será la suma de los desplazamientos correspondientes a la onda incidente y la onda reflejada.

En los puntos en los que una cresta de la onda incidente coincide con un valle de la reflejada, no existe movimiento; estos puntos corresponden a los nodos. A mitad de camino entre dos nodos, las dos ondas están en fase, es decir, las crestas coinciden con crestas y los valles con valles; en esos puntos, la amplitud de la onda resultante es dos veces mayor que la de la onda incidente, estos puntos corresponden a los antinodos. La cuerda queda dividida por los nodos en secciones de media longitud de onda. Entre los nodos (que no avanzan a través de la cuerda), la cuerda vibra transversalmente.

En este caso de la cuerda fija en ambos extremos no se establecen ondas estacionarias para cualquier frecuencia de vibración, sólo podrán establecerse ondas estacionarias para aquellas frecuencias que produzcan nodos en los extremos de la cuerda ya que estos no pueden moverse por estar fijos.

Si hay un solo antinodo decimos que la cuerda oscila en su modo fundamental o modo 1, si lo hace con dos antinodos lo hará en el modo 2 o segundo armónico, si hay tres antinodos será modo 3 o tercer armónico. En la ilustración n es el número de antinodos.



Cuando tenemos una onda estacionaria en una cuerda fija en ambos extremos, su longitud de onda resulta ser el doble del largo de la cuerda dividido el número de antinodos presente.

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

Si la cuerda oscila en el modo 1, la longitud de onda es el doble de la longitud de la cuerda, si oscila en el modo 2, la longitud de onda es igual al largo de la cuerda, en el modo 3, a los dos tercios del largo, etc.

Como ya vimos, la velocidad de la onda en una cuerda es $v = \sqrt{\frac{Ts}{\mu}}$ y como podemos hallar la frecuencia de una onda como $f = \frac{v}{\lambda}$, entonces las frecuencias en las que se establece una onda estacionaria en una cuerda serán $f = \dfrac{\sqrt{\frac{Ts}{\mu}}}{\frac{2L}{n}}$ o, lo que es lo mismo $\boxed{f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{Ts}{\mu}}}$.

Ondas estacionarias en tubos

También puede observarse la formación de ondas estacionarias en tubos abiertos por los dos extremos, cerrados por un extremo o eventualmente cerrado por ambos extremos. En estos casos la onda se establece en el aire contenido en el tubo, por lo que la velocidad de la onda será la del sonido en el aire.

Esto podemos lograrlo si mediante un diapasón, un parlante, una boquilla o simplemente golpeando sobre la boca del tubo, generamos una vibración en la columna de aire contenida en él.

Cuando esta onda sonora se propaga en el aire dentro de un tubo, al llegar a un extremo del mismo, se refleja, de igual manera que las ondas transversales se reflejan en una cuerda cuando llegan al extremo de esta. La onda reflejada también viaja por el tubo con la misma frecuencia que la onda incidente, y da lugar a nuevas reflexiones. Estas ondas reflejadas están desfasadas entre sí y con respecto a la onda incidente.

La superposición de la onda incidente y las reflejadas produce una onda estacionaria. Para ciertas frecuencias, el desfase entre las ondas que viajan por el tubo es tal que la amplitud de la onda estacionaria resultante es muy grande, dando lugar a una onda estacionaria resonante.

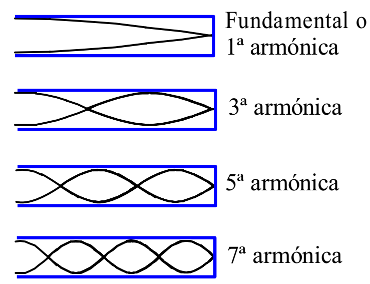
Como ya vimos una onda sonora consiste en una serie de compresiones y descompresiones del medio en el que se propaga. En la onda estacionaria resultante hay puntos donde el medio no vibra y reciben el nombre de nodos de desplazamiento, y puntos donde la amplitud de la vibración del medio es máxima, y reciben el nombre de antinodos de desplazamiento.

Las frecuencias para las que se forman ondas estacionarias resonantes en un tubo dependen de si éste tiene los dos extremos abiertos, si uno de ellos está cerrado o si ambos están cerrados,

Tubos cerrados por un extremo

Si el tubo está abierto por un extremo y cerrado por el otro, se genera una onda estacionaria resonante si se establece un nodo en el extremo cerrado y un antinodo en el extremo abierto.

Las longitudes de onda para las cuales es esto posible son aquellas donde, como muestra el dibujo, $L = 1/4\lambda$ o $L = 3/4\lambda$ o $L = 5/4\lambda$ etc.



Si lo generalizamos podemos decir:

$$\lambda = \frac{4L}{2n-1} \quad \text{con } n=1,2,3,4\ldots\text{y } L \text{ el largo del tubo.}$$

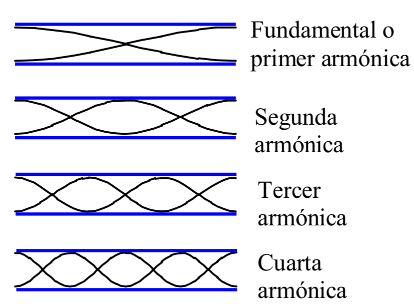
Y las frecuencias para estos modos de oscilación serán:

$$f = \frac{(2n-1)}{4L} \times v$$ donde v es la velocidad del sonido en el medio.

Cuando (2n-1)=1 la frecuencia es la fundamental del tubo, cuando (2n-1)=3 la frecuencia corresponde a la tercera armónica del tubo, cuando (2n-1)=5 a la quinta y así sucesivamente.

Se observará que sólo son los armónicos impares.

Tubo abierto en ambos extremos



En este caso se genera una onda estacionaria resonante si se establece un antinodo en cada extremo abierto del tubo. Esta condición resulta en una serie armónica similar al caso de la cuerda fija en ambos extremos.

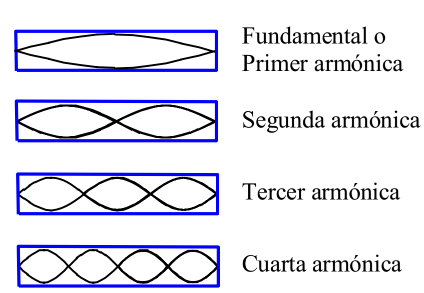
Las longitudes de onda corresponderán a $\lambda = \frac{2L}{n}$ con n=1,2,3,4……

Las frecuencias de resonancia para un tubo abierto en ambos extremos resultarán $f = \frac{n}{2L} \times v$ con n = 1,2,3,4…… y v la velocidad del sonido en el medio.

Ejemplo: Tenemos un tubo de 1,50m de largo, abierto en ambos extremos y la temperatura es de 20ºC. La velocidad del aire a esa temperatura, como ya vimos es de 343m/s. Por lo tanto la frecuencia fundamental de resonancia de ese tubo será:

$$f = \frac{1}{2 \times 1{,}50\text{m}} \times 343\text{m/s} = 114\text{Hz}$$

Tubo cerrado en ambos extremos



Si establecemos una vibración en la columna de aire encerrada en un tubo cerrado por ambos extremos, se genera una onda estacionaria resonante si se establece un nodo en cada extremo cerrado del tubo. Esta condición resulta en una serie armónica similar al caso de la cuerda fija en ambos extremos.

Las longitudes de onda corresponderán a $\lambda = \frac{2L}{n}$ con n=1,2,3,4……:

Las frecuencias de resonancia para un tubo cerrado en ambos extremos resultarán: $f = \frac{n}{2L} \times v$

siendo n = 1,2,3,4…… y v la velocidad del sonido en el medio.

Algo sobre los instrumentos musicales.

Todos los instrumentos musicales acústicos se basan en las ondas estacionarias. Si pulsamos la cuerda de una guitarra en esta se establecen simultáneamente varias ondas estacionarias. La cuerda vibrará en todos aquellos modos que tengan nodos en los extremos de la cuerda. Lo hace como un todo (con nodos en los extremos), por mitades (con un nodo adicional en el centro), por tercios, por cuartos, etc. Todas estas vibraciones se producen de forma simultánea. La vibración de la cuerda como un todo, modo 1, produce el tono fundamental de la cuerda y las restantes vibraciones generan los diferentes armónicos.

La nota en la que escuchamos sonar la cuerda nos la da la frecuencia fundamental o en su defecto la menor frecuencia en que resuena la cuerda. La combinación de la frecuencia fundamental con los distintos armónicos y la diferente intensidad relativa de cada una de estas frecuencias, generan lo que se conoce como el timbre del sonido. El timbre es lo que nos permite diferenciar el sonido de una guitarra, de un piano o de un violín aunque estén tocando exactamente la misma nota. Si la única frecuencia presente fuera la fundamental no escucharíamos diferencia alguna.

Una trompeta actúa como un tubo abierto por ambos extremos, cuando la hacemos sonar el sonido emitido no constará de una sola frecuencia, estaremos escuchando varías frecuencias correspondiente a la serie de armónicos. La frecuencia más baja emitida nos dará el tono del sonido, la combinación de esta con las demás frecuencia emitidas nos dará el timbre del sonido

Para generar varias series armónicas en la trompeta se cambia su largo conectando, mediante válvulas, distintas longitudes de tubo

Un clarín, que tiene un largo fijo, sólo puede generar las notas que pertenecen a una única serie armónica. Estas notas son normalmente las de frecuencias correspondientes a la tercera, la cuarta, la quinta y la sexta armónicas. Cuando un clarín toca estas notas suenan conjuntamente, además, otras armónicas superiores que le dan su timbre característico

Los instrumentos de cuerda y algunos de percusión disponen además de una caja de resonancia. En los instrumentos de cuerda esta caja cumple una doble función La tapa y el fondo de la caja actúan como láminas resonantes que por su gran área permiten transferir eficazmente la vibración de las cuerdas al aire, las cuerdas de por si no lo pueden hacer en forma eficaz debido a lo pequeño de su superficie. La vibración se trasmite de las cuerdas a la caja a través de los soportes de las cuerdas y de la caja se trasmiten al aire.

La caja además funciona como un tubo que presentará resonancia para algunas frecuencias, esto modificará la intensidad sonora de algunas de las frecuencias emitidas por las cuerdas, modificándose así el timbre y la sonoridad total del instrumento. Para ampliar la gama de frecuencias en las que la caja presenta resonancia se la hace con paredes curvas que presenten distintas distancias entre las paredes enfrentadas.

En un piano la caja solo cumple la función de trasmitir las vibraciones al aire ya que la caja no trabaja bien en resonancia al estar ocupada con el mecanismo del instrumento.

En los instrumentos de percusión la función de la caja es resonar en algunas frecuencias y no transmitir las vibraciones al aire ya que en general estos instrumentos presentan grandes superficies vibrantes que transmiten con facilidad las vibraciones. Algunos de estos instrumentos, los platillos por ejemplo, carecen de caja de resonancia.

Como el diapasón sólo genera una frecuencia única la caja de resonancia se hace de sección rectangular

Como el violín debe cubrir una gran gama de frecuencias las paredes de la caja de resonancia son pronunciadamente curvas.

El “puente” de un violín cumple la función de transmitir las vibraciones de las cuerdas a la caja de resonancia