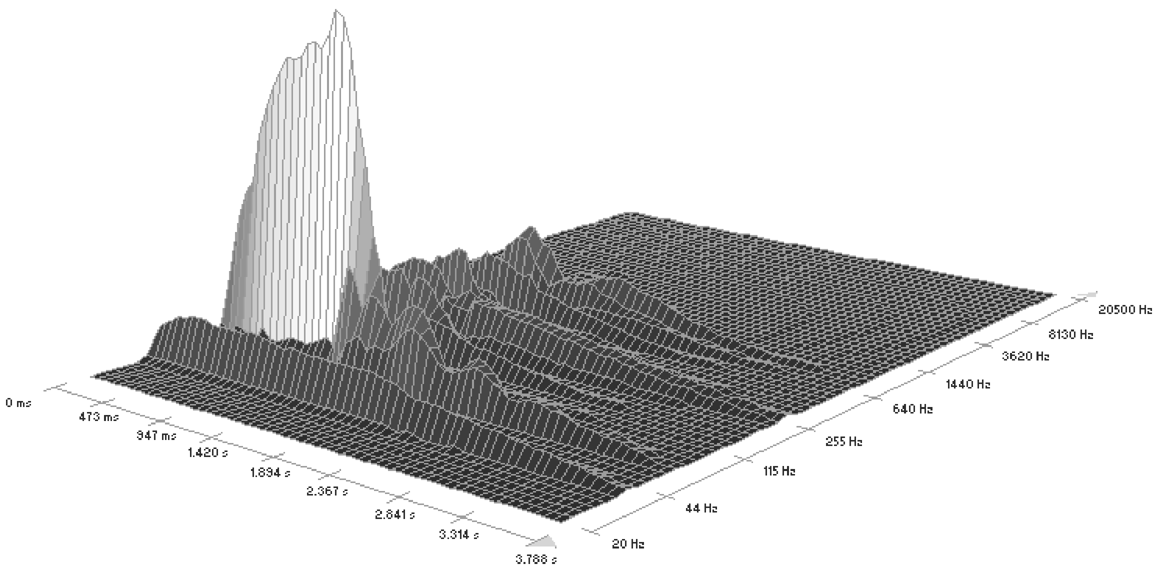
UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA
“Santa María de los Buenos Aires”

Facultad de Artes y Ciencias Musicales

PABLO CETTA

APUNTES DE ACÚSTICA MUSICAL



APUNTES DE ACÚSTICA MUSICAL

INDICE

I . MOVIMIENTO OSCILATORIO

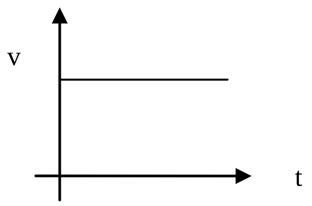
El movimiento oscilatorio es el punto de partida para la producción del sonido. Para que el sonido exista es necesario ante todo que un cuerpo realice un movimiento de este tipo. El cuerpo que oscila genera perturbaciones en el medio elástico en que se halla inmerso, las cuales se propagan hasta llegar al sujeto receptor que las convierte en sensación sonora.
Es importante aclarar que sólo habrá sonido en tanto exista un sujeto receptor que experimente una sensación ante determinados estímulos físicos dados por un movimiento vibratorio. Si el sujeto está ausente tendremos movimientos vibratorios, pero no sonido.
Podríamos ahora definir al sonido, diciendo que es la sensación experimentada por un sujeto cuando llegan a sus oídos las perturbaciones producidas por determinados movimientos vibratorios.

- ***Movimiento***

El movimiento es un desplazamiento en el espacio. Este desplazamiento requiere tiempo para poder realizarse. Los sucesivos cambios de posición pueden describir distintas trayectorias, rectilíneas o curvilíneas. Desde el punto de vista de la variación del movimiento, e independientemente de la trayectoria, podemos clasificar a los movimientos en UNIFORMES y VARIADOS.

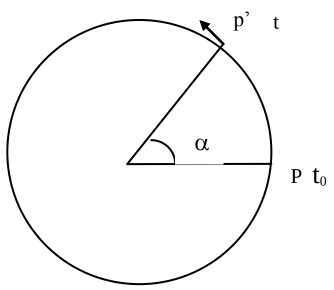
a) Movimiento Uniforme

El móvil recorre espacios iguales en tiempos iguales y la velocidad es siempre constante. Recordemos que la velocidad (*v*) es la relación entre el espacio recorrido (*e*) y el tiempo empleado en recorrerlo (*t*).



$$\boxed{v = e / t}$$

<u>Movimiento circular uniforme</u>
Un cuerpo está animado de movimiento circular uniforme cuando su trayectoria es una circunferencia y recorre arcos iguales en tiempos iguales.



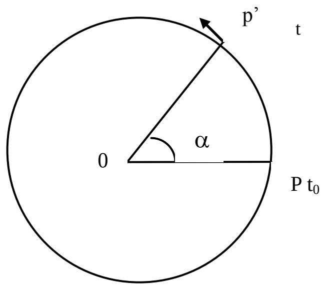
Si *t* es el tiempo y PP' el espacio recorrido, tendremos: v = PP'/t = *arco / t*

A la velocidad expresada en función del arco recorrido la denominamos VELOCIDAD TANGENCIAL.

También podemos definir a la velocidad no en función del arco sino del ángulo descrito (α)
A la velocidad expresada en función del ángulo descrito la denominamos VELOCIDAD ANGULAR. (ω)

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

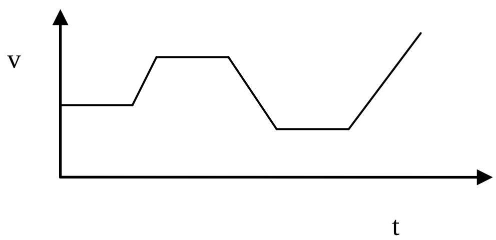
El ángulo puede estar expresado en grados o bien en radianes. Recordemos que un radián corresponde al ángulo necesario para obtener un arco igual al radio de la circunferencia.
Si el radio OP es igual al arco PP' entonces α = 1 radián



Si el radio OP es igual al arco PP' entonces α = 1 radián

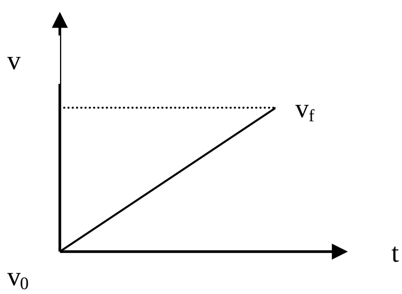
b) Movimiento Variado

En los movimientos variados la velocidad no es constante, cambia con el tiempo. A la variación de velocidad por unidad de tiempo la denominamos aceleración (*a*).

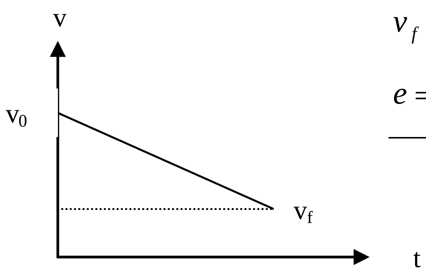


$$\boxed{a = \frac{v}{t}}$$

<u>Movimiento uniformemente variado</u>
La *v* varía cantidades iguales en tiempos iguales. La aceleración es constante.
Si la *v* aumenta por unidad de tiempo, el movimiento es uniformemente acelerado. (Ej.: cuerpo que cae.)
Si la *v* disminuye el movimiento es retardado (cuerpo arrojado hacia arriba)



acelerado (+)



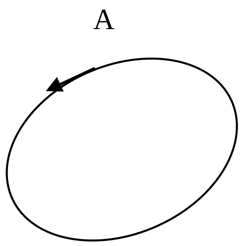
retardado (-)

$$v_f = v_0 \pm a.t$$

$$e = v_0.t \pm \frac{1}{2}a.t^2$$

c) Movimientos Periódicos

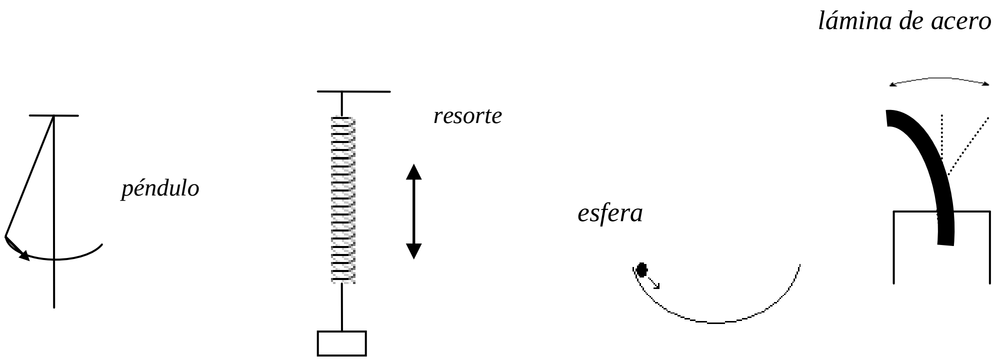
Un movimiento se denomina periódico cuando se reproduce idénticamente a intervalos iguales. El tiempo transcurrido hasta regresar a la posición de partida se denomina **período** (T).
Por ejemplo, si en el instante t un móvil se encuentra en A, y cumple un movimiento periódico, estará también allí en los instantes $t + T$, $t + 2T$, $t + 3T$, etc., realizando siempre la misma trayectoria y repitiendo periódicamente los mismos estados de movimiento (velocidad y aceleración).



Las leyes que rigen el desplazamiento de una partícula con movimiento periódico se pueden expresar siempre por medio de senos y cosenos. Como el término **armónico** se emplea en expresiones que contengan esas funciones, al movimiento periódico también se lo denomina armónico.

d) Movimiento Oscilatorio

Un tipo de movimiento periódico es el movimiento oscilatorio simple. El móvil oscila en torno a una posición de equilibrio.
Ejemplos:



Para el estudio de estos movimientos no tendremos en cuenta las fuerzas de rozamiento que operan.
Siendo en algunos casos muy pequeño el período (T), es cómodo caracterizar al movimiento por su **frecuencia**, que es el número de períodos por segundo. La frecuencia se mide en Hertz, y está vinculada al período por la siguiente relación:

$$f = \frac{1}{T} \quad \left[\frac{1}{s} \text{ó}\, Hertz \right]$$

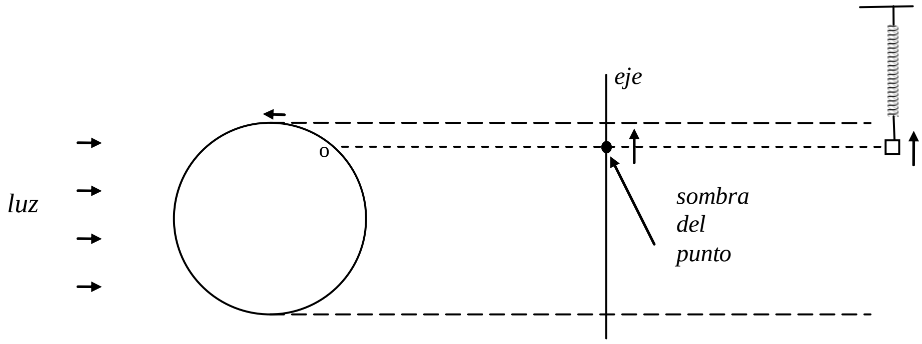
Ejemplo: si el período (o tiempo necesario para realizar una oscilación completa) es T = 0.01 s, la frecuencia (f) será:

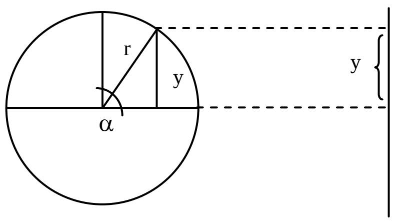
$$f = \frac{1}{T} \qquad f = \frac{1}{0{,}01 s} = 100\, Hertz$$

Llamamos **elongación** a la distancia respecto a la posición de equilibrio en un momento dado.
A la distancia más alejada de la posición de equilibrio, o elongación máxima, la denominamos **amplitud.**

▪ *Relación entre el movimiento circular uniforme y el movimiento armónico simple*

Proyectando sobre un eje las distintas posiciones de un punto que describe un movimiento circular uniforme, obtenemos un movimiento armónico simple.





Nos interesa ahora poder calcular la elongación (y) en un instante determinado:

Sabemos que $sen\alpha = \frac{y}{r}$, por lo tanto $y = r.sen\alpha$

Como $r = A$ (amplitud o elongación máxima), nos queda: $y = A.sen\alpha$ fórmula que define los valores de elongación en función del ángulo.
Si queremos expresar los valores de elongación en función del tiempo y no del ángulo descrito:

$$y = A.sen\ (\omega t)$$

por ser $\alpha = \omega t$

donde:
y = elongación en un instante cualquiera
A = amplitud o máxima elongación
ω = velocidad angular, expresada en radianes / segundo
t = tiempo transcurrido desde el inicio del movimiento

Como la velocidad angular y la frecuencia del movimiento se vinculan por la siguiente fórmula

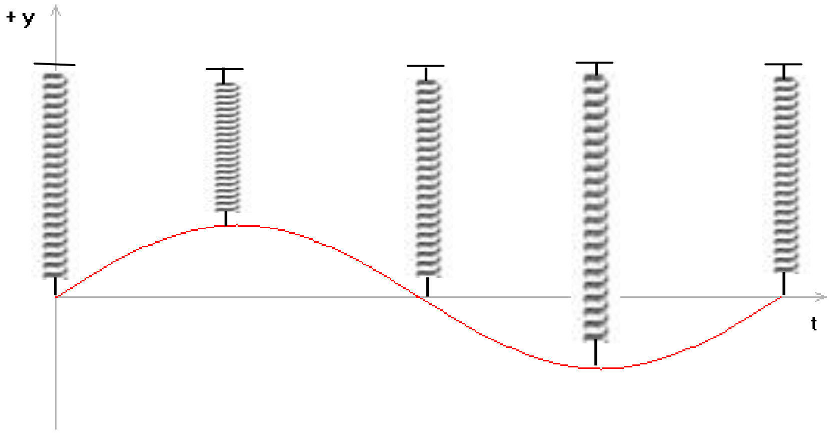
$$\omega = 2\pi f$$

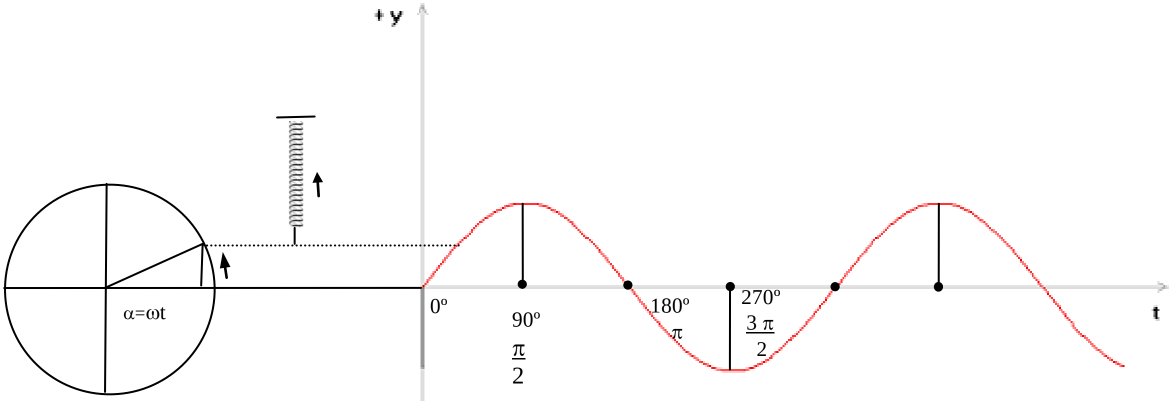
podemos expresar la elongación en función de la frecuencia:

$$y = a.sen\left(2\pi ft\right)$$

▪ *Representación gráfica del movimiento oscilatorio simple o sinusoidal*

Se obtiene comparando los valores de elongación según transcurre el tiempo.

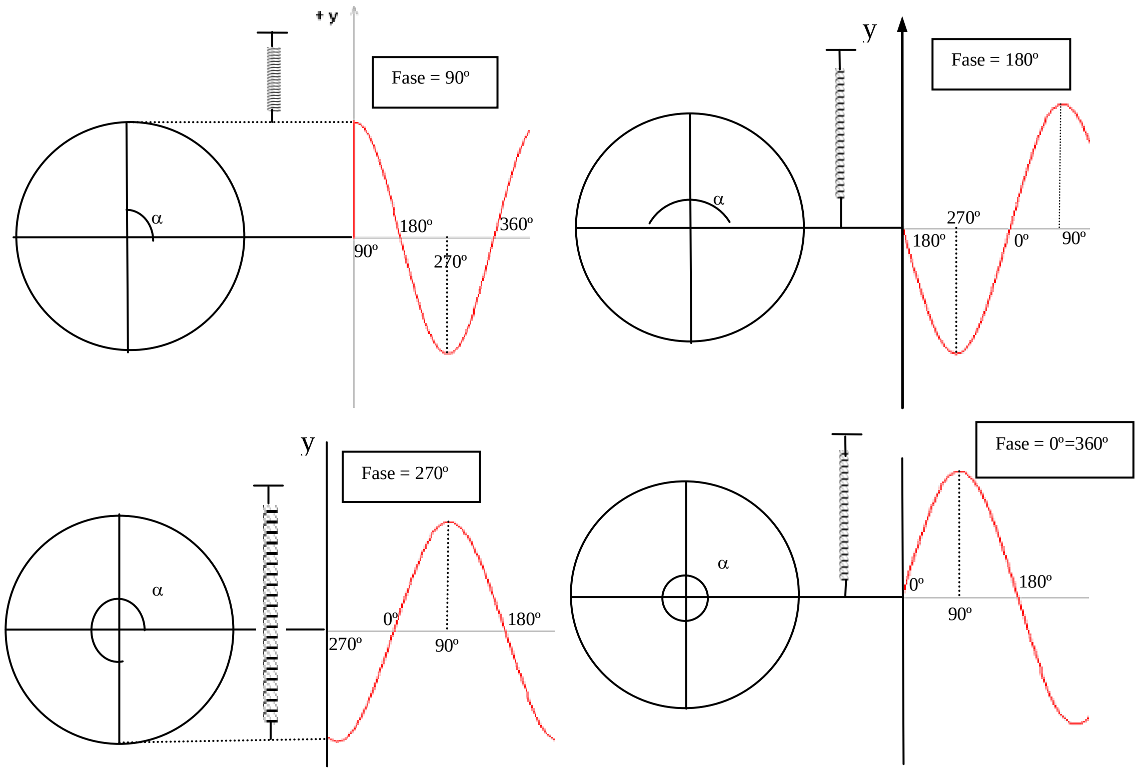




▪ *Concepto de Fase*

La fase es el estado en que se encuentra un movimiento periódico en un instante determinado. Está en función del tiempo transcurrido desde que se inició el ciclo considerado.
Dos oscilaciones de igual frecuencia se hallan en fase cuando, en un instante dado, ocupan posiciones idénticas en su respectivo ciclo. En cambio, existe desfase cuando el ciclo de un oscilación se ha iniciado con retraso respecto al de la otra, en cuyo caso difiere la magnitud que ambas tienen en un momento dado.
Dos oscilaciones se hallan en oposición de fase cuando una de ellas pasa por su valor máximo en el preciso momento en que la otra pasa por el mínimo, o sea cuando la diferencia entre ambas es de medio período.
La fase puede medirse en grados, radianes o porciones de período.
Interesa particularmente la *fase inicial*, que es la que corresponde al inicio del movimiento oscilatorio. (t = 0)

Ejemplos:



Las fórmulas obtenidas anteriormente, para calcular la elongación instantánea, suponen que el móvil parte del punto de reposo (fase igual a 0º). Si queremos contemplar los casos en que corresponde una fase distinta de 0º al inicio del movimiento (t = 0), deberemos sumar la fase inicial a la fase instantánea para obtener los valores de elongación correctos según transcurre el tiempo:

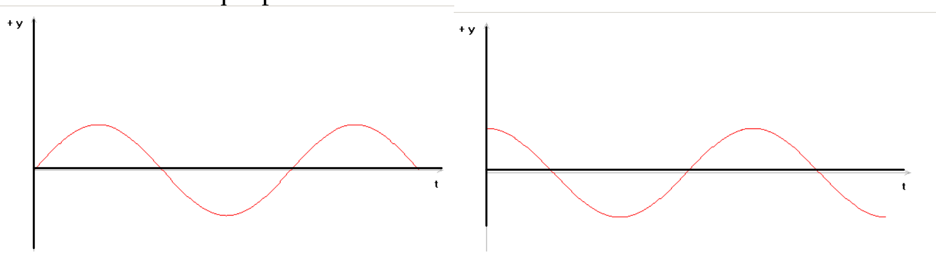
$$y = A sen\left(\omega t + \alpha_0\right)$$

ωt = fase instantánea

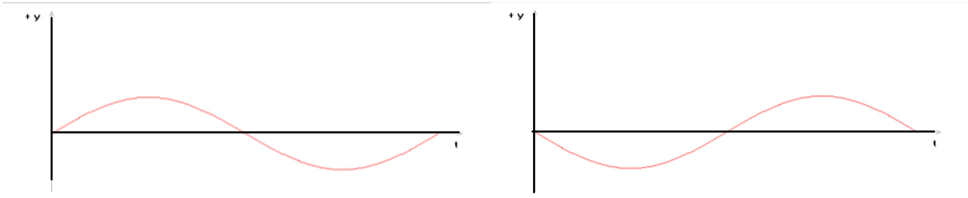
α_0 = fase inicial

▪ *Comparación entre movimientos*

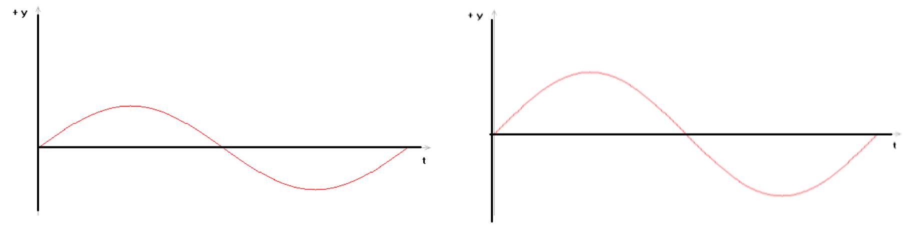
Dos movimientos que poseen una diferencia de fase de 90º:



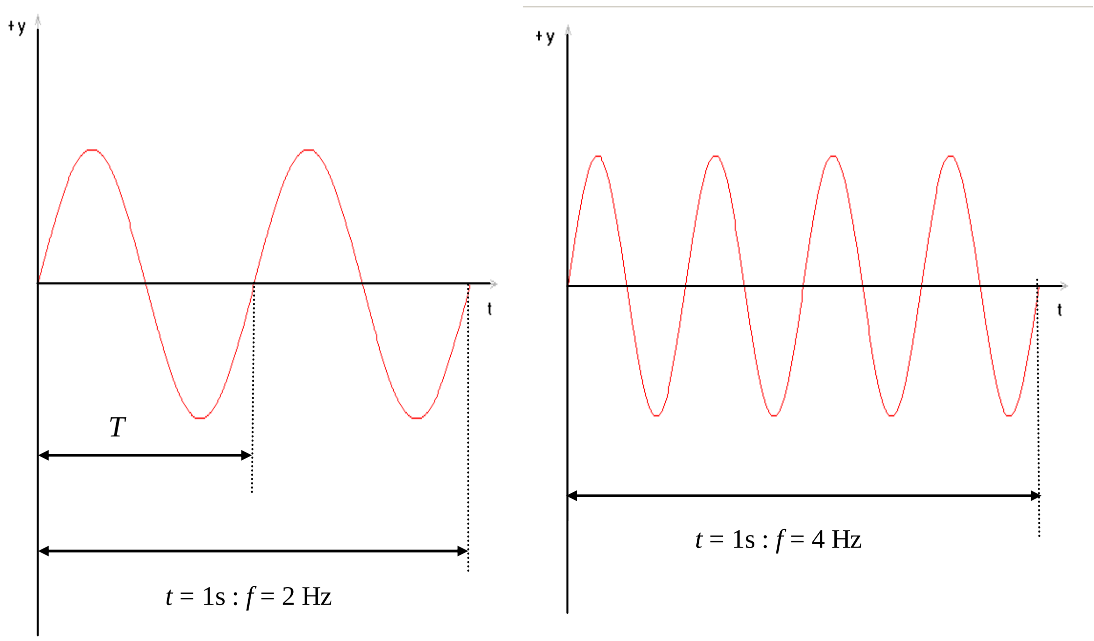
Dos movimientos cuya diferencia de fase es de 180º (oposición de fase):



Dos movimientos de igual fase y frecuencia, pero de distinta amplitud:

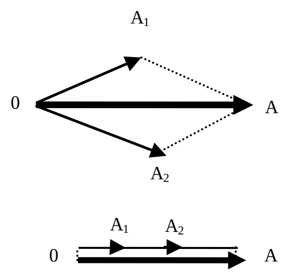


Dos movimientos de igual fase y amplitud, pero de distinta frecuencia:



II. COMPOSICIÓN DE MOVIMIENTOS ARMÓNICOS SIMPLES

Supongamos que un objeto sufre un pequeño desplazamiento $0A_1$ por efecto de una causa cualquiera, y que por la acción de otra causa, independiente de la primera, sufre otro desplazamiento $0A_2$. El **principio de superposición de los pequeños movimientos** establece que si las causas intervienen simultáneamente, el desplazamiento 0A que sufre la partícula es igual a la suma geométrica de los movimientos $0A_1$ y $0A_2$ que producirían las dos causas actuando separadamente.



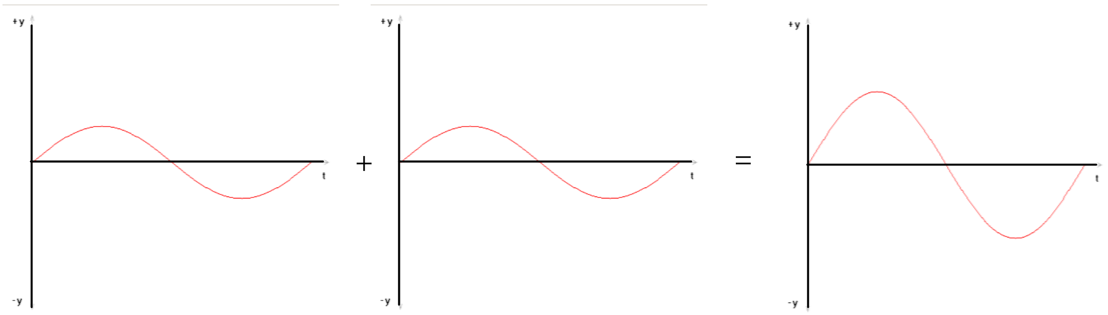
Si ambos desplazamientos tienen la misma dirección su suma es algebraica.
Podemos resolver la composición de movimientos a través de la representación gráfica, sumando las elongaciones de los movimientos componentes y hallando la resultante.

▪ *Suma de movimientos armónicos simples cuya resultante es otro movimiento armónico simple*

Para que la resultante sea una sinusoide (mov. armónico simple) es indispensable que las componentes tengan **igual frecuencia**.

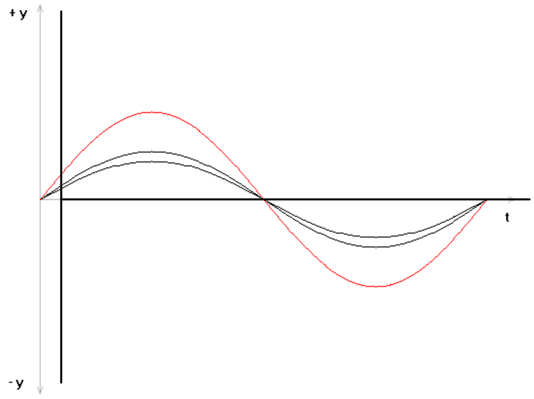
Distintos casos:

a) Dos movimientos de igual frecuencia, amplitud y fase



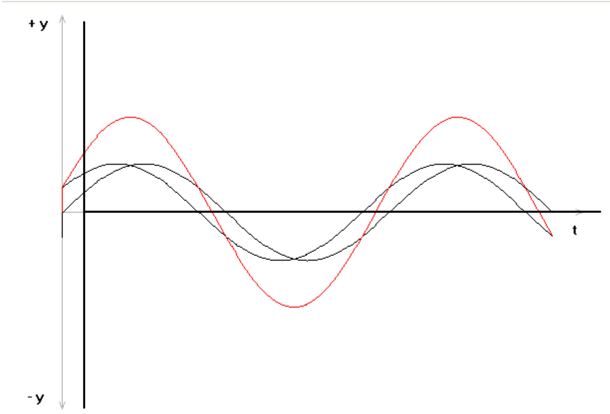
La resultante es una sinusoide de igual fase y frecuencia pero **su amplitud es el doble**.

b) Dos movimientos de igual frecuencia y fase, pero de distinta amplitud

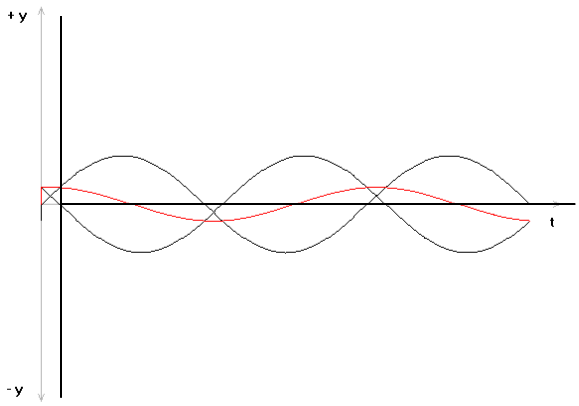


c) Dos movimientos de igual frecuencia y amplitud, pero de distinta fase.

a)

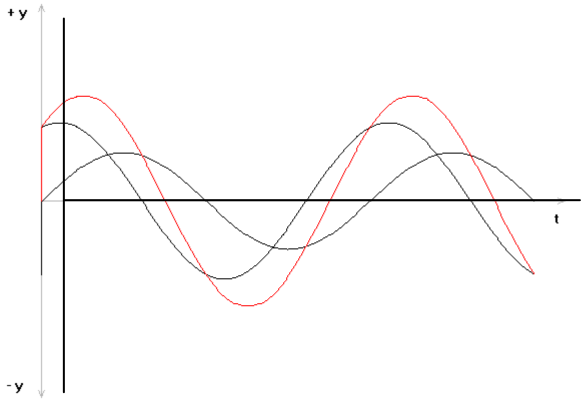


b)

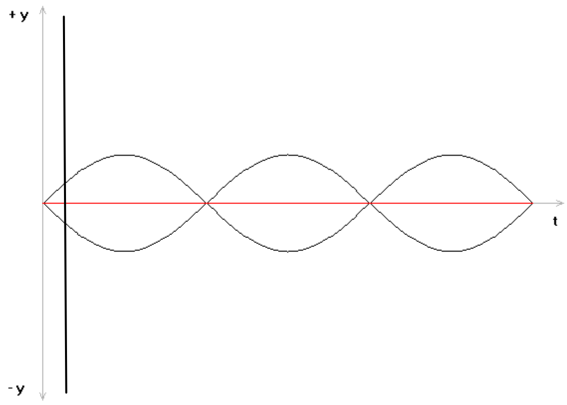


Si la diferencia de fase es próxima a 0º, la amplitud resultante será casi el doble de la amplitud de los componentes (*Fig. a*). En cambio, si es próxima a 180º, la amplitud se aproximará a cero. (*fig. b*)

d) Dos movimientos de igual frecuencia, pero de amplitudes y fases distintas.



e) Dos movimientos de igual frecuencia y amplitud pero en oposición de fase. La resultante es una recta.



- ***Suma de movimientos armónicos simples cuya resultante es un movimiento complejo***

Un movimiento complejo se obtiene combinando movimientos armónicos simples de **frecuencias distintas**. Si las frecuencias de los movimientos componentes son **múltiplos enteros**, el movimiento complejo será **periódico.**
Si las frecuencias de los componentes no son múltiplos el movimiento complejo será aperiódico.
Prácticamente todos los sonidos son complejos. Sin embargo, podemos tener una idea de sonido puro (o sinusoidal) cuando golpeamos muy suavemente un diapasón.

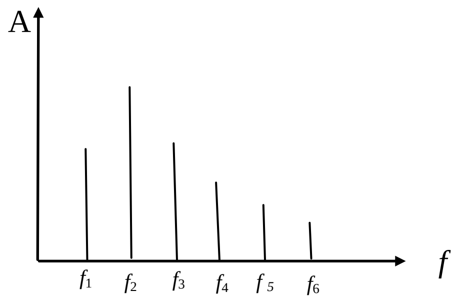
a) Movimientos complejos periódicos

Veamos lo que dice el Teorema de Fourier:
"Un movimiento periódico cualquiera de frecuencia *f*, es siempre expresable como una suma de movimientos armónicos simples, cuyas frecuencias serán *f, 2f, 3f, 4f*, etc."
Esto significa que cualquiera sea el movimiento periódico, siempre podrá representarse sumando movimientos sinusoidales de frecuencia, amplitud y fase adecuadas. A estos componentes se los denomina **armónicos**.

La representación de un movimiento complicado puede exigir muchos componentes, incluso en número infinito, pero es posible aproximarse satisfactoriamente a ese movimiento sumando tan solo los primeros componentes.
Un movimiento periódico complejo, cuya frecuencia sea de 100 Hz, se podrá representar como la suma de armónicos con amplitudes y fases determinadas, cuyas frecuencias serán:

100 Hz (*f*), 200 Hz (2*f*), 300 Hz (3*f*), 400 Hz (4*f*), 500 Hz (5*f*), etc.

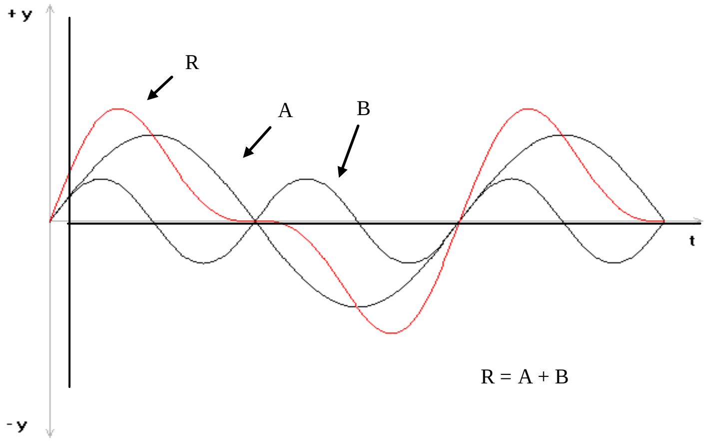
La existencia y proporción de armónicos como constituyentes de los sonidos complejos fue estudiada en el siglo XIX por Hermann von Helmholtz. Por medio de los llamados “resonadores de Helmholtz”, esferas huecas de vidrio que resonaban ante una frecuencia determinada, él pudo comprobar las relaciones y proporciones entre armónicos.
Podemos hacer un gráfico donde representemos a las frecuencias componentes de un sonido complejo y a sus amplitudes relativas:



A este gráfico se lo denomina **espectro de líneas.**

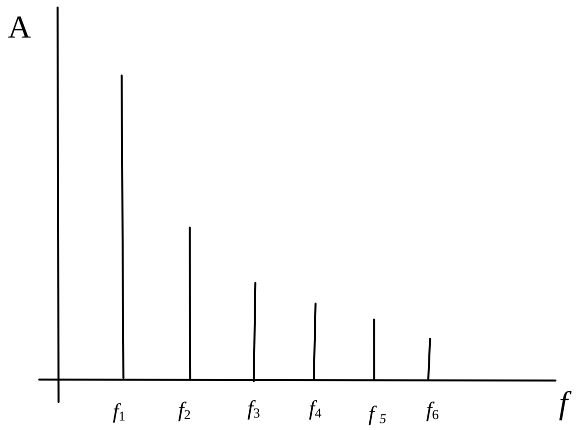
<u>Algunos casos de movimientos periódicos complejos</u>

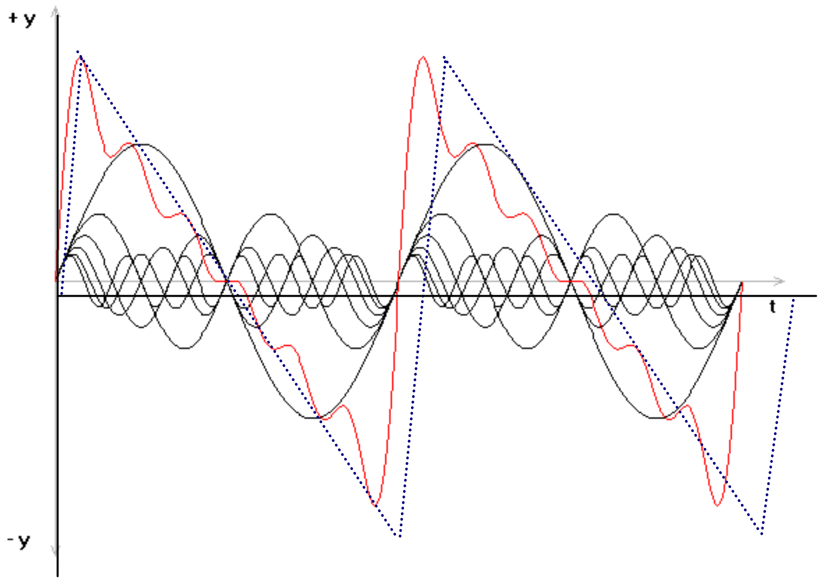
A y B están en relación de múltiplos enteros, ya que la frecuencia de B es dos veces la de A. Por lo tanto la resultante es periódica.
La amplitud de B es menor que la de A (la mitad).



Si sumamos todos los armónicos de una fundamental cuyas amplitudes decrezcan proporcionalmente, obtenemos un tipo de onda denominado **diente de sierra**.

Si consideramos solo los seis primeros armónicos, el espectro sería el siguiente:



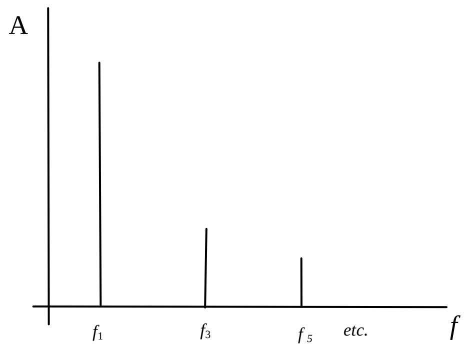


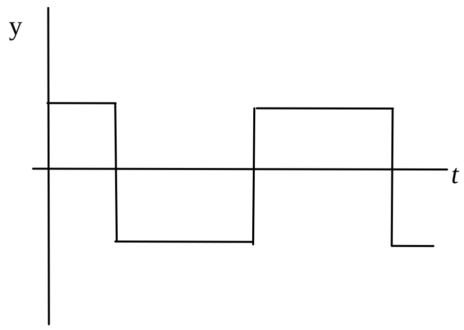
Si agregáramos un número mayor de armónicos la curva tendería hacia la línea de puntos.
La frecuencia de los armónicos está dada por la relación $f_n = n \,.\, f_1$, donde n es el número de armónico; f_n es la frecuencia del armónico n y f_1 es la frecuencia del primer armónico, llamado también fundamental.

En la onda diente de sierra las amplitudes están dadas por la relación: $A_n = \dfrac{A_1}{n}$

Onda cuadrada

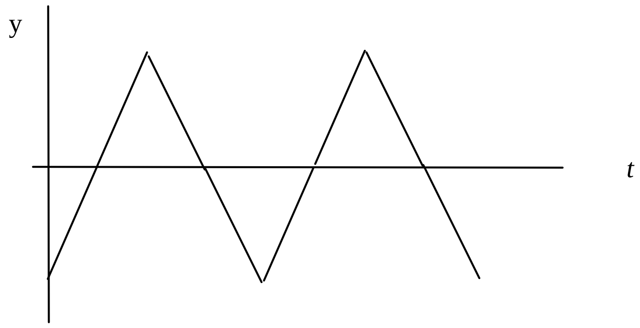
Se obtiene sumando los armónicos impares solamente (1, 3, 5, 7, etc.)
En este caso $A_n = A_1 / n$, siendo n impar.





Onda triangular

Está formada por armónicos impares cuyas amplitudes están dadas por la relación $A_n = A_1 / n^2$, para n impar.



Podemos definir como regla general que una forma de onda con vértices marcados revelan la presencia de gran cantidad de armónicos. En cambio, si los bordes están redondeados, posee menor cantidad de armónicos.

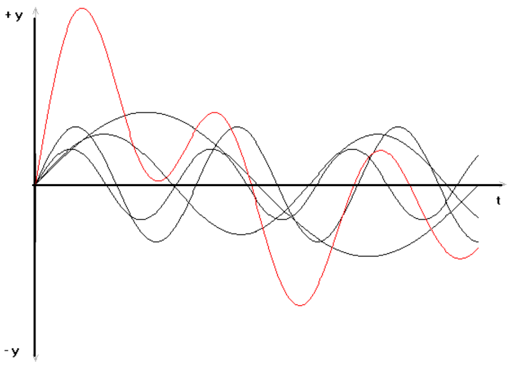
b) Movimientos complejos aperiódicos

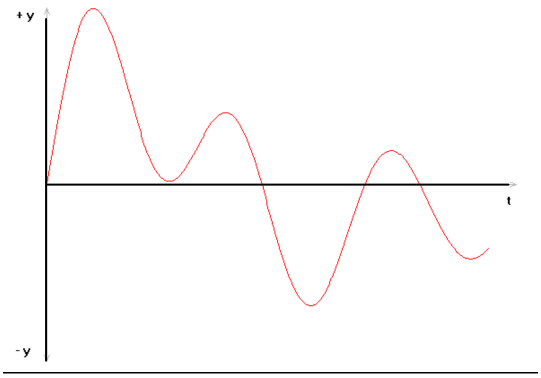
Algunos sonidos usados en música no poseen componentes múltiplos de la frecuencia más baja, es decir, constan de frecuencias no armónicas. Estos sonidos son generalmente producidos por instrumentos de percusión.
A los componentes de estos sonidos se los denomina **parciales**, ya que no sería lógico llamarlos armónicos no armónicos.
Tomemos como ejemplo una barra que vibra libremente. Sus cuatro primeros parciales podrían ser:

$$f_1,\ 2.756\ f_1,\ 5.404\ f_1,\ 8.933\ f_1, \text{etc.}$$

La vibración resultante es aperiódica, dado que las componentes no están en relación armónica, o lo que es lo mismo, no son múltiplos de la frecuencia más baja o fundamental.

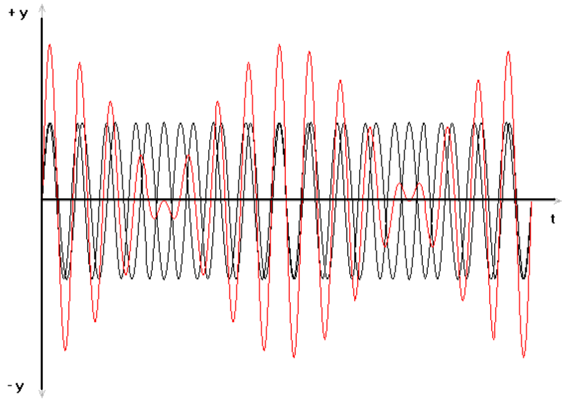
Veamos un ejemplo gráfico, donde se han sumado tres frecuencias no armónicas. La resultante es un movimiento aperiódico.

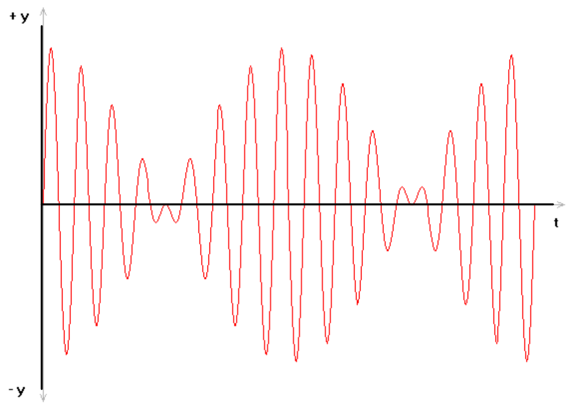




▪ *Batidos o Pulsaciones*

Si sumamos dos movimientos cuyas frecuencias sean ligeramente diferentes sucederá que la amplitud de la resultante no será constante, sino que variará periódicamente en el tiempo. A este fenómeno se lo denomina **pulsaciones** o **batidos**.





La frecuencia con que varía la amplitud de la resultante es igual a la diferencia de las frecuencias de las componentes.

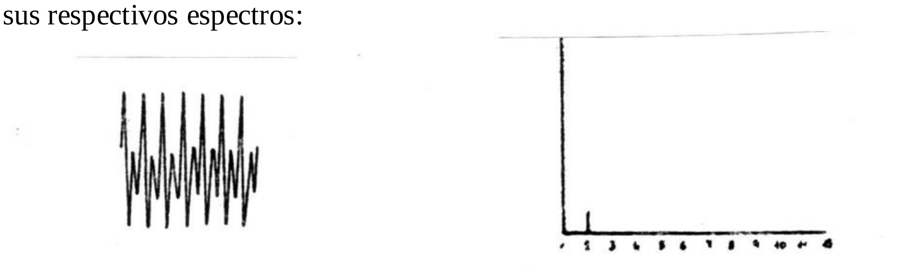
Por ejemplo, si se mezclan dos movimientos cuyas frecuencias son respectivamente 400 Hz y 406 Hz, la frecuencia de las pulsaciones (f_A) será de 6 Hz. Esta frecuencia puede verse representada en el gráfico superior por medio de la línea de puntos. A esta curva se la llama **envolvente**.

$$f_p = f2 - f1$$

La frecuencia de la sinusoide resultante e un promedio de las dos que la componen:

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Este caso constituye una excepción, ya que sumando dos frecuencias próximas que no son múltiplos, obtenemos un movimiento de tipo periódico.
Podemos considerar a los instrumentos musicales como productores de vibraciones y oscilaciones. Estos movimientos se propagarán a través del medio elástico en que se hallen y excitarán parte de nuestro sistema auditivo.
Veamos las representaciones gráficas de las oscilaciones producidas por algunos instrumentos y sus respectivos espectros:



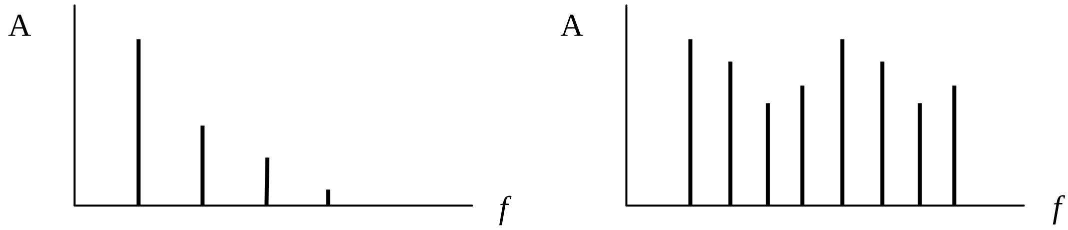
Flauta

Clarinete

Oboe

Fagot

Hemos visto que la cantidad de componentes que conforman un sonido, sus frecuencias e intensidades, determinan el espectro del sonido. Distinguimos un violín de un piano, en parte, porque sus espectros son diferentes. En las figuras que siguen vemos a la izquierda un sonido cuyo espectro es pobre, y a la derecha un sonido rico, brillante, que posee varias componentes agudas.

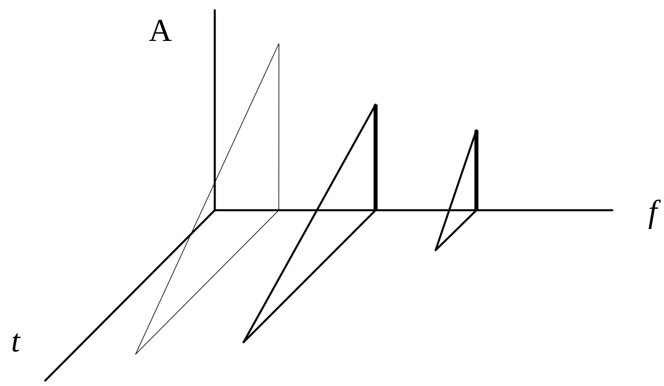


Cuando descomponemos un sonido en sus componentes, realizamos un **análisis**. También podemos crear un sonido complejo sumando sonidos simples de distintas frecuencias y amplitudes, y en este caso hablamos de **síntesis** del sonido.

▪ *El Timbre*

Los sonidos suelen cambiar en el tiempo. Si bajamos una tecla de un piano apreciamos que el sonido comienza fuerte y luego va disminuyendo su intensidad. Su color tambien se transforma, comienza brillante y a medida que el tiempo transcurre el sonido se hace más pobre. Sucede que el movimiento de la cuerda cambia con el tiempo, y por lo tanto, la forma de onda y el espectro también, ya que ambas son representaciones de ese movimiento.

El timbre es la variación del espectro en función del tiempo, y puede representarse tridimensionalmente. El gráfico del timbre resulta de agregar un tercer eje al gráfico del espectro. El nuevo eje define el paso del tiempo.
Veamos un ejemplo :



Se ve en la figura superior que las tres componentes de este sonido decrecen en intensidad a medida que el tiempo transcurre, pero lo hacen cada una de manera distinta: la primera componente desciende en amplitud más lentamente que las demás. La tercera componente es la que más rápidamente se extingue. A medida que el tiempo pasa, el sonido se hace cada vez más pobre. Se desprende de aquí que el espectro es meramente instantáneo: se refiere a un instante particular del sonido.

III. PROPAGACIÓN DE LOS FENÓMENOS VIBRATORIOS

La propagación de un fenómeno vibratorio se realiza por medio de un movimiento ondulatorio. La onda constituye el modo de transmisión de una vibración o perturbación inicial. Se propaga a través de un medio elástico, sea este gaseoso, líquido o sólido.
A las perturbaciones que precisan un medio material para existir las denominamos **ondas mecánicas**. Por el contrario, las ondas electromagnéticas no necesitan ningún medio y pueden propagarse en el vacío.
Las ondas capaces de producir sonido son las ondas mecánicas. Ellas pueden transportar energía a distancia a través de la materia misma del medio.
Las perturbaciones en el medio elástico se originan por la acción de una fuente generadora en contacto con dicho medio, Las porciones de medio próximas a la fuente comienzan a oscilar en torno a su posición de equilibrio, realizando un movimiento similar. Debido a las propiedades elásticas del medio, las perturbaciones se transmiten a las porciones adyacentes, y por consiguiente, avanzan. Hay que tener en cuenta que no es el medio en su conjunto el que se desplaza, sino que las diversas partes del medio oscilan en trayectorias limitadas, transmitiendo sus movimientos a las porciones vecinas.

▪ *Velocidad de Propagación de las Ondas*

Depende del grado de elasticidad del medio transmisor y de la inercia de sus partículas. La temperatura también afecta a la velocidad de propagación. por ejemplo en el aire a 0º la velocidad es de 331.4 m/s, y aumenta 0.6 m/s por cada grado que aumenta la temperatura.
Veamos algunos otros medios y sus velocidades de propagación respectivas:

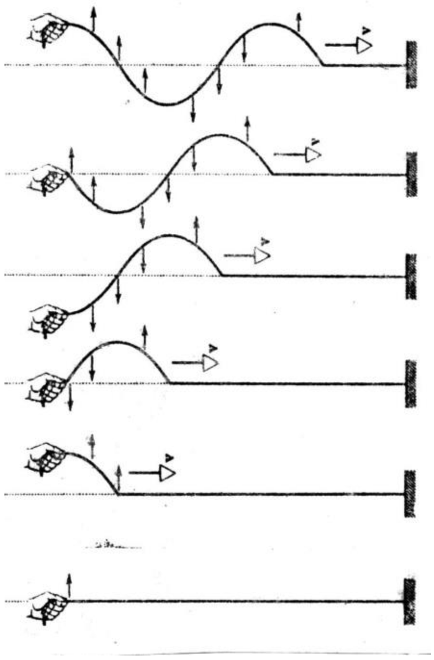
Medio	**Temperatura** (ºC)	**Velocidad (m/s)**
aire	0	331.4
oxígeno	0	317.2
agua	15	1450
plomo	20	1230
hierro	20	5130
goma vulcanizada	0	54

▪ *Clasificación de las Ondas*

Podemos clasificar a los movimientos ondulatorios considerando la relación entre los movimientos de las partículas materiales del medio con respecto a la dirección de propagación de la onda misma.

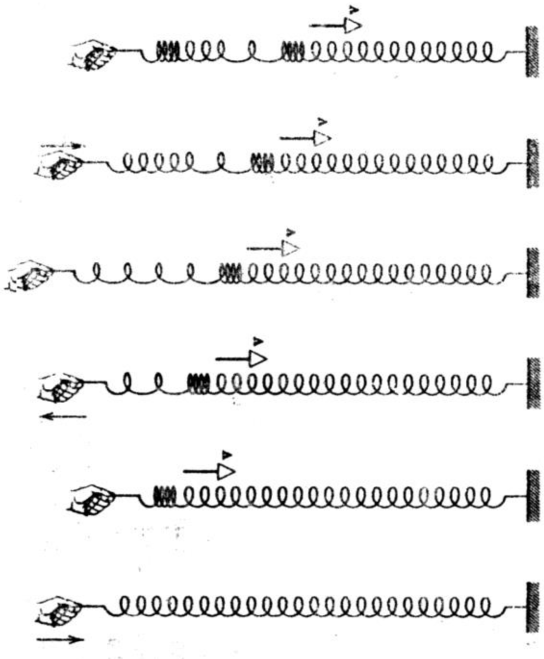
Ondas Transversales

Tomemos el caso de una cuera sometida a una cierta tensión. Si producimos oscilaciones perpendiculares a la dirección de la cuerda, se generarán ondas transversales. La perturbación se mueve a lo largo de la cuerda, pero las porciones de la misma vibran perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.



Ondas Longitudinales

Tomemos ahora el caso de un resorte. Si efectuamos un movimiento de vaivén en la dirección del resorte, obtendremos una onda longitudinal. Las espiras se mueven en un sentido y en el otro, en la dirección que avanza la perturbación, a lo largo del resorte.



Las ondas pueden clasificarse según las **dimensiones** en que se propague la energía.

a- ondas en una dimensión (p.e. un resorte)

b- ondas en dos dimensiones (p.e. ondas producidas en el agua al arrojar una piedra)

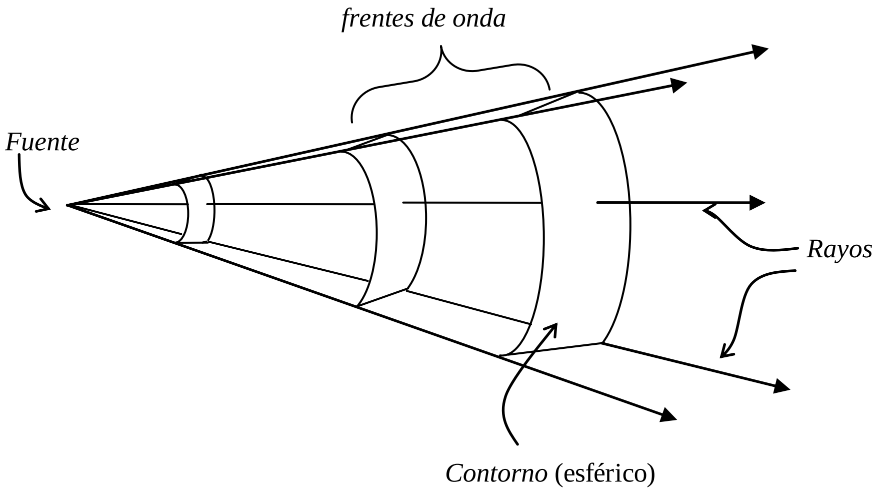
c- ondas en tres dimensiones (producidas por una fuente. Se propagan en todas direcciones)

Las perturbaciones del medio están relacionadas con los movimientos que realiza la fuente. Si generamos un solo movimiento obtendremos una sola onda o **impulso**. Si los movimientos generados se reiteran, obtendremos un **tren de ondas**.

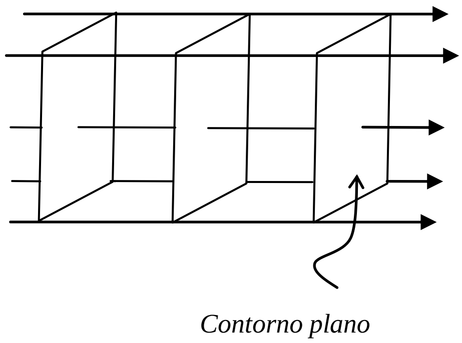
El tren de ondas, al igual que las partículas del medio material, describen movimientos periódicos o aperiódicos, según los movimientos de la fuente sean respectivamente periódicos o aperiódicos.

▪ *Frente de Onda*

Es la superficie formada por todos los puntos que en un instante dado experimentan una perturbación similar producida por una fuente en movimiento. Es decir, por los puntos que se hallen en fase.
En un medio homogéneo, la dirección de propagación es siempre perpendicular al frente de onda. Se llama **rayo** a la flecha perpendicular que indica la dirección y el sentido de la propagación.



Al alejarnos de la fuente, los frentes de onda poseen menor curvatura y pueden considerarse –al tomar regiones pequeñas- como frentes planos.



▪ *Longitud de Onda*

Llamamos longitud de onda (λ) a la distancia que la perturbación considerada recorre en un periodo (T).
Sabemos que el espacio recorrido es:

$$e = vT$$

si el tiempo es un período, entonces $t = T$ (período); y como el espacio es igual a la longitud de onda, $e = \lambda$; reemplazando:

$$\lambda = vT$$

Si queremos expresar la longitud de onda en función de la frecuencia y no del período:

$$\lambda = v / f \quad \text{por ser} \quad f = 1/T$$

La velocidad de la onda, como vimos anteriormente, dependerá del medio material en que se propague. Su frecuencia será idéntica a la de la fuente.

De la fórmula obtenida podemos deducir lo siguiente:

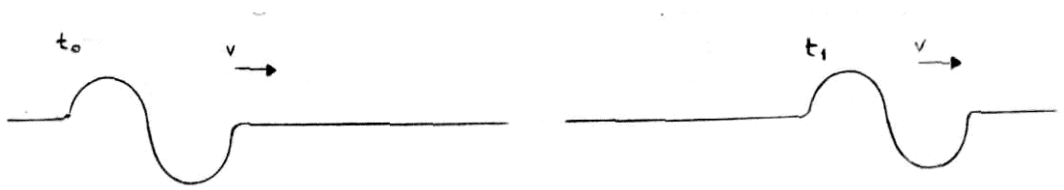
- Si la propagación cambia de medio, cambiará consecuentemente la velocidad de la onda y su correspondiente longitud. Si la velocidad aumenta, aumenta la longitud de onda.

- La longitud de onda varía en relación inversa con la frecuencia. mayor frecuencia, menor longitud de onda.

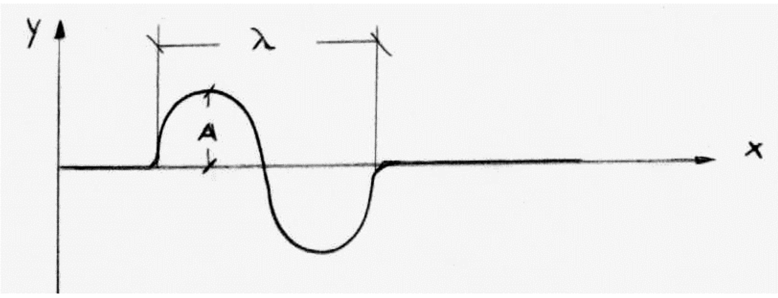
▪ *Ondas Viajeras o Progresivas*

a) Transversales

Si en una cuerda larga, estirada, producimos un impulso, éste viajará a lo largo de la misma con una cierta velocidad *v*.

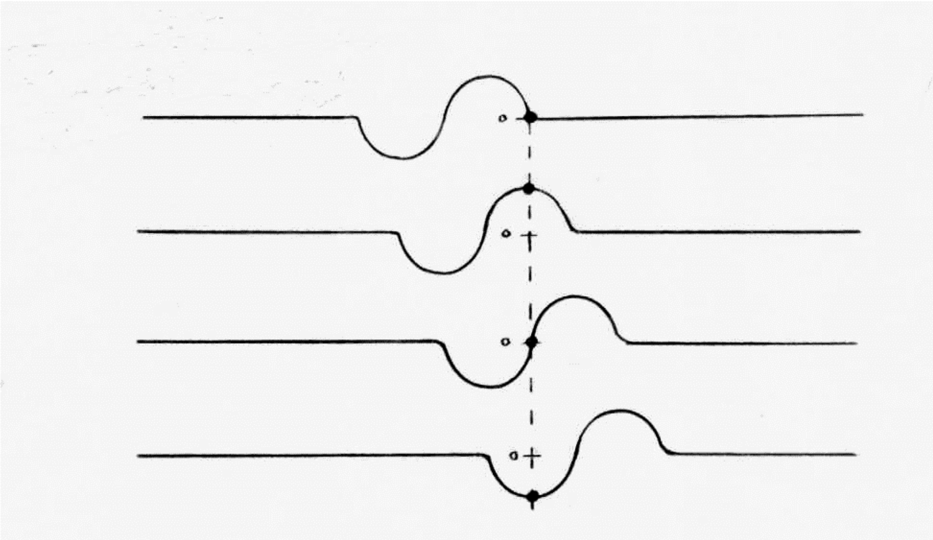


Al cabo de un tiempo habrá avanzado un cierto espacio (igual a *vt*). Podemos fotografiar instantáneamente al impulso para poder representarlo gráficamente y observar su amplitud y su longitud de onda:

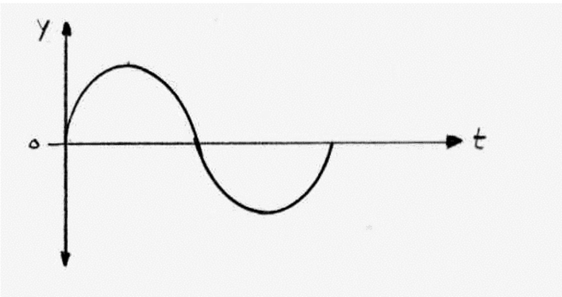


Ambas coordenadas corresponden a las dimensiones de la onda (y = amplitud; x = longitud de onda). No hay que confundir este gráfico con el movimiento, donde el eje x corresponde al tiempo.
Un tiempo igual al período (*T*) es el que necesita la onda para avanzar un espacio igual a la longitud de onda. Este período coincide con el período del movimiento producido por la fuente.

Como el tipo de onda que tratamos es transversal, el movimiento de cada punto de la cuerda, es perpendicular al desplazamiento de la onda misma.

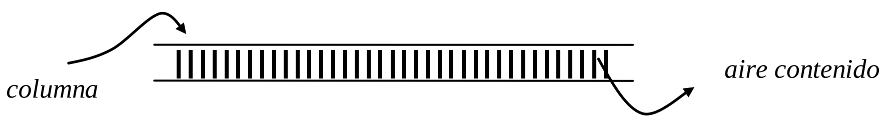


Representemos el movimiento de un punto de la cuerda n función del tiempo. Es el mismo gráfico que corresponde al movimiento producido por la fuente en función del tiempo.
Con una cuerda suficientemente larga la onda viajará infinitamente (siempre que no consideremos los rozamientos) y sin modificar su amplitud.



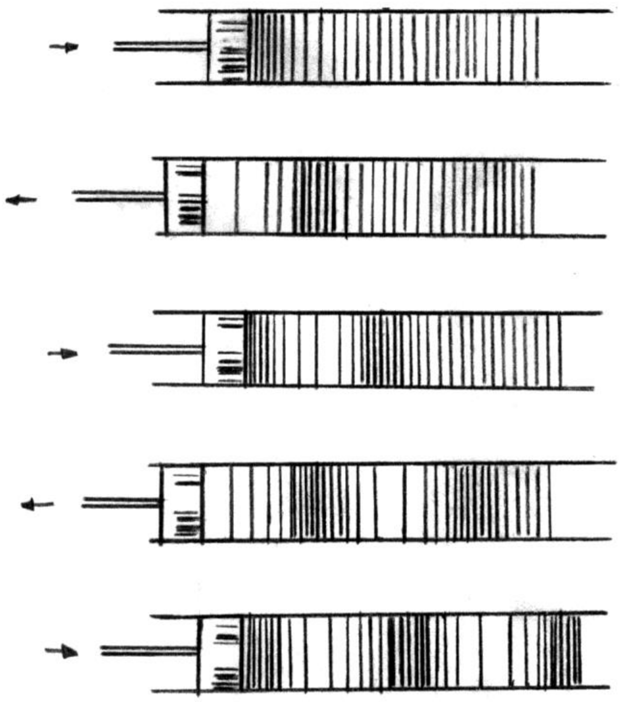
b) Longitudinales

Las ondas que se propagan a través de un medio elástico, lo hacen en todas las direcciones, y son ondas longitudinales viajeras.
También son longitudinales las ondas que se desplazan por una columna de aire encerrada en un tubo. En este caso, las perturbaciones se desplazan en una sola dirección.
Si dentro de un tubo no opera ningún movimiento, la columna de aire tiene igual presión en todos sus puntos.

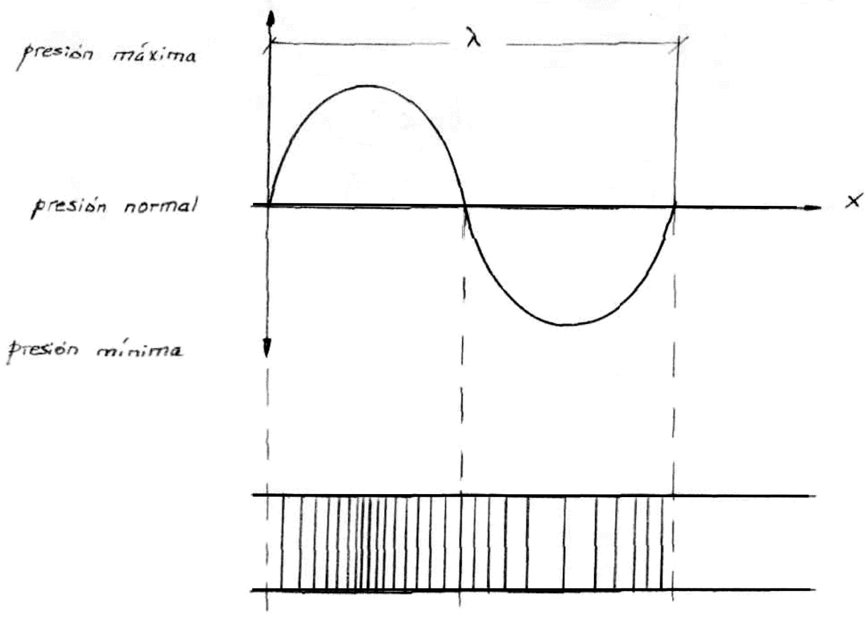


Pero si con un émbolo efectuamos sucesivamente compresiones y descompresiones del aire, generaremos un tren de ondas viajeras que recorrerán el largo del tubo.

En el gráfico están dibujadas con líneas paralelas, distintas porciones de aire. Según sea el movimiento del émbolo, las compresiones y rarefacciones del aire se traducen en el gráfico en variaciones de la distancia entre líneas. Cada porción de aire realiza un movimiento oscilatorio igual al del émbolo generador.



Podemos también graficar la onda detenida en un instante determinado. El siguiente dibujo muestra las zonas o porciones de aire y sus estados de presión respectivos.



- ***Interferencia de Onda***

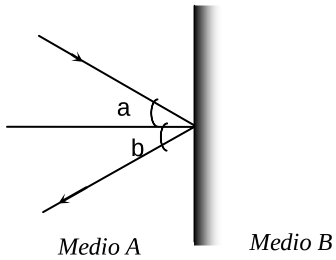
Es el efecto físico producido por la superposición de dos o más trenes de ondas. La resultante se puede obtener de la suma de movimientos. El movimiento de una partícula de aire alcanzada por dos ondas cualquiera, es el resultado de la composición de los movimientos que esas ondas le imprimirían por separado. Por ejemplo, como en el caso de movimientos, una onda compleja periódica podrá ser analizada como la suma de un número de ondas sinusoidales cuyas frecuencias sean múltiplos enteros.

IV. COMPORTAMIENTO DE LAS PERTURBACIONES

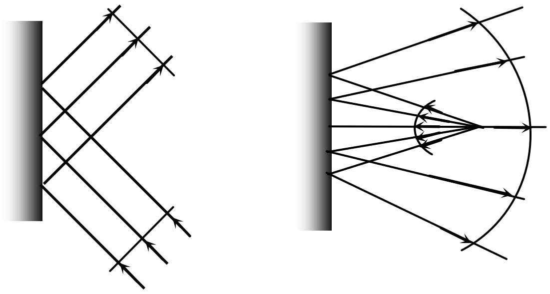
Cuando una onda incide sobre la superficie de separación del medio elástico en que viaja, y de otro medio, cuya densidad es diferente, pueden suceder varas cosas:

1) Reflexión

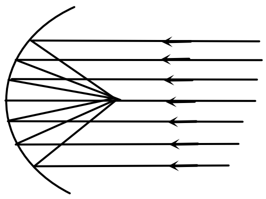
La diferencia de densidad de ambos medios es muy grande, entonces la onda "rebota" contra el segundo medio sin atravesarlo. Ejemplo: onda que choca contra la pared de una sala.
En la reflexión, el ángulo del rayo reflejado es igual al ángulo del rayo incidente. Los dos ángulos son medidos sobre una perpendicular a la línea de separación de los medios.
El gráfico corresponde a la reflexión de una perturbación unidireccional, representada por un rayo.



Consideremos ahora a una perturbación en dos direcciones. Su frente puede ser plano o circular.

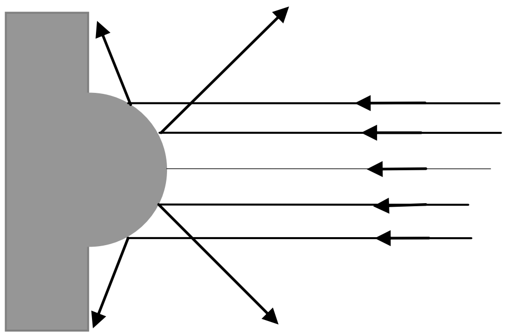


Si la superficie de separación de los medios no es plana, sino parabólica, los rayos se concentran en el **foco** de la parábola:

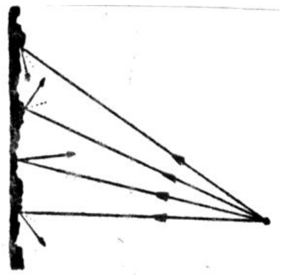


Frente plano que incide sobre una superficie parabólica

En una superficie convexa se produce una dispersión de las perturbaciones:

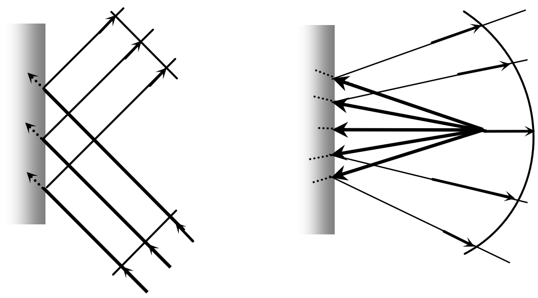


Reflexión difusa: se produce cuando el tamaño de las irregularidades de una superficie reflectora son comparables al de la longitud de la onda incidente.



2) Absorción

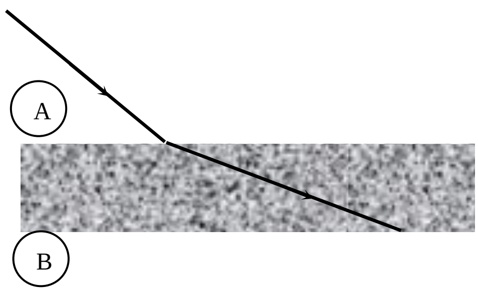
En rigor, no existe reflexión total. Parte de la energía de una onda incidente se transfiere al segundo medio, produciéndose pérdidas.



El índice de absorción de un medio depende de sus características materiales (estructura molecular, densidad, espesor, etc.)
Los **coeficientes de absorción** se hallan tabulados y son indispensables para el diseño acústico de salas. Los cuerpos sólidos (metal, mármol, etc.) producen mucha menor absorción que los porosos (cortinados, alfombras, etc.)
La absorción también depende de la frecuencia. A menor longitud de onda (mayor frecuencia), se produce mayor absorción.

3) Refracción

Es el cambio de dirección que experimenta una propagación que incide oblicuamente sobre la superficie de separación del medio que viaja y de otro, el cual atraviesa.



Cuando el frente de la onda incide perpendicularmente a la superficie de separación de los dos medios, no se produce refracción es decir, no existe cambio en la dirección de la propagación. (*Fig. a*)

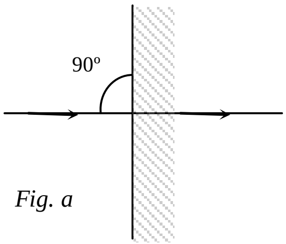


Fig. a

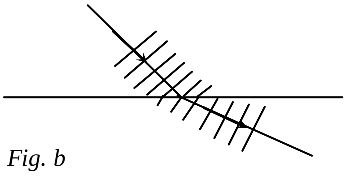
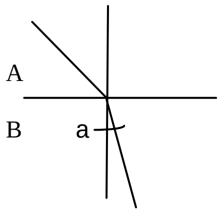
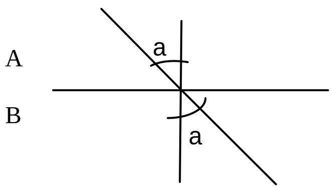


Fig. b

La refracción se debe a la diferencia de velocidad de propagación que los dos medios poseen. Un frente de onda, al ingresar oblicuamente en otro medio, sufre un desplazamiento. El frente va cambiando parcialmente su velocidad a medida que toma contacto con el segundo medio. (*Fig b*)
El ángulo de refracción variará de acuerdo con la relación entre las velocidades de propagación.

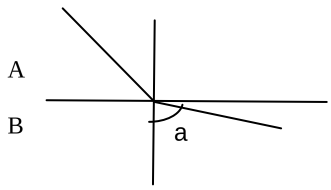


$V_A > V_B$



$V_A = V_B$

No hay refracción



$V_A < V_B$

4) Difracción

Es la dispersión que experimenta una perturbación al incidir sobre objetos o agujeros.
para que se produzca difracción, los objetos o agujeros deberán tener un tamaño menor a la longitud de la onda incidente.
Las longitudes de onda en música, suelen ser de 0.03 m a 12 m. Por lo tanto, es muy factible que se produzcan difracciones.
ejemplos:

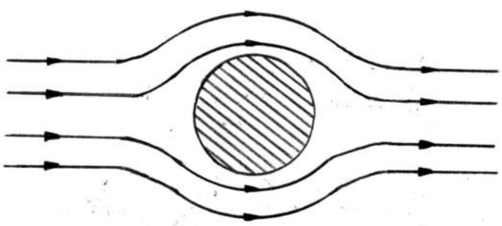
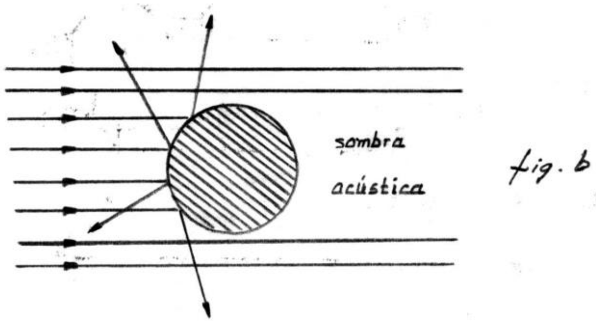
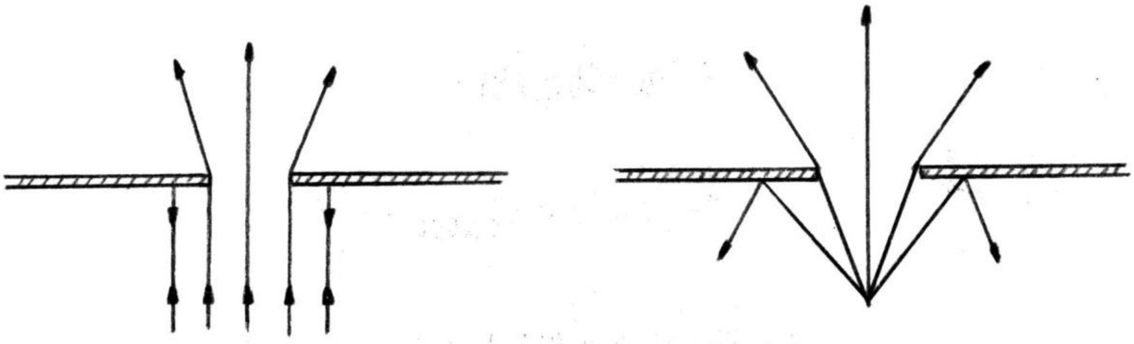


fig. a

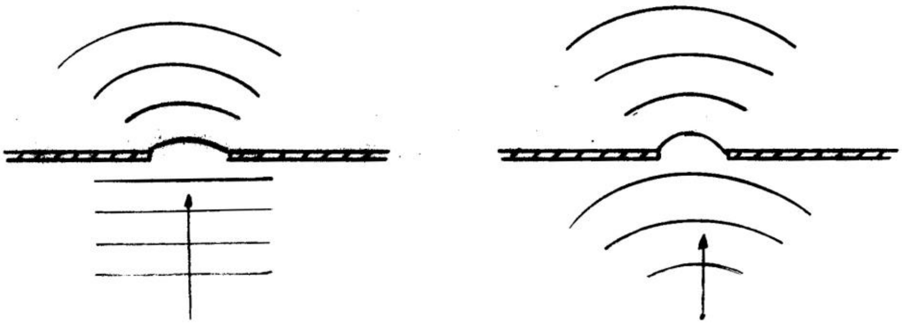
La longitud de onda (λ) es mayor que el tamaño del objeto: se produce difracción y las perturbaciones rodean al mismo (*Fig. a*)



La longitud de onda es menor que el tamaño del objeto: no existe difracción y se produce sombra acústica (*Fig. b*)



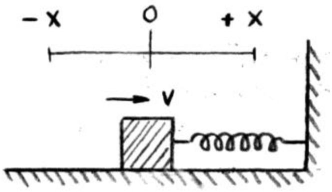
En ambos casos (frente plano y circular) la onda se dispersa en la abertura como si se hubiera generado allí, por lo cual se produce difracción.



V. CLASIFICACIÓN DE LAS VIBRACIONES

Relaciones energéticas en un movimiento oscilatorio

Podemos interpretar a la energía cinética de un cuerpo como su capacidad para producir trabajo en virtud de su movimiento. La energía cinética (*K*) depende de la masa y de la velocidad que el cuerpo posee.



$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

En un sistema masa-resorte, la masa, al pasar por el punto de equilibrio (*0*), posee velocidad máxima. En este punto, por consiguiente, la energía cinética es máxima y capaz de realizar trabajo. Recordemos que realizar trabajo (*W*) significa ejercer una determinada fuerza (*F*) a lo largo de una cierta distancia (*d*).

$$W = F \, . \, d$$

El teorema del trabajo y la energía nos dice que el trabajo realizado entre dos puntos de un recorrido, es igual a la diferencia de energía que ambos puntos poseen. En nuestro sistema masa-resorte, el trabajo realizado por el cuerpo desde 0 hasta x es:

$$W = K - K_0 = \frac{1}{2}mv_{\max.}^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

Como V_0 es igual a cero, no existe energía cinética en el punto de elongación máxima. Esto significa que tal energía se ha consumido en realizar un trabajo. Resulta obvio que el trabajo se ha aplicado al resorte para comprimirlo. En rigor, la energía total del sistema no se ha perdido, sino simplemente se ha transformado. Vale decir, la energía cinética del cuerpo se convirtió en energía potencial (*U*) acumulada en el resorte. La energía potencial representa una forma de energía almacenada, la cual puede ser recobrada y convertida nuevamente en energía cinética. La transformación de energía cinética en potencial y viceversa, es la que permite que el sistema oscile. Si sobre el sistema no actúan fuerzas de rozamiento, las oscilaciones se repetirán infinitamente, dado que la energía total (*K* + *U*) no se pierde, sino que permanece constante. Cuando *K* aumenta, *U* disminuye, y así cíclicamente.
K + *U* es constante.
La fuerza que ejerce el resorte tiene la siguiente fórmula:

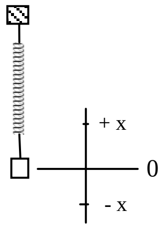
$$F = k\,x$$

donde *k* es la constante elástica del resorte (que depende de las características materiales), y *x* es la distancia con respecto a su punto de equilibrio. A medida que estiro o comprimo el resorte, *x* aumenta, y por consiguiente aumenta la fuerza que él hace para volver al estado de equilibrio.
Por último, la energía potencial es:

$$U = \frac{1}{2}kx^2$$

La fórmula nos indica que cuanto más se aleja el resorte de la posición de equilibrio, mayor es su energía potencial.

Vibraciones libres:son producidas por un sistema ideal en el que no actúan fuerzas de rozamiento de ningún tipo.



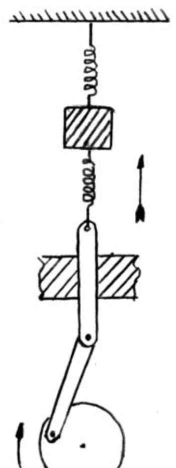
x	*F*	*a*	*V*	*K*	*U*
-x	Máxima inferior	Máx. inf.	0	0	Máx.
0	0	0	Máx.	Máx.	0
+x	Máxima superior	Máx. sup.	0	0	Máx.

Cuando *k* es grande, el resorte es más rígido y aumenta la frecuencia de oscilaciones.

Vibraciones amortiguadas: la amplitud del movimiento va disminuyendo gradualmente debido a las fuerzas de rozamiento (internas, contacto con el medio) hasta detenerse. La energía del sistema se va disipando, no permanece constante. En la sensación sonora, esto se traduce como una disminución gradual de la intensidad. La frecuencia de oscilaciones del sistema no cambia, solamente lo hace su amplitud.

Vibraciones entretenidas: son aquellas en las cuales suministro la energía suficiente como para contrarrestar las fuerzas de rozamiento existentes. En un reloj de péndulo, por ejemplo, la energía almacenada en la cuerda permite que éste no se detenga. La energía es aplicada en igual medida que la energía disipada por rozamiento.

Vibraciones forzadas: Todo sistema vibra con una frecuencia natural que le es propia, y que depende de su masa y su elasticidad. En el sistema masa-resorte, podemos variar la frecuencia natural cambiando la masa o el tipo de resorte. En el caso del resorte, la elasticidad variará de acuerdo a su longitud, al material con que esté construido al número de espiras que posea, etc. Todo esto configura su coeficiente de elasticidad.



Como se ve en la figura, podemos entregar energía al sistema en la medida en que hacemos girar la rueda ubicada en la parte inferior. A bajas revoluciones, la masa del sistema oscila acompasadamente con el movimiento giratorio que lo produce, de manera forzada. A medida que la velocidad de giro aumenta, aumenta también la frecuencia de la masa y el resorte.

Al alcanzarse la frecuencia natural del sistema masa-resorte, su amplitud será varias veces mayor que la amplitud del movimiento de la biela: significa que el sistema ha entrado en **resonancia**.

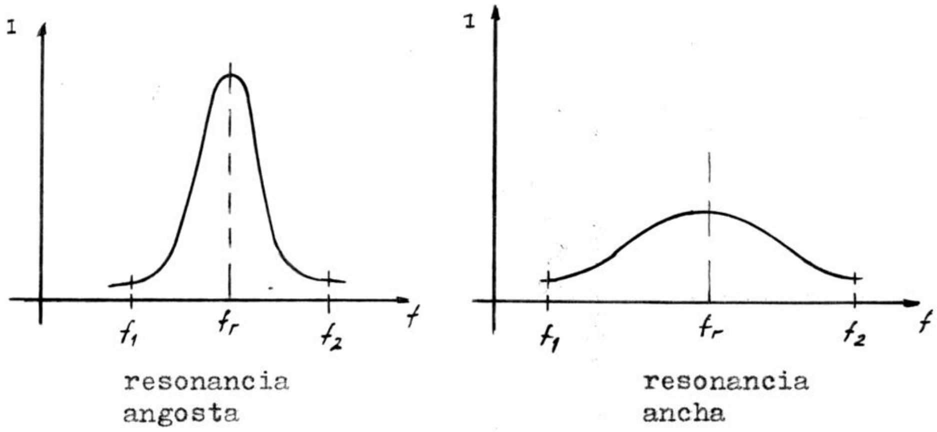
La amplitud de la frecuencia resonante dependerá del grado de amortiguamiento que el sistema posea.

Además puede observarse que mientras la biela sube, la masa desciende, es decir, se produce una oposición de fase al coincidir la frecuencia de la biela con la frecuencia resonante del sistema. Este cambio de fase es gradual, comienza en una frecuencia determinada que podemos llamar f_1. A medida que aumentamos la velocidad de giro aumenta gradualmente la amplitud, y la diferencia de fase se completa hasta oponerse. Luego la amplitud comienza a disminuir a medida que seguimos aumentando la velocidad y nos alejamos de la frecuencia resonante, y la fase tiende a ser la misma que la de la biela (f_2). A la diferencia $f_2 - f_1$ la denominamos ancho de banda, y depende del grado de amortiguamiento del sistema. Para un pequeño amortiguamiento, la amplitud es grande en la resonancia y cae bruscamente a frecuencias mayores y menores próximas (resonancia angosta). Para un amortiguamiento mayor, la amplitud no se eleva ni cae tan rápidamente con el cambio de frecuencia (resonancia ancha).

Agudeza de la resonancia: es el criterio empleado para distinguir el grado de resonancia de un sistema.

Agudeza de la resonancia = $\dfrac{f_r}{f_2 - f_1}$

donde f_r = frecuencia resonante. La amplitud es máxima y la fase se halla en oposición
f_1 = frecuencia donde comienza el aumento de amplitud y el cambio de fase.
f_2 = frecuencia donde decae el aumento de amplitud y se restituye la fase.



El amortiguamiento influye directamente sobre dos aspectos:

1. Tiempo de oscilación: para un amortiguamiento mayor el tiempo que duren las oscilaciones será menor y viceversa.
2. Ancho de la banda de resonancia: un objeto que vibre con cierto amortiguamiento, no lo hará con una sola frecuencia, sino con una banda de frecuencias próximas. A mayor amortiguamiento corresponde un mayor ancho de banda.

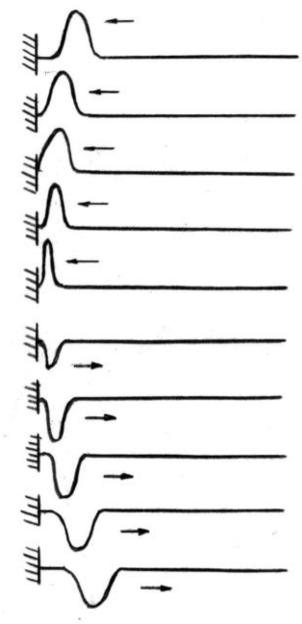
Resonancia: podemos definirla ahora como el incremento de amplitud debido a la absorción de energía proveniente de una fuente externa que oscila con una frecuencia igual o próxima a la frecuencia natural de oscilaciones del sistema considerado. Tal proximidad dependerá del ancho de banda resonante que posea dicho sistema.

Vibración por simpatía: Es la puesta en movimiento de un sistema que recibe las oscilaciones de otro sistema que vibra dentro de la banda resonante del primero. Esta transferencia de energía puede producirse aún cuando no se halla en contacto, es decir, a través del medio elástico (por ejemplo, aire)
Ejemplo: instrumentos musicales entre sí (cuerdas, etc.)
La transferencia de energía al segundo objeto se manifiesta también por un descenso en el tiempo de oscilaciones del primero. Si colocamos próximos dos diapasones, el que transfiere energía vibrará por menos tiempo que si lo hiciera solo. La suma de las energías que ambos poseen es igual a la que tendría el primero vibrando solo.
Un sonido complejo puede hacer resonar a otros objetos cuyas frecuencias naturales no sean iguales. En este caso, alguna componente del sonido complejo tendrá una frecuencia similar a la frecuencia natural del segundo objeto. La resonancia será proporcional a la intensidad relativa de la componente citada con respecto a su fundamental. Por ejemplo, al bajar el pedal de resonancia de un piano, si producimos con otra fuente de sonido complejo (por ejemplo, con la voz humana), notaremos que varias cuerdas del piano vibran por simpatía. Estas cuerdas nos revelan la presencia de componentes de igual frecuencia en el sonido producido.
El uso de resonadores puede permitir la amplificación del sonido, es decir, el aumento de su intensidad. Este crecimiento del nivel sonoro no significa que se "crea" energía en el sistema. Sucede que la energía producida por la fuente vibratoria es más rápidamente disipada

(recordemos el ejemplo de los dos diapasones). la mayor disipación de la energía se traduce en una disminución en el tiempo de vibración. Según sea la amplificación producida, el tiempo de vibración de la fuente con y sin resonador será más o menos marcada.
Algunas veces el efecto de resonancia puede ser nocivo. Un parlante enfatiza las frecuencias reproducidas que se hallan comprendidas dentro de su banda de resonancia.
Por otra parte, el efecto de resonancia puede ser empleado para filtrar componentes espectrales de un sonido, disipando la energía de las componentes no deseadas.

V. ELEMENTOS PRODUCTORES DE OSCILACIONES

Ondas estacionarias

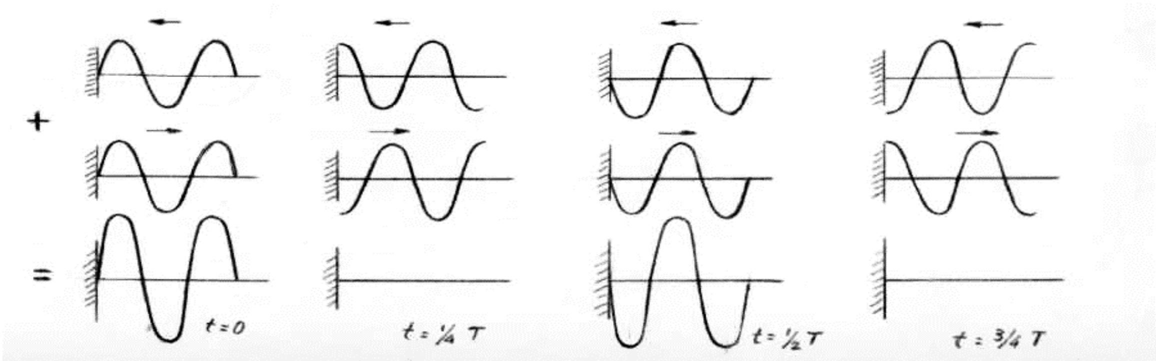


Una perturbación producida en una cuerda sostenida por dos soportes fijos, avanza hacia ambos extremos y se refleja en ellos. Cada reflexión da lugar a una onda que avanza en sentido opuesto. Las dos ondas producidas se combinan según el principio de superposición de movimientos. A la resultante de esta combinación la denominamos **onda estacionaria**.

Para su estudio, consideremos la reflexión de una cuerda sobre un extremo rígido.

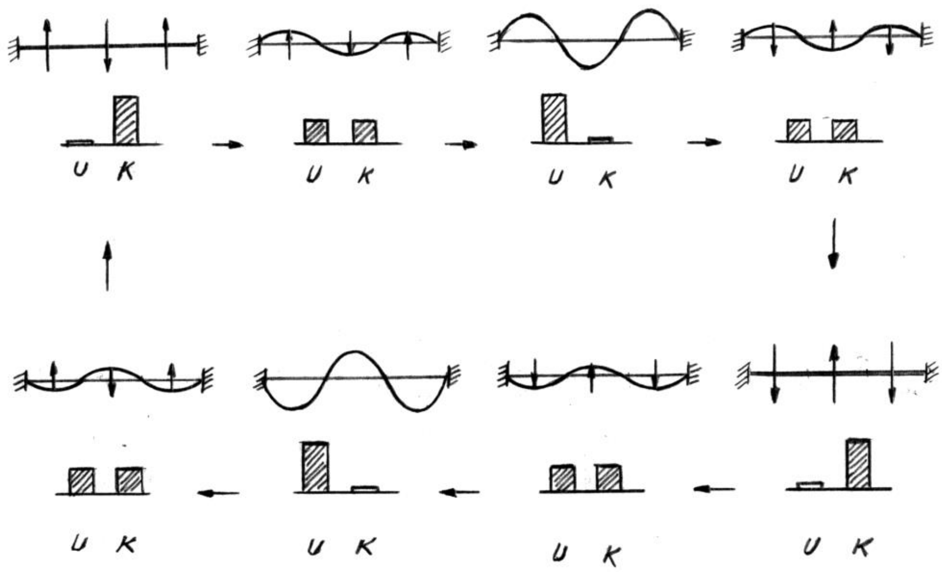
Como se aprecia en la figura, la incidencia sobre el extremo fijo y su reflexión, poseen una diferencia de fase de 180º. Esto se debe a que en el extremo no hay elongación posible. La onda incidente se halla en oposición de fase con respecto a la onda reflejada.

En el gráfico inferior pueden verse las sucesivas resultantes de la combinación de dos ondas que avanzan en sentido contrario, para tiempos iguales a 0, ¼ T, ½ T y ¾ T (cuartos de período).



Como la energía de la onda no puede fluir más allá de los puntos de reposo de la cuerda, decimos que se trata de una onda estacionaria.

El siguiente diagrama muestra los cambios de energía cinética a potencial y viceversa.

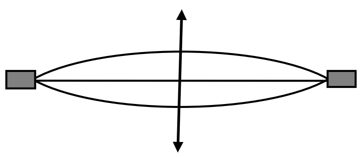


Las flechas representan la magnitud de la velocidad de ciertas partículas de la cuerda. Cuando estas porciones se hallan en su amplitud máxima, la velocidad es cero y la energía potencial es máxima. (recordar el sistema masa-resorte).
Podemos observar, en las figuras representadas, que existen puntos de la cuerda que no experimentan ningún tipo de elongación. A estos puntos los denominamos **nodos**. Por otra parte, existen otros puntos que se desplazan hasta la amplitud máxima de la envolvente que la cuerda describe. Estos otros se llaman **vientres**, y al igual que los nodos, se hallan separados por una distancia igual a $\lambda/2$. (media longitud de onda)
En las ondas viajeras o progresivas, vimos que la amplitud de todas las partículas de la cuerda eran iguales que la perturbación las alcanzaba.
En las ondas estacionarias, en cambio, cada partícula de la cuerda tiene asociada una amplitud que le es propia, y que va, según su ubicación, desde cero (nodo) a dos veces la amplitud de la onda (vientre).

Estudio de los elementos que producen vibraciones

A- CUERDAS

Una cuerda es susceptible de vibrar de acuerdo a cuatro modos:
<u>Vibración transversal:</u> es la más importante, ya que determina la altura fundamental del sonido producido. La ley de la frecuencia fundamental de la vibración transversal es, según Taylor:

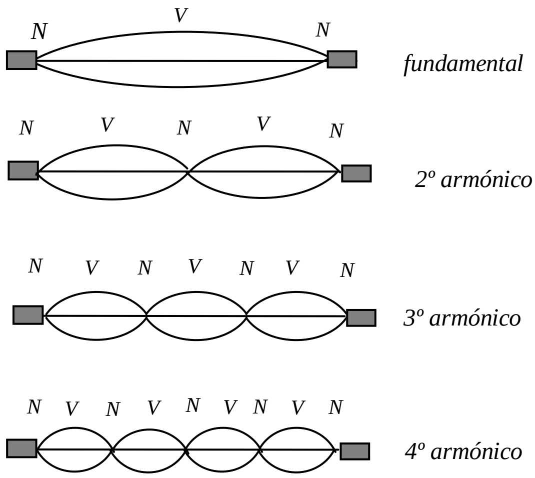


$$f_t = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{m}} \qquad \text{[Hz]}$$

donde: L = longitud de la cuerda [m] (metros)
T = tensión de la cuerda [N] (Newtons)
m = masa por unidad de longitud [kg/m]

Viendo la fórmula, se deduce que la frecuencia producida por la cuerda es inversamente proporcional a su longitud (a cuerda más larga, menor frecuencia), y a la raíz cuadrada de su

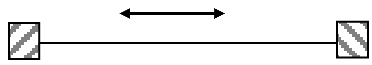
masa (que se halla en relación con el diámetro), pero directamente proporcional a la tensión a la que se halla sometida.
Una cuerda excitada que vibra en toda su longitud, también lo hace por mitades, tercios, cuartos, etc. Estas vibraciones se dan simultáneamente en un movimiento complejo, y producen respectivamente la fundamental, segundo armónico, tercero, cuarto, etc.



La cuerda vibra como un todo (fundamental), pero también lo hace por segmentos (armónicos), que oscilan al mismo tiempo. Las frecuencias armónicas resultan al multiplicar la fundamental por 1, 2, 3, 4, etc. (ver Teorema de Fourier)
En la realidad, las cuerdas presentan cierta rigidez, (no son perfectamente elásticas) y no son homogéneas en toda su extensión. Sería, entonces, más correcto referirse a parciales, en lugar de armónicos, ya que este último concepto sólo es imaginable en cuerdas ideales.
Si apoyamos ligeramente un dedo sobre un lugar determinado de la cuerda, sólo se producirán aquellos armónicos que posean un nodo en ese punto, es decir, evitaremos la producción de vientres. Ejemplo: al rozar una cuerda en un tercio de su longitud, se produce su tercer armónico (quinta compuesta). Por el contrario, si excitamos una cuerda en un punto dado, allí se producirá un vientre, y por consiguiente, no se podrá formar ningún armónico que posea un nodo en ese punto. Significa que el espectro producido por una cuerda, dependerá del punto de excitación elegido. Ejemplo: en el violín, el cambio en la resultante tímbrica es muy notorio al ejecutar un pasaje "sulla tastiera" o "sul ponticello".

Vibración longitudinal

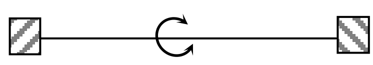
Produce una gama de frecuencias que enriquecen el espectro, en mayor o menor grado, según sea el modo de excitación de la cuerda. En las cuerdas frotadas, por ejemplo, se hace muy evidente al rozar la cuerda con el arco no perpendicular a la misma.



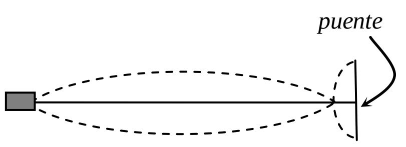
Las vibraciones longitudinales son inseparables de las transversales. Una cuerda que vibra transversalmente debe estirarse y contraerse, produciendo así, vibraciones longitudinales.

Vibración de torsión

Produce, en general, frecuencias más graves que la fundamental por vibración transversal.
Si la oscilación es entretenida, como en caso de las cuerdas frotadas, se halla acompañada de frecuencias armónicas.
Este tipo de oscilación también condiciona la resultante tímbrica. En las cuerdas punteadas, es producida por el roce de los dedos sobre la cuerda (p.e.: guitarra o arpa)



Vibración de octava

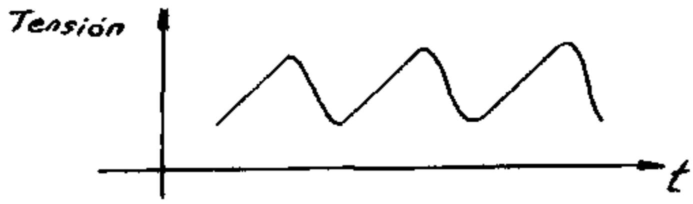


El puente, en los instrumentos de cuerda, no actúa como un punto rígido, sino mas bien como una membrana, que permite la transmisión de las vibraciones a la caja de resonancia.
Si observamos con detenimiento la figura, veremos que la cuerda al oscilar un período completo, fuerza al puente a moverse dos veces (oscilación forzada). O lo que es lo mismo, una oscilación del puente corresponde a un semiciclo de la cuerda. Por lo tanto, la frecuencia de la membrana será el doble de la frecuencia fundamental producida por la cuerda misma. Esta vibración favorece

considerablemente al segundo armónico, y se halla acompañada, además, de sus propios parciales.

Oscilaciones de relajación en las cuerdas frotadas

Son producidas por la acción del arco sobre las cuerdas. El arco, al rozar, produce un estiramiento transversal en la cuerda. Al alcanzar ésta cierta tensión, supera la fuerza de fricción de la cerda y vuelve bruscamente, buscando su posición de equilibrio. Este ciclo se repite sucesivamente, y puede ser representado como una onda diente de sierra, que como sabemos, es rica en armónicos

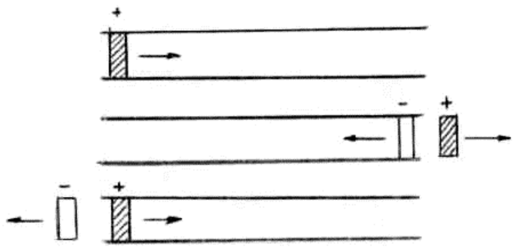


B- COLUMNAS DE AIRE

Al estudiar la propagación de una onda en una columna de aire, vimos que debido a la perturbación originada al principio del tubo, se sucedían una serie de compresiones y rarefacciones entre las moléculas del gas. Cada partícula oscilaba en torno a su posición de equilibrio contagiando el movimiento a sus vecinas, permitiendo así la propagación del movimiento.

Tubos abiertos

Consideremos primero, el caso de una columna de aire que se halla abierta en ambos extremos. Si producimos una onda de compresión, ésta avanzará hacia el extremo opuesto. Al alcanzarlo, seguirá su recorrido hacia el exterior, pero simultáneamente generará una depresión que regresará en sentido contrario hacia el punto de origen (efecto similar ocurre al descorchar una botella). Lo mismo sucederá en el origen –pero con signo contrario-, con lo cual habremos completado un ciclo:



la perturbación precisa recorrer dos veces el tubo para realizarlo.

Sabemos que $v = \frac{e}{t}$ y $t = \frac{e}{v}$

t es el tiempo que tarda la onda en recorre un ciclo, por lo tanto $t = T$ (periodo)
v es la velocidad de propagación de la onda. Si el tubo contiene aire, será aproximadamente 340 m/s.
e es el espacio recorrido en un ciclo, que como vimos recién, es dos veces la longitud del tubo ($2L$)

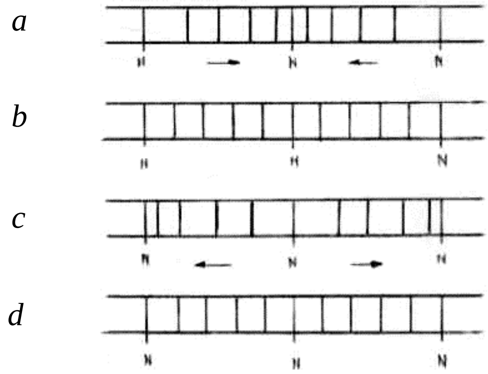
Reemplazando:

$$T = \frac{2L}{v}$$

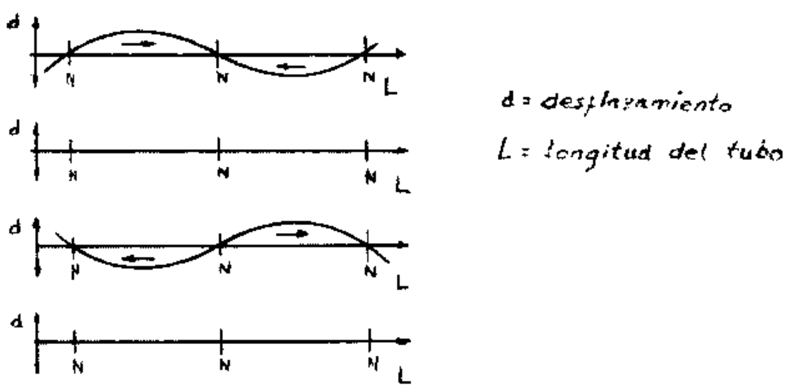
Como f (frecuencia) = 1 / *T*, nos queda:

$$f = \frac{v}{2L}$$

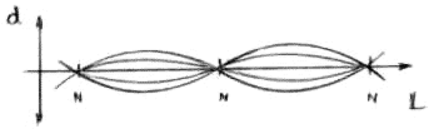
que es la ecuación que relaciona la frecuencia fundamental de un tubo abierto con su longitud. Al excitar la columna de aire (luego veremos cómo) se produce un tren de ondas de ida y otro de vuelta –reflejadas en el extremo opuesto con signo contrario. Esto da lugar a la producción de ondas estacionarias dentro del tubo. Veamos como se manifiestan estas ondas.



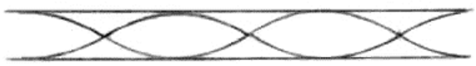
Las líneas marcadas con N representan a los nodos, que son secciones de la columna cuyas moléculas se hallan en reposo, es decir, no oscilan. La figura *a* muestra la posición de un grupo elegido de moléculas que se encuentran en un instante de máximo desplazamiento. En *b*, ha transcurrido un cuarto de ciclo, y todas las moléculas se ubican en sus posiciones de equilibrio. En *c*, medio ciclo más tarde, las moléculas se hallan en su máximo desplazamiento, pero esta vez con sentido contrario. En *d*, las porciones de la columna han retornado a su posición de equilibrio nuevamente (tres cuartos de ciclo). estos comportamientos se repiten periódicamente.
Podemos representar a ésta onda estacionaria en función del desplazamiento que sufren las moléculas de la columna gaseosa:



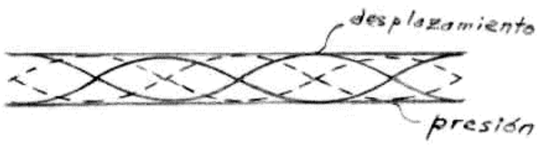
Aquí se muestran cuatro situaciones límites, en realidad suceden pasos intermedios que llevan de una situación a otra:



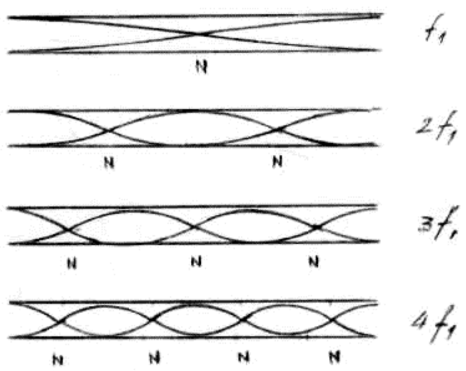
en general suele representarse la ubicación de nodos y vientres de una onda estacionaria en una columna con un gráfico de éste tipo:



Analicemos ahora lo que sucede con la presión de la columna. Podemos ver en las figuras anteriores que sobre los nodos de desplazamiento se producen consecutivamente compresiones y rarefacciones, dado que las moléculas restantes se dirigen hacia ellos (compresión) y luego se alejan (depresión). En los vientres de desplazamiento, en cambio, la presión permanece constante, porque las moléculas se mueven alternativamente con el mismo sentido, y por lo tanto, no se comprimen ni se descomprimen entre sí. Significa que a un nodo de desplazamiento corresponde un vientre de presión (la presión aumenta y disminuye periódicamente), y a un vientre de desplazamiento corresponde un nodo de presión (la presión permanece constante).



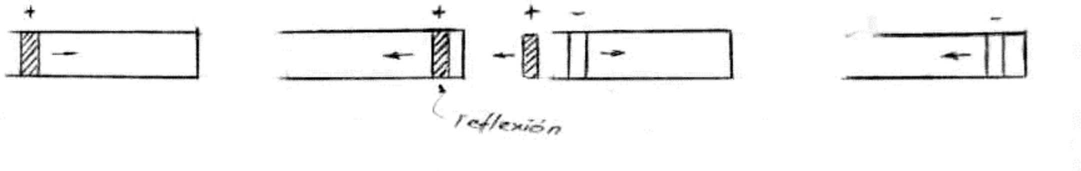
Una columna gaseosa, al igual que una cuerda, puede vibrar de varios modos, los cuales corresponden a la serie armónica. Los gráficos siguientes muestran la ubicación de nodos y vientres de desplazamiento para cada armónico de un tubo abierto.



El tubo, al ser abierto, permite la existencia de vientres de desplazamiento en ambos extremos, ya que las moléculas, en estas regiones, pueden vibrar libremente.

Tubos cerrados

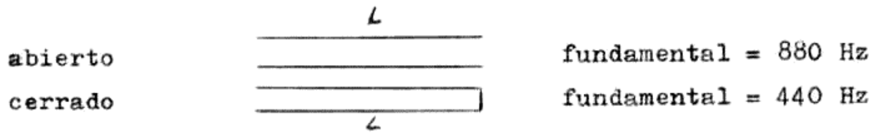
Son aquellos en los cuales un extremo se halla cerrado y el otro abierto. La perturbación debe recorrer el tubo cuatro veces para completar un ciclo:



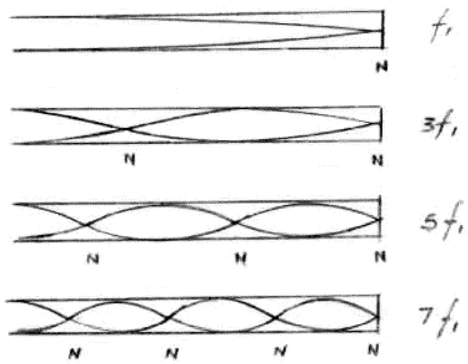
Por lo tanto, la frecuencia es:

$$f = \frac{v}{4L}$$

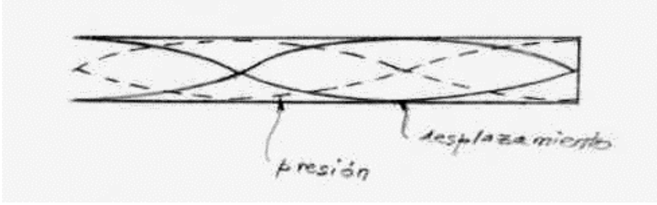
Significa que un tubo cerrado que produce la misma frecuencia fundamental que un tubo abierto, es la mitad de largo. O lo que es lo mismo: un tubo cerrado y otro abierto, ambos de igual longitud, producen respectivamente un sonido determinado y su octava superior.
Por ejemplo:



El extremo cerrado no permite la existencia de desplazamiento molecular en torno a él (al igual que el extremo rígido de una cuerda). Solo podrán producirse, en un tubo cerrado, aquellos armónicos que posean un nodo de desplazamiento en el extremo cerrado y un vientre en el extremo abierto. Tales componentes posibles son las de orden impar:



La presión sobre el extremo cerrado varía entre un máximo y un mínimo, en el extremo abierto permanece constante (presión ambiente)

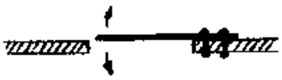


Excitación de las columnas de aire

1- Ruido Eólico

Una corriente de aire al chocar con un objeto produce remolinos que generan una banda de ruido determinada. el viento, por ejemplo, al pasar entre las hojas de los árboles, produce ruido eólico. El palo zumbador, un instrumento primitivo, realiza el efecto contrario: no es el aire quien se mueve, sino el objeto, que lo atraviesa girando a gran velocidad.
la frecuencia promedio de la banda de ruido depende de la velocidad que posee el aire en relación con el objeto. En el esquema puede verse un tubo de órgano asociado a un productor de oscilaciones por medio de filo. El aire incide sobre ese borde, produciendo remolinos, los cuales generan pulsos de presión que ingresan al tubo excitando a la columna de aire. La columna entra en resonancia, dado que su frecuencia natural se halla comprendida en la banda de ruido eólico. Inmediatamente las vibraciones de la columna obligan al aire incidente a entrar al tubo o salir al exterior de acuerdo a vibraciones forzadas producidas por la columna que vibra con su frecuencia natural.
En la flauta traversa, la quena o el sikus, los labios del ejecutante dirigen el chorro de aire directamente sobre el borde filoso (embocadura directa). En la flauta dulce, en cambio, los labios apoyan sobre un elemento denominado portaviento, que dirige la corriente de aire hacia el filo (embocadura indirecta).

2- Lengüetas
Existen dos tipos:
a) lengüetas libres:
Generalmente son construidas de metal. La lámina que actúa como lengüeta oscila libremente a través del orificio por donde circula el aire. Su elasticidad le permite realizar un movimiento de vaivén.



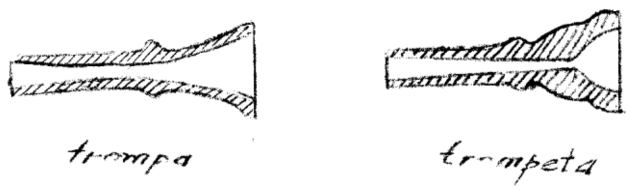
Son usadas en algunos tubos de órgano, en el bandoneón, el acordeón y la armónica.
La variación en la presión del aire solo actúa sobre la intensidad del sonido producido.

b) Lengüetas batientes
Se subdividen en **simples** y **dobles**
La lengüetas batientes, en su posición de equilibrio, permiten el paso de una pequeña cantidad de aire. Una vez puestas en vibración, actúan como una válvula que se abre y se cierra habilitando o no la circulación de la corriente de aire que incide sobre ella.
Cuando se trata de lengüetas simples, éstas baten sobre el soporte.

En cambio, las dobles baten entre sí

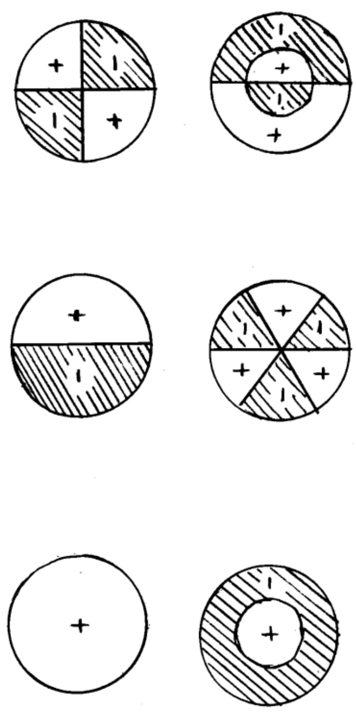
simples: ej. clarinete y saxo. Los labios s apoyan sobre una boquilla que sostiene a la lengüeta.
dobles: ej. oboe y fagot. Los labios apoyan directamente sobre ambas lengüetas.
Una lengüeta batiente no asociada a una columna de aire, varía su frecuencia de oscilación con el cambio de presión de aire.
Al igual que en los instrumentos que excitan la columna por medio de un borde filoso, el movimiento de las lengüetas es controlado por la columna, una vez que ésta ha entrado en resonancia.

c) Boquillas
Son dispositivos que se adosan al tubo con el fin de colocar de manera correcta los labios. en los instrumentos denominados de boquilla (trompa, trompeta, trombón y tuba) los labios actúan como una lengüeta batiente doble, denominada lengüeta doble membranácea.



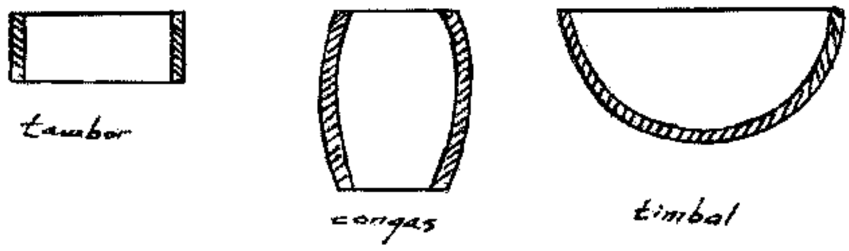
C - MEMBRANAS

Una membrana considerada ideal debe ser flexible, uniforme e infinitesimalmente delgada. Al excitar una membrana se producen ondas estacionarias en dos dimensiones. Los bordes se hallan fijos, y por lo tanto, representan nodos. Veamos los seis primeros parciales de una membrana con sus respectivas líneas nodales:



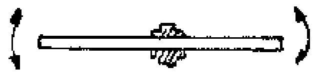
+ representa una zona de elevación - es una depresión

La forma de la caja donde es aplicada la membrana, determina el grado de tonicidad del instrumento. A medida que el extremo inferior se va cerrando, aumenta el grado de tonicidad del sonido (la altura del sonido se hace más reconocible).

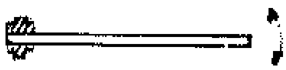


D- VARILLAS Y BARRAS

Producen vibraciones transversales, longitudinales y de torsión.
Hoy dos tipos:
a) **simétricas**: están sujetas en su parte media. poseen vientres en ambos extremos.

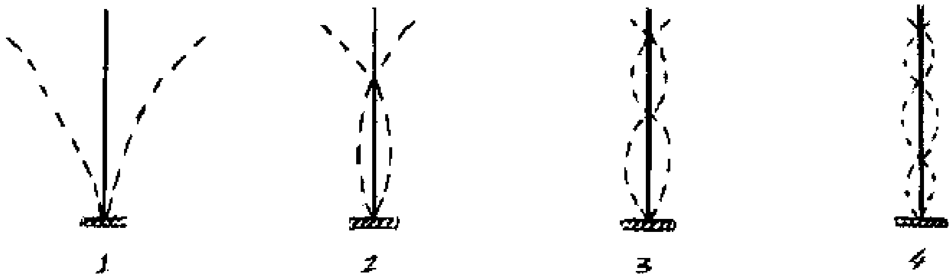


b) **asimétricas**: sujetas solo en un extremo, poseen un nodo allí y un vientre en el otro extremo.



Los nodos no se hallan espaciados de manera uniforme. Su ubicación en una varilla de 100 cm de longitud, fija en un extremo y libre en el otro es:

parciales	*ubicación de nodos*
1- f_1	0
2- 6.267 f_1	0 – 77.4
3- 17.55 f_1	0 – 50 – 86.8
4- 34.39 f_1	0 – 35.6 – 64.4 – 90.5



Su frecuencia fundamental por vibración transversal está dada, aproximadamente por

$$f = k\frac{t}{L^2}$$

t = espesor de la varilla (medido sobre la dirección de oscilación)
k = coeficiente d la elasticidad del material
L = longitud de la varilla

Un tipo especial de varillas es el siguiente:

Los soportes se hallan separados de los extremos por una distancia igual a 0.224xL. Sus parciales son aproximadamente f_1 ; 2.76 f_1 ; 5.41 f_1.
El xilófono, el vibráfono y la marimba emplean barras de éste tipo. La marimba y el vibráfono poseen tubos que actúan como resonadores, reforzando el sonido producido por las barras.

BIBLIOGRAFÍA

Olson. **Musical Engineering**. Mc Graw Hill. NY. 1952.

Backus. **The Acoustical Foundations of Music**. Norton & Co. NY. 1969.

Pierce. **Los sonidos de la Música**. Labor. 1985.

Benade. **Fundamentals of Musical Acoustics**. Oxford Univ. Press. NY. 1976.

Roederer. **Introduction to the Physics and Psychophysics of Music**. Springer Verlag. NY. 1975

Pierce. **The Science of Musical Sound**. Freeman. NY. 1985

Resnick-Halliday. **Física II**. CECSA. México. 1961.