



2do Material de estudio Acústica y Organología I

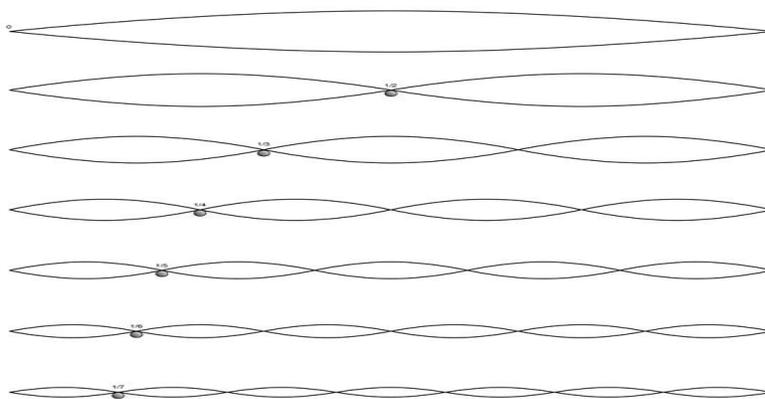
El timbre

Es la cualidad que confiere al sonido los armónicos que acompañan a la frecuencia fundamental. La voz propia de cada instrumento que distingue entre los sonidos y los ruidos. Esta cualidad es la que permite distinguir dos sonidos, por ejemplo, entre la misma nota (tono) con igual intensidad producida por dos instrumentos musicales distintos. Se define como la calidad del sonido. Este fenómeno es debido a que un sonido no está formado sólo de una frecuencia, sino por la suma de otras que son múltiplos de la fundamental. Estas otras frecuencias varían en intensidad y son llamadas armónicos. La proporción e intensidad de estos armónicos son diferentes en cada instrumento y es por ello que podemos diferenciar sus sonidos. En otras palabras, el timbre es la cualidad que confieren al sonido los armónicos que acompañan a la frecuencia fundamental, y viene determinado por la cantidad e intensidad de estos armónicos.

Recordemos el Monocordio de Pitágoras visto en clases, y viendo la ecuación armónica matemática canónica decimos que:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} \cdots$$

Y a partir de ello podemos visualizar los primeros 16 armónicos presentes.



Nº de Armónico	Frecuencia	Nota	Intervalo
1º armónico	66 Hz	do ₁	tono fundamental (el primer do a la izquierda del piano)
2º armónico	132 Hz	do ₂	octava
3º armónico	198 Hz	sol ₂	quinta
4º armónico	264 Hz	do ₃	octava
5º armónico	330 Hz	mi ₃	tercera mayor
6º armónico	396 Hz	sol ₃	quinta, una octava sobre el 3º
7º armónico	462 Hz	sib ₃	séptima menor (muy desafinada)
8º armónico	528 Hz	do ₄	octava
9º armónico	594 Hz	re ₄	segunda mayor, una quinta sobre el 6º
10º armónico	660 Hz	mi ₄	tercera mayor, octava del 5º
11º armónico	726 Hz	fa# ₄	cuarta aumentada
12º armónico	792 Hz	sol ₄	quinta justa, una octava sobre el 6º
13º armónico	858 Hz	la ₄	sexta mayor (muy desafinada)
14º armónico	924 Hz	sib ₄	séptima menor (muy desafinada, igual que el 7º)
15º armónico	990 Hz	si ₄	séptima mayor, una quinta sobre el 10º
16º armónico	1056 Hz	do ₅	octava



Clasificación de las ondas

Las ondas se clasifican atendiendo a diferentes aspectos:

1. En función del medio en que se propagan
2. En función de su propagación o frente de onda
3. En función de la dirección de la perturbación
4. En función de su periodicidad

1. En función del medio en que se propagan

Ondas Mecánicas

Son aquellas que necesitan un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) para propagarse. Las partículas del medio oscilan alrededor de un punto fijo, por lo que no existe transporte neto de materia a través del medio. En otras palabras una onda mecánica es una perturbación de las propiedades mecánicas (posición, velocidad y energía de sus átomos o moléculas) que se propaga a lo largo de un material. Por ejemplo, cuando se sacude un extremo de una alfombra, esta no se desplaza, sin embargo una onda se propaga a través de ella.

Ondas electromagnéticas

Son aquellas que se propagan por el espacio sin necesidad de un medio, pudiendo, por tanto, propagarse en el vacío. Esto es debido a que las ondas electromagnéticas son producidas por oscilaciones de un campo eléctrico en relación con un campo magnético asociado.



Ondas gravitacionales

Son perturbaciones que alteran la geometría misma del espacio-tiempo y que es común representarlas viajando en el vacío, pero técnicamente no podemos afirmar que se desplacen por ningún espacio sino que en sí mismas son alteraciones del espacio-tiempo.

2. En función de su propagación

Ondas unidimensionales

Son aquellas que se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio, como las ondas en las cuerdas. Si las ondas se propagan en una dirección única, sus frentes de onda son planos y paralelos.

Ondas bidimensionales o superficiales

Son ondas que se propagan en dos direcciones. Pueden propagarse, en cualquiera de las direcciones de una superficie, por ello, se denominan también ondas superficiales. Un ejemplo son las ondas que se producen en una superficie líquida en reposo cuando se deja caer una piedra en ella.

Ondas tridimensionales o esféricas

Son ondas que se propagan en tres direcciones. Las ondas tridimensionales se conocen también como ondas esféricas, porque sus frentes de onda son esferas concéntricas que salen de la fuente de perturbación expandiéndose en todas direcciones. Ejemplos de ondas tridimensionales son las ondas sonoras (mecánicas) y las ondas electromagnéticas.



3. En función de su dirección de perturbación

Ondas longitudinales

Son aquellas que se caracterizan porque las partículas del medio se mueven (o vibran) paralelamente a la dirección de propagación de la onda. Ej.: El Sonido (ondas sonoras) o las ondas sísmicas.

Ondas transversales

Son aquellas que se caracterizan porque las partículas del medio vibran perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Ej.: La cuerda.

4. En función de su periodicidad

Ondas periódicas

La perturbación local que las origina se produce en ciclos repetitivos, por ejemplo, una onda senoidal.

Ondas no periódicas

La perturbación que las origina se da aisladamente o, en el caso de que se repita, las perturbaciones sucesivas tienen características diferentes. Las ondas aisladas también se denominan pulsos.



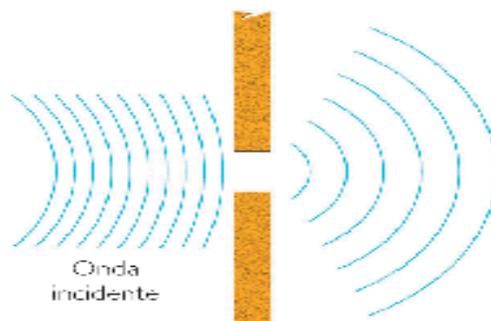
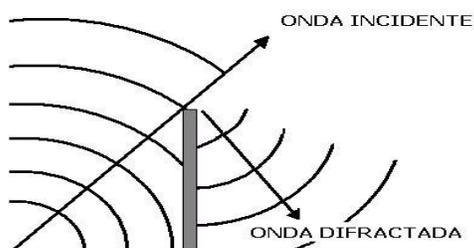
Fenómenos ondulatorios

Todas las ondas tienen un comportamiento común bajo un número de situaciones estándar, a esto se les llama fenómenos ondulatorios. Las ondas pueden experimentar los siguientes:

- **Difracción**
- **Efecto Doppler**
- **Interferencia**
- **Reflexión**
- **Refracción**
- **Onda de choque**

Difracción

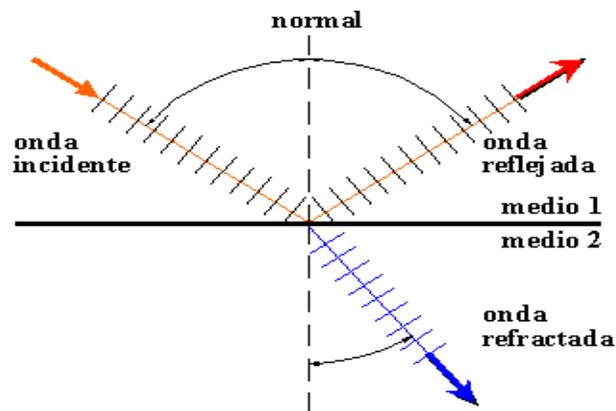
Consiste en el curvado y esparcido de las ondas cuando encuentran un obstáculo o al atravesar una rendija. Cuando una onda viajera se encuentra en su recorrido un obstáculo que limita parcialmente su propagación, puede rodear el obstáculo y seguir propagándose. Los bordes de los obstáculos se convierten en centros emisores. Por esta razón una persona que habla en una habitación es escuchada por otra persona que está en la habitación contigua.





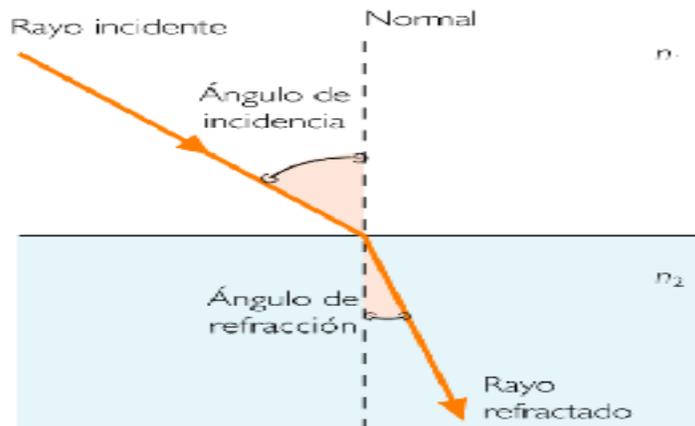
Reflexión

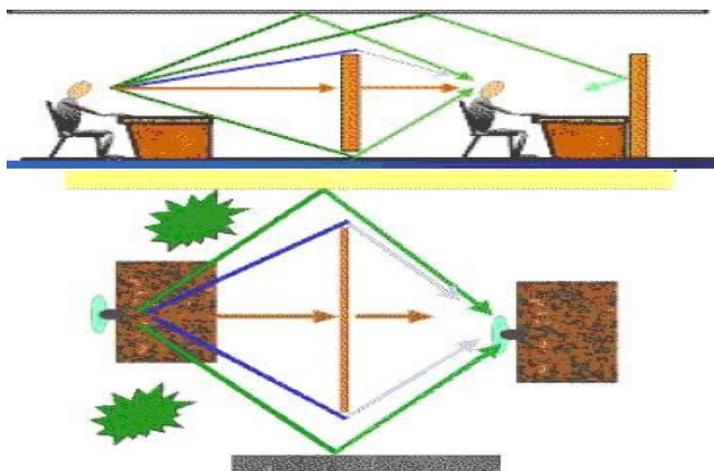
La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. Ejemplos comunes son la reflexión de la luz, el sonido y las ondas en el agua.



Refracción

Ocurre cuando una onda cambia de dirección al entrar en un nuevo medio en el que viaja a distinta velocidad.

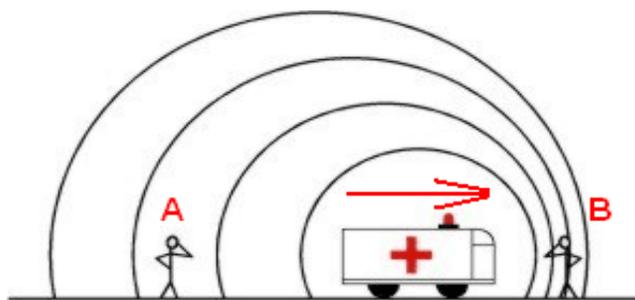




La línea azul representa la difracción del sonido; la verde, la reflexión y la café, refracción.

Efecto Doppler

Se produce en ondas sonoras cuando un centro emisor se mueve rápido en el espacio y el receptor percibe un cambio en la frecuencia de la onda que genera el sonido, pero este cambio de frecuencia percibido es solo aparente.

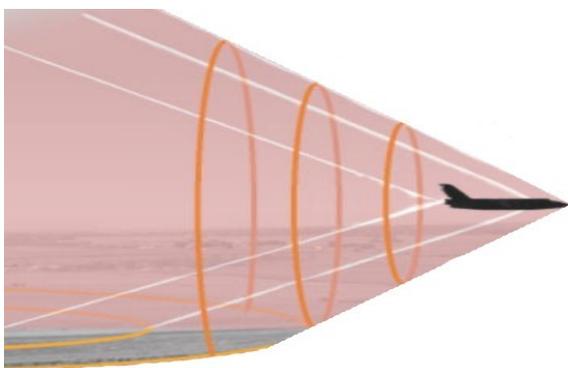


En la foto se observa que el receptor A percibe un sonido más grave (menor frecuencia), mientras que el receptor B percibe un sonido más agudo (mayor frecuencia).



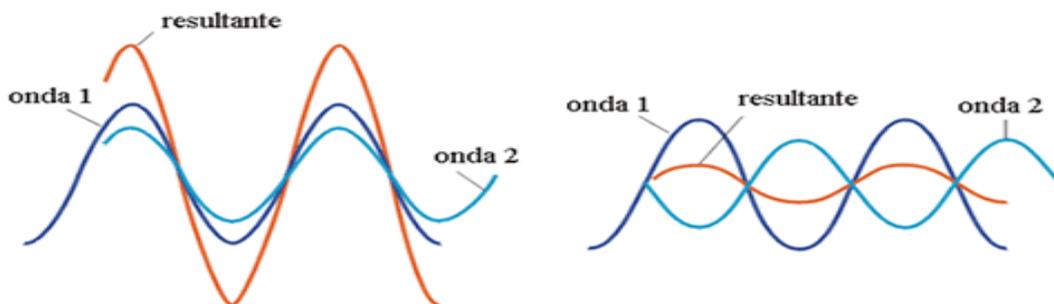
Onda de choque (Cono de Mach)

Ocurre cuando varias ondas que viajan en un medio se superponen formando un cono. El ejemplo más común de este fenómeno es el desplazamiento de los aviones.



Interferencia (Superposición de Ondas)

Ocurre cuando dos ondas se combinan al encontrarse en el mismo punto del espacio. Al propagarse dos o más ondas por un medio, la perturbación total resultante es la suma de las perturbaciones de ambas ondas. La interferencia puede ser constructiva (izquierda) o destructiva (derecha).





Onda Estacionaria

Una onda estacionaria es aquella que permanece fija, sin propagarse a través del medio. Se caracterizan por presentar regiones donde la amplitud es nula (nodos), y regiones donde es máxima (vientres). La distancia entre dos nodos o vientres consecutivos es justamente $\lambda / 2$, donde λ es la longitud de onda de la onda estacionaria. Una onda estacionaria se forma por la interferencia de dos ondas de la misma naturaleza con igual amplitud, longitud de onda (o frecuencia) que avanzan en sentido opuesto a través de un medio.

Cálculos para determinar los fenómenos ondulatorios

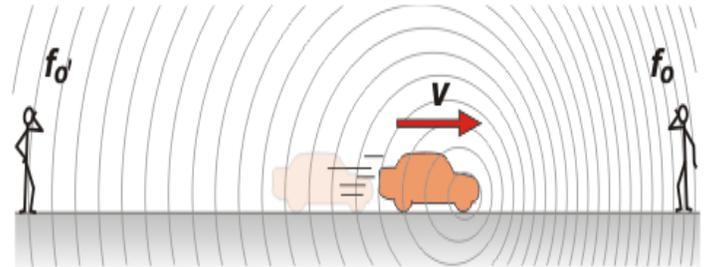
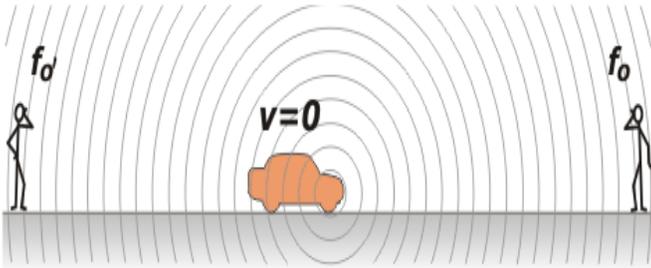
Efecto Doppler

Conociendo la velocidad del sonido, v_s , y la velocidad de acercamiento o alejamiento entre la fuente y el observador, v , y la frecuencia de la fuente, f , se puede calcular la frecuencia observada, f_o , con la fórmula:

$$f_o = f \cdot v_s / (v_s - v) \text{ (fuente u observador acercándose)}$$

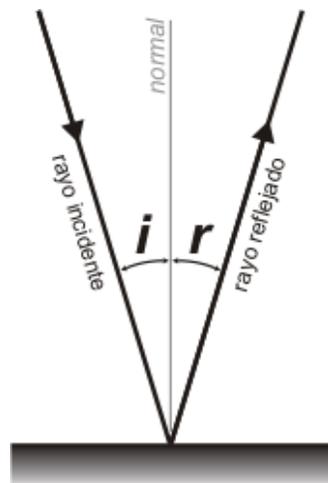
$$f_o' = f \cdot v_s / (v_s + v) \text{ (fuente u observador alejándose)}$$

Lo que importa para que el fenómeno ocurra es que el observador y la fuente se acerquen o se alejen entre sí. No importa cuál de los dos se mueve realmente.



Reflexión

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie plana una parte de la onda rebota y otra parte es absorbida. Cuanto más lisa y pulida sea la superficie más ordenadamente rebota. Para comprender las leyes de la reflexión resulta muy práctico tomar una haz muy fina, o sea, un rayo. El ángulo con que incide en la superficie de reflexión, i , (medido respecto a una recta imaginaria normal a la superficie) es igual al ángulo con que sale rebotado, r , y además ambos rayos y la recta normal se hallan en el mismo plano. ($i = r$)





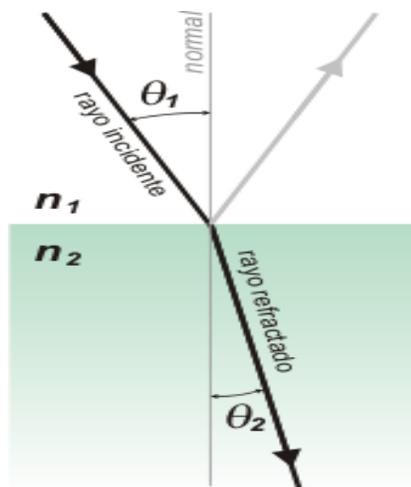
Refracción

Ley fundamental de la Refracción: La razón entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre las velocidades del movimiento ondulatorio en los dos medios.

Cuando una onda pasa de un medio a otro atravesando una superficie de separación entre ambos medio lisa y uniforme, ocurre un fenómeno llamado refracción: al pasar por la superficie la onda se desvía. Siendo n_1 y n_2 los índices de refracción de los medios por los que viaja la onda, se cumple que:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

donde θ_1 y θ_2 son los ángulos que forman los rayos incidente y refractado con la recta normal a la superficie de separación de los medios. Si el segundo medio es más denso $n_1 < n_2$, entonces el rayo refractado se acerca a la normal. Si, en cambio el segundo medio es menos denso, el rayo refractado se aleja de la normal. En el esquema de acá al lado podría tratarse de aire (arriba) y agua (abajo).





Ondas estacionarias

Modos de vibrar de una cuerda tensa y fija en los extremos

Al hacer vibrar una cuerda se produce automáticamente una onda estacionaria con un nodo en cada extremo.



Por lo tanto debe haber un número entero de semilongitudes de onda $\lambda_n / 2$ que ajuste la longitud total de la cuerda, es decir:

$$n \lambda_n / 2 = L$$

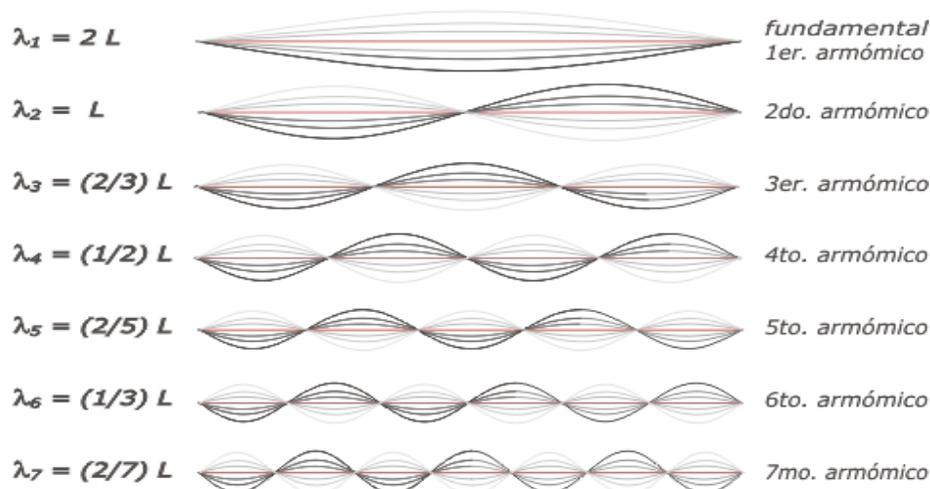
donde se deduce que una onda estacionaria no puede tener una longitud de onda cualquiera, sino que estas longitudes de onda λ_n posibles, y las frecuencias f_n correspondientes, van a quedar delimitadas por la longitud de la cuerda.

Si c es la velocidad de propagación de la onda en la cuerda, tenemos que:

$$\lambda_n = 2L / n$$

$$f_n = c / \lambda_n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

denominadas frecuencias naturales o armónicos, siendo el valor más bajo a $n = 1$, la frecuencia fundamental.



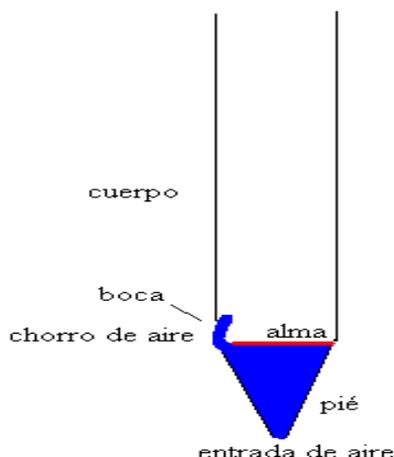
Modos de vibrar del aire confinado en un tubo

Cuando se produce una vibración sonora dentro de un tubo se produce espontáneamente una onda estacionaria. No importa si el tubo está cerrado o abierto. Es el caso típico de los instrumentos de viento (flauta, oboe, clarinete, trompeta, tuba, etc.). La oscilación en el aire se extingue inmediatamente, de modo que para obtener sonidos constantes se precisa de excitadores del aire. Los hay de varios tipos. En el ser humano se trata de las cuerdas vocales; en los instrumentos de viento tenemos boquillas tipo silbato (flautas, órgano), boquillas con lengüetas (oboe, fagot), labios (trompeta), o simplemente la habilidad del soplido del ejecutante como en la flauta travesa.

Los tubos de caña o de otras plantas de tronco hueco, constituyeron los primeros instrumentos musicales. Emitían sonido soplando por un extremo. El aire contenido en el tubo entraba en vibración emitiendo un sonido.



Las versiones modernas de estos instrumentos de viento son las flautas, las trompetas y los clarinetes, todos ellos desarrollados de forma que el intérprete produzca muchas notas dentro de una amplia gama de frecuencias acústicas. Un ejemplo es el tubo de órgano que es excitado por el aire que entra por el extremo inferior. El aire se transforma en un chorro en la hendidura entre el alma (una placa transversal al tubo) y el labio inferior. El chorro de aire interacciona con la columna de aire contenida en el tubo. Las ondas que se propagan a lo largo de la corriente turbulenta mantienen una oscilación uniforme en la columna de aire haciendo que el tubo suene.



Tubo Abierto

Si un tubo es abierto, el aire vibra con su máxima amplitud en los extremos. En la figura, se representan los 4 primeros modos de vibración. La distancia entre dos nodos o entre dos vientres es media longitud de onda. Si la longitud del tubo es L , tenemos que:

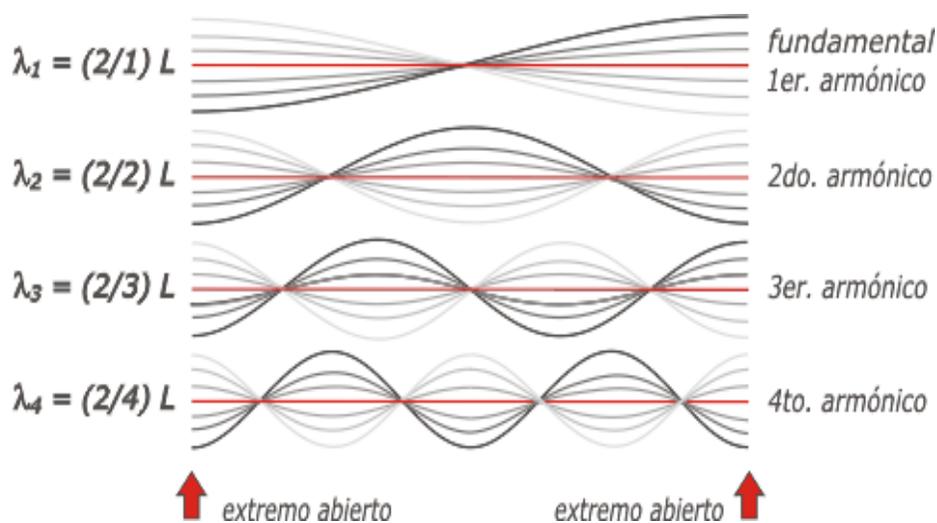


$L = \lambda / 2$, $L = \lambda$, $L = 3\lambda / 2$, ... en general $L = n\lambda / 2$, $n = 1, 2, 3...$ es un número entero como también

$$\lambda_n = 2L / n$$

Considerando que $\lambda = c / f$ (velocidad del sonido dividido la frecuencia), por lo tanto las frecuencias de los distintos modos de vibración responden a la fórmula:

$$f = n c / 2L$$





Tubo Cerrado

Si el tubo es cerrado se origina un vientre en el extremo por donde penetra el aire y un nodo en el extremo cerrado. La distancia entre un vientre y un nodo consecutivo es $\lambda / 4$. La longitud L del tubo es en las figuras representadas es:

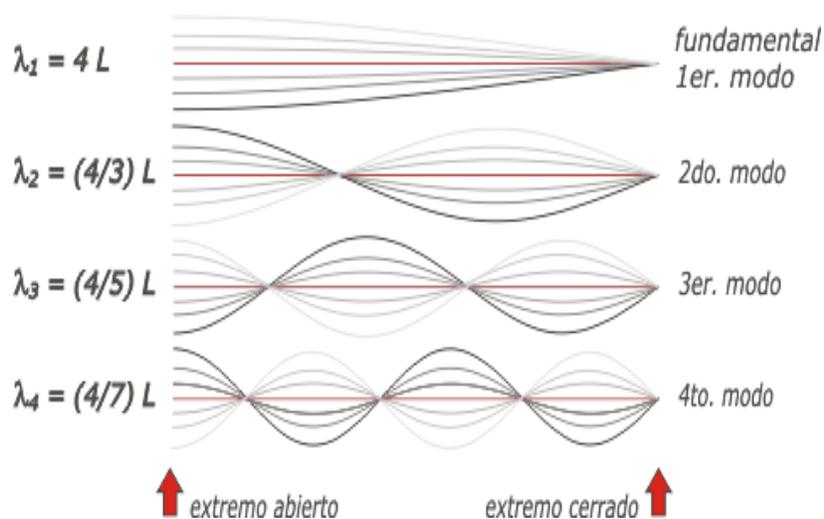
$$L = \lambda / 4, L = 3\lambda / 4, L = 5\lambda / 4 \dots$$

En general $L = (2n-1) \lambda / 4$; con $n=1, 2, 3, \dots$ como también

$$\lambda_n = 4 L / 2n - 1$$

Las frecuencias de los distintos modos de vibración responden a la fórmula:

$$f_n = (2n - 1) c / 4L \quad \text{con } n=1, 2, 3, \dots$$





- En los tubos abiertos la formación de armónicos será de tipo simétrico, aparecerán simultáneamente nodos y vientres en los 2 extremos del tubo, tendremos la serie de armónicos completa.
- En los tubos cerrados, la boca tendrá siempre un vientre y el extremo cerrado un nodo, lo que impondrá que la serie de armónicos sea de tipo asimétrico; el armónico siguiente al fundamental, o segundo armónico, presentara un nodo a un tercio de la boca, en el tercer armónico esta distancia se reducirá a un quinto, etc., por lo tanto sus longitudes de onda serán: $4L$, $4L/3$, $4L/5$,... $4L/(2n - 1)$; es decir, solo se generaran los armónicos impares.
- A igualdad de longitud de tubo, el tubo abierto produce un sonido de frecuencia doble que el cerrado.

Frecuencia Natural (del sistema)

Se llama frecuencia natural al sonido característico de un objeto cuando vibra. La frecuencia natural depende de factores tales como la elasticidad y la forma del objeto. Otra definición que podemos encontrar es que la frecuencia natural es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando, después que se quita la señal de excitación.

Resonancia

Dos objetos diferentes, por lo general emiten sonidos distintos cuando vibran, pero cuando la frecuencia de vibración forzada que se genera en un objeto coincide con la frecuencia del mismo, se produce un aumento notable en el volumen del sonido que emiten. Este fenómeno se denomina resonancia.



La resonancia se define como la tendencia de un sistema físico a oscilar con una amplitud mayor en algunas frecuencias. La amplitud del sistema oscilante depende de la magnitud de la fuerza que se le aplique periódicamente al emisor, y también está relacionada con las frecuencias de ondas del emisor y la frecuencia natural del sistema oscilante. Si la diferencia entre la frecuencia del emisor y la frecuencia del resonador es grande la amplitud del sistema resonador será mínima. Al igual que mientras más diferentes sean las frecuencias entre el generador y el resonador, se requerirá de mayor cantidad de energía para crear determinadas amplitudes de oscilación, y viceversa. En condición de resonancia, una fuerza de magnitud pequeña aplicada por el emisor puede lograr grandes amplitudes de oscilación en el sistema resonador, creando con ello perturbaciones marcadas en el sistema resonador.

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

