

04.5-SONIDO II



Los oídos humanos evolucionaron para detectar ondas sonoras e interpretarlas, como la música o el habla. Algunos animales, como este joven zorro orejas de murciélago, tienen oídos adaptados para detectar sonidos muy débiles.

EFECTO DOPPLER

Si un vehículo se mueven mientras hacen sonar su bocina, la frecuencia del sonido que se oye es más alta cuando el vehículo se acerca y más baja cuando se aleja.

Este fenómeno es un ejemplo del **efecto Doppler**.

Se oye el mismo efecto si el oyente se mueve y la bocina está fija: la frecuencia es más alta cuando nos acercamos a la fuente y más baja cuando nos alejamos.

Aunque el efecto Doppler se asocia más a menudo con el sonido, es común a todas las ondas, incluyendo las de luz.

Por ejemplo, el movimiento relativo de la fuente y el observador produce un corrimiento de frecuencia en las ondas luminosas.

El efecto Doppler se usa por ejemplo en los sistemas de radar policíacos para medir la rapidez de los vehículos o los astrónomos para determinar la rapidez de estrellas, galaxias y otros objetos celestes en relación con la Tierra.

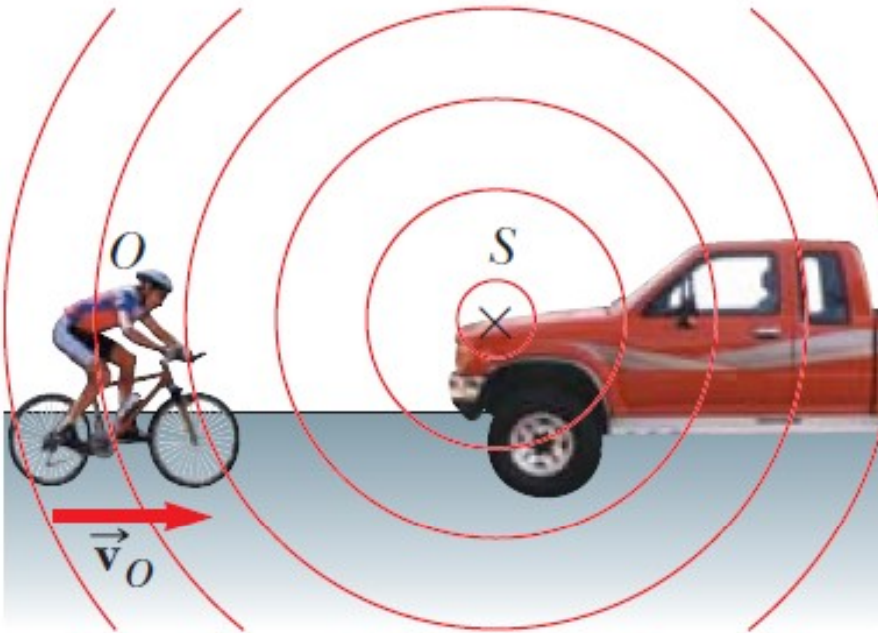
Nos restringiremos al efecto Doppler aplicado al sonido y supondremos que el aire está inmóvil y que todas las medidas de la velocidad están hechas en relación con este medio inmóvil.

La velocidad v_o corresponde al observador, v_s es la velocidad de la fuente y v es la velocidad del sonido.



EFECTO DOPPLER

Observador se mueve hacia la fuente



Un observador O (el ciclista) se mueve con una rapidez v_0 hacia una fuente puntual estable S, la bocina de una camioneta estacionada.

El observador escucha una frecuencia f' mayor que la frecuencia de la fuente.

**La longitud de onda no cambia.
Se percibe una frecuencia mayor.**

Rapidez relativa de las ondas respecto al observador: $v' = v + v_0$

La longitud de onda no cambia, entonces detecta una frecuencia f' :

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f}} = \frac{v + v_0}{v} f$$

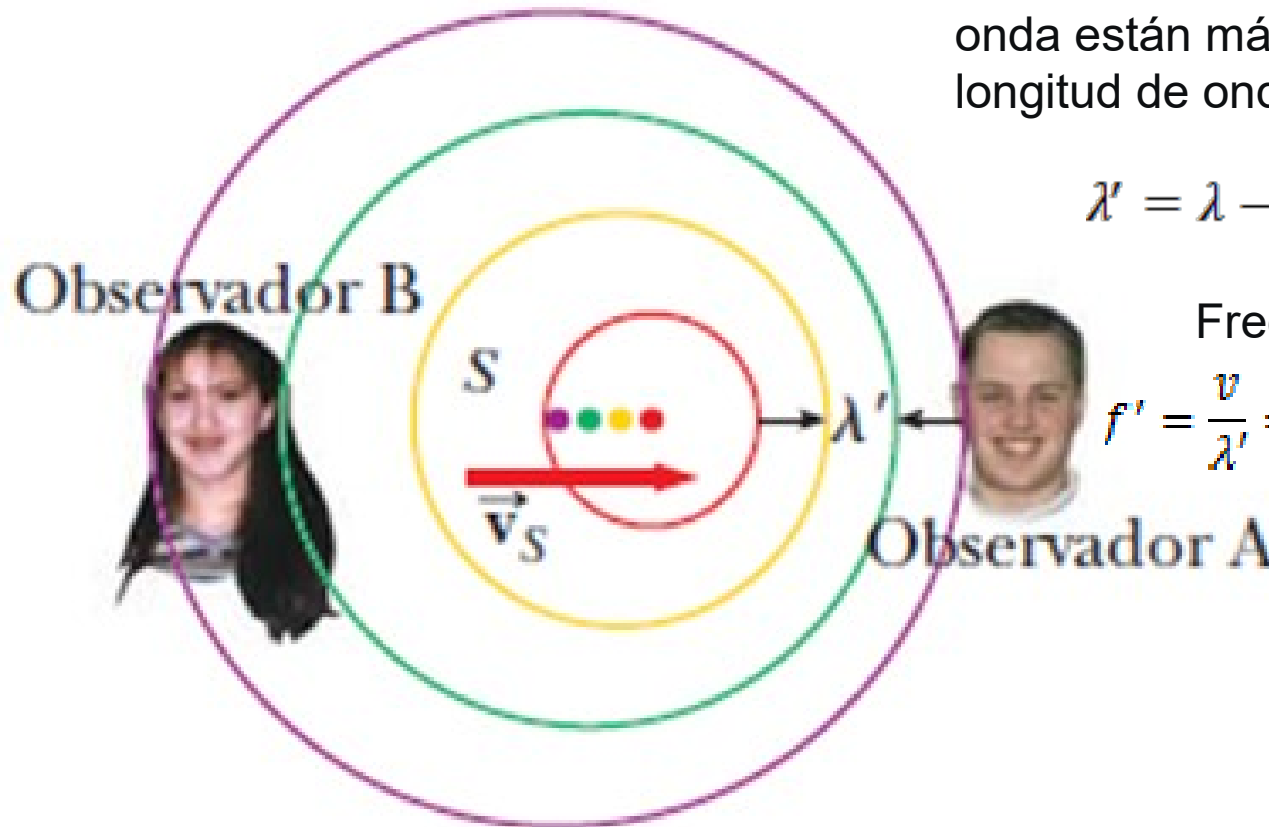
$$f' = \frac{v + v_0}{v} f$$

Si en cambio el observador se aleja de la fuente:

$$f' = \frac{v - v_0}{v} f$$

EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad v_s) y observadores en reposo



Para el observador A los frentes de onda están más juntos y se acorta la longitud de onda en un valor $\Delta\lambda = v_s \cdot T$

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - v_s T = \lambda - \frac{v_s}{f}$$

Frecuencia percibida por A

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{\frac{v}{f} - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{v - v_s} f$$

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f$$

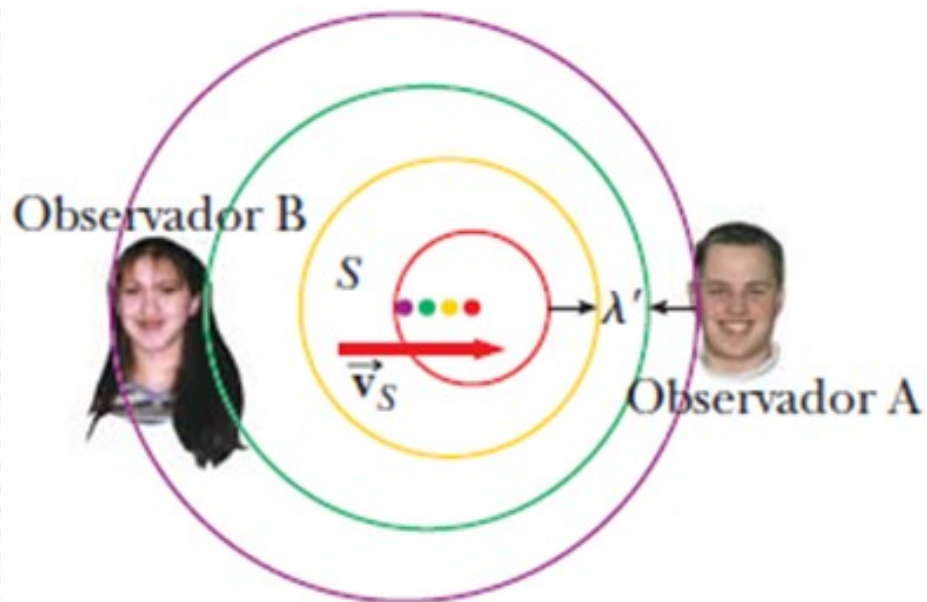
(fuente acercándose)

Si la fuente se aleja del observador estacionario (B) que mide una λ' mayor que λ y escucha una frecuencia:

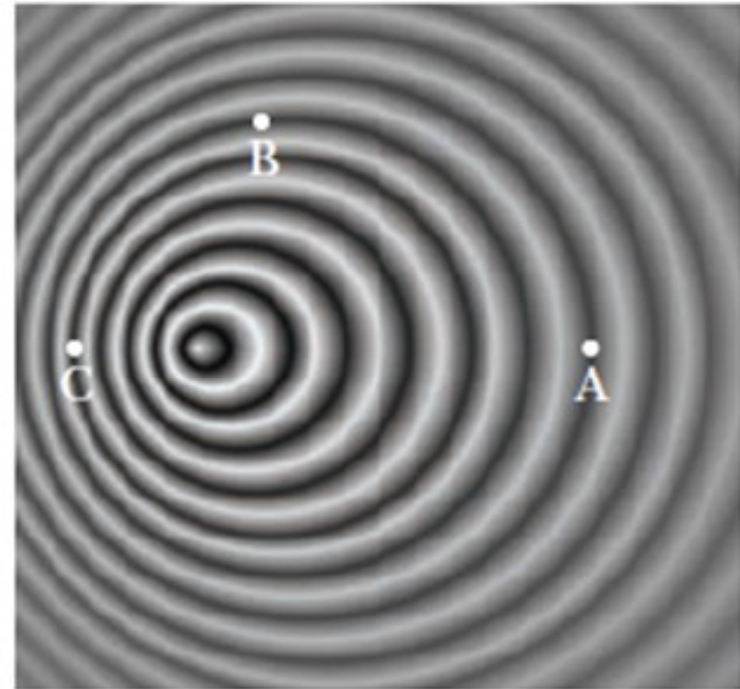
$$f' = \frac{v}{v + v_s} f$$

EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad v_s) y observadores en reposo



a)



b)

a) Una fuente S se mueve con una rapidez v_s hacia un observador estable A y se aleja de un observador estable B . El observador A escucha una frecuencia mayor y el observador B una frecuencia reducida.

b) El efecto Doppler en el agua, observado en un tanque de ondas. Una fuente puntual que se mueve con rapidez v_s .

EFECTO DOPPLER

Se pueden combinar los dos casos, para usar una única ecuación:

$$f' = \frac{v + v_0}{v - v_s} f$$

En esta expresión se deben usar los signos de las velocidades de la siguiente forma:

v_0 es positiva si el observador se acerca a la fuente, si se aleja es negativa

v_s es positiva si la fuente se acerca al observador, si se aleja es negativa

El valor positivo se usa para el movimiento del observador o de la fuente hacia el otro acercándose, asociada con el aumento de la frecuencia percibida.

El valor negativo se usa para el movimiento de uno alejándose del otro, asociada con una disminución de la frecuencia percibida.

FUENTES DE ONDAS SONORAS

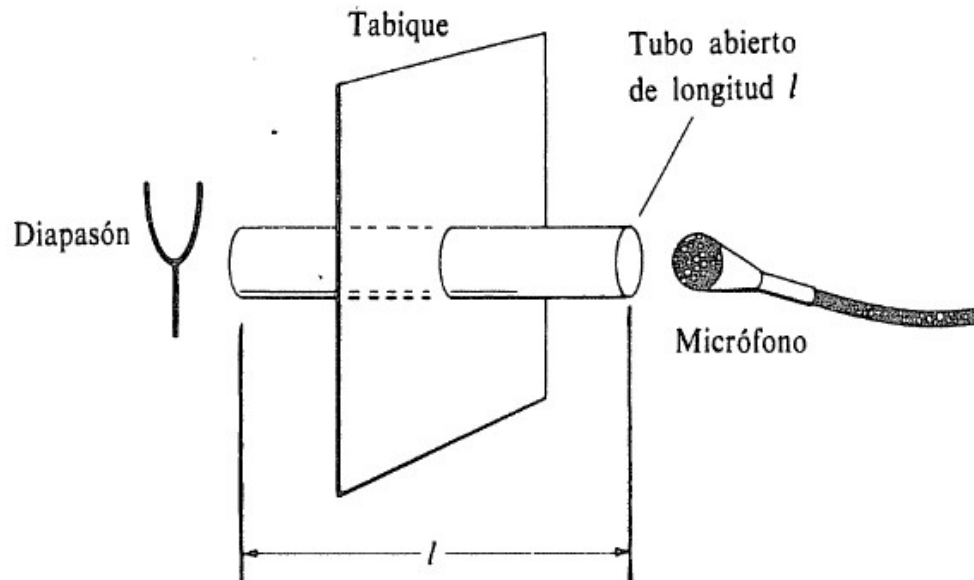
En general toda **fente sonora** tiene **dos componentes** principales: un **generador de vibraciones** y una **estructura resonante**.

Violín: las cuerdas vibran y sus vibraciones son emitidas eficazmente al aire mediante la cavidad resonante del instrumento

Seres humanos, las cavidades bucal y nasal sirven como estructuras resonantes para las vibraciones producidas por las cuerdas vocales.

Modelo del sistema: tubo cilíndrico longitud L con ambos extremos abiertos (puede mantener ondas resonantes con una frecuencia dada por:

$$f_n = n \frac{v}{2L}$$



Se usan diapasones de frecuencias diferentes pero próximas entre sí, y se analiza con un micrófono el sonido en el extremo opuesto del tubo.

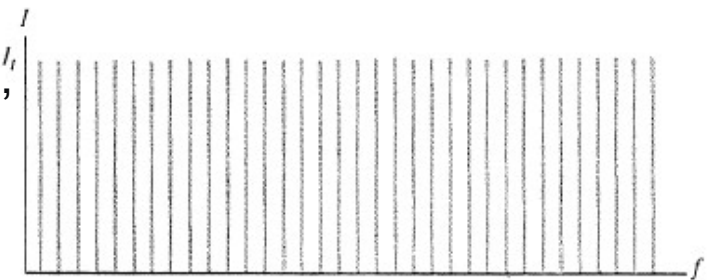
El tubo sirve como estructura resonante que transmite el sonido de forma selectiva en las proximidades de ciertas frecuencias resonantes y suprime las otras frecuencias.

FUENTES DE ONDAS SONORAS

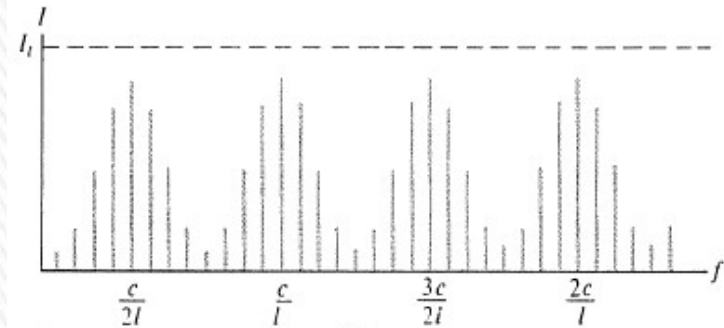
Si una de las frecuencias del diapasón coincide con alguna de las frecuencias resonantes del tubo, se producen en éste ondas estacionarias y el sonido se transmite al micrófono en forma eficaz. Sonidos de otros diapasones no producen ondas estacionarias y llega mucho menos sonido al micrófono.

El diapasón produce sonido a una sola frecuencia, el sonido llegará al micrófono a través del tubo.

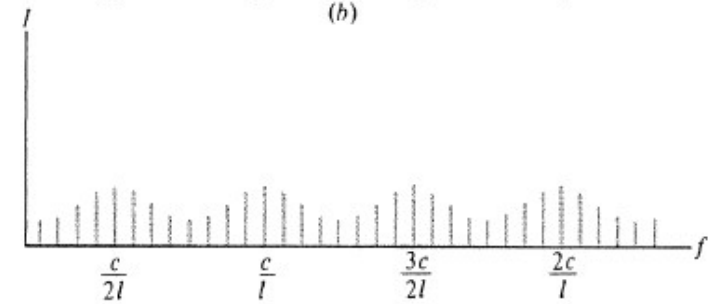
- Sonidos (intensidad I) producidos por una serie de diapasones a la entrada del tubo.
- Intensidad que llega al micrófono, es máxima a las frecuencias resonantes del tubo.
- Si el tubo fuera más estrecho, los picos serían menos agudos alrededor de las frecuencias resonantes.



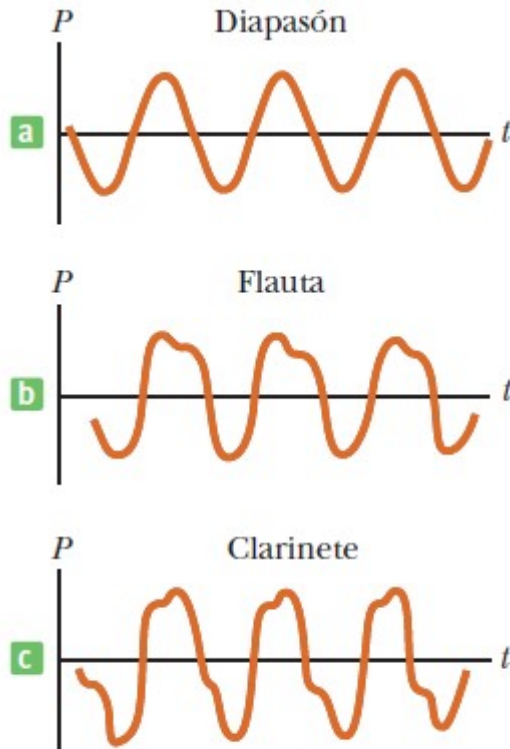
(a)



(b)

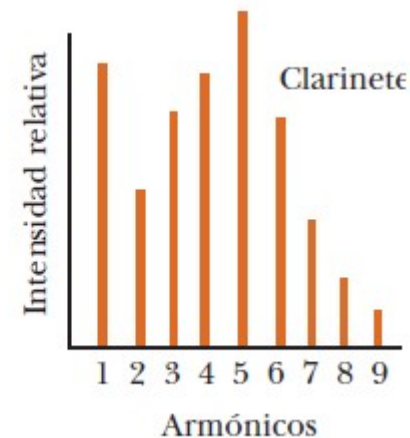
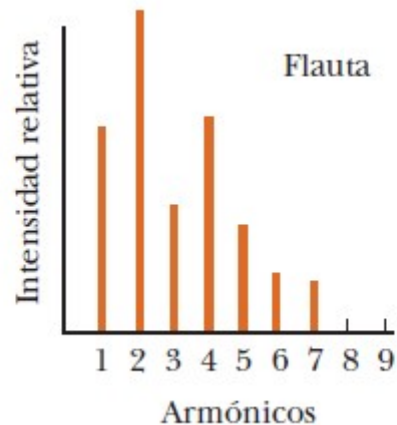
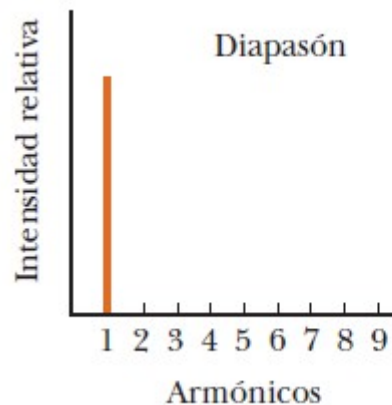


FUENTES DE ONDAS SONORAS



Formas de onda (variación de la presión en función del tiempo) ejecutando la misma nota por un diapasón, una flauta y un clarinete. Cada uno a una frecuencia fundamental de 440 Hz y con aproximadamente la misma intensidad

Intensidades relativas de los armónicos en las formas de onda que se muestran en la figura de arriba para el diapasón, la flauta y el clarinete.



FUENTES DE ONDAS SONORAS

Aunque cada instrumento tiene su propio patrón característico, la figura muestra que cada una de las formas de la onda es periódica.

El **diapasón** produce solamente un armónico (la frecuencia fundamental), pero los dos instrumentos (flauta y clarinete) emiten mezclas de armónicos.

En la figura inferior se muestran gráficas de las formas de onda de la figura superior. Cuando una nota se toca con la **flauta**, parte del sonido consiste en una vibración en la frecuencia fundamental, una intensidad aun más alta es aportada por el segundo armónico; el cuarto armónico produce una intensidad casi igual que el fundamental y así sucesivamente.

Estos sonidos se suman juntos según el principio de la superposición para dar la forma compleja de la onda mostrada.

El **clarinete** emite una cierta intensidad a una frecuencia del primer armónico, cerca de la mitad de la intensidad con la frecuencia del segundo armónico y así sucesivamente.

La superposición resultante de estas frecuencias produce el patrón que se ve en la Figura c.

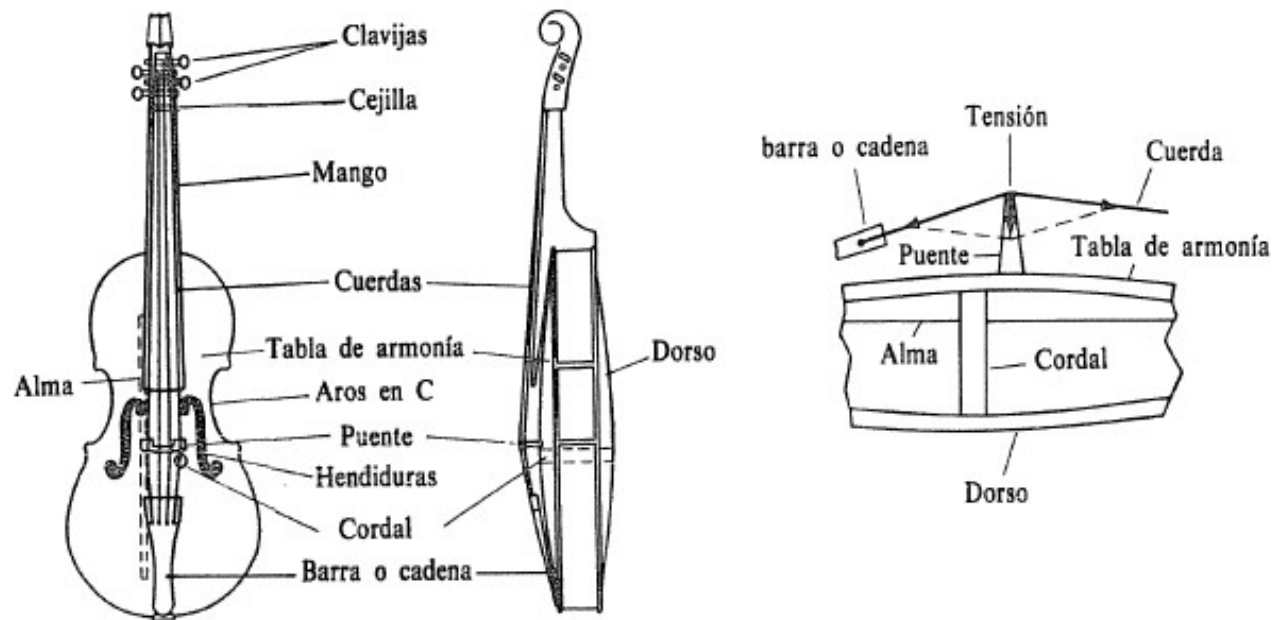
En música, el sonido característico de cualquier instrumento se conoce como **calidad, o timbre, del sonido**.

La calidad depende de la mezcla de armónicos en el sonido.

Decimos que la nota Do de una flauta difiere en calidad de la misma nota Do de un clarinete.

Instrumentos como el clarín, la trompeta, el violín y la tuba son ricos en armónicos

EL VIOLÍN



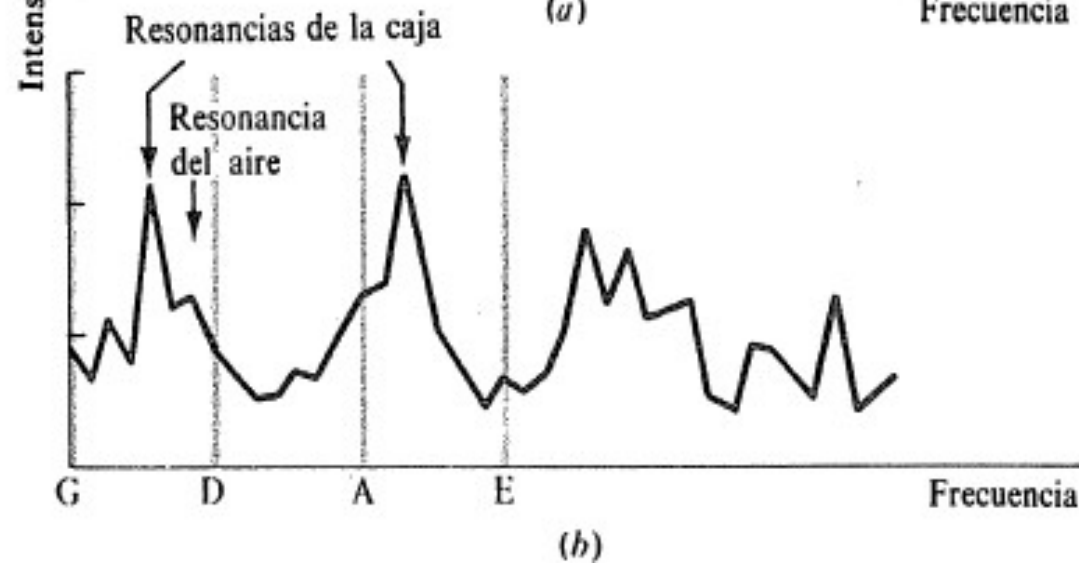
Caja del violín es una estructura resonante compleja. Las cuerdas pueden vibrar con muchas frecuencias (entre 196 y 3136 Hz), pero la caja resuena y amplifica sólo determinadas frecuencias.

La caja del violín de forma que su volumen varía y fuerza al aire a entrar y salir a través de las ranuras en forma de f lo que provoca una resonancia de la caja.

Así como una cuerda puede vibrar a distintas frecuencias, también las tablas del violín pueden vibrar a más de una frecuencia y por tanto existen diversas resonancias de la caja. Las frecuencias de resonancia del aire y de la caja deben coincidir o estar próximas a las frecuencias fundamentales de las cuerdas. Si no se consigue esto, algunas notas se distorsionan.

EL VIOLÍN

a) Gráfica intensidad-frecuencia de un buen violín. Las rectas verticales representan las frecuencias características de las cuatro cuerdas del violín. Observar que las resonancias tienen lugar a casi las mismas frecuencias que las características de las cuerdas.
b) Espectro que presenta un violín de poca calidad.



Frecuencias cuerdas:

G_3 (196 Hz), (Sol)
 D_4 (293.7 Hz), (Re)
 A_4 (440 Hz) (La)
 E_5 (659.3 Hz). (Mi)



FACTORES SUBJETIVOS DEL SONIDO

A menudo se utilizan para describir los sonidos propiedades tales como: **sonoridad, tono y calidad**. Estos conceptos son subjetivos. Por ejemplo, un sonido a 20 dB a 1000 Hz parece más ruidoso que un sonido de 20 dB a 600 Hz.

Sonoridad medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano. Permite ordenar sonidos en una escala del de mayor intensidad al de menor intensidad percibida.

La unidad que mide la sonoridad es el **fonio**.

La sensación sonora de intensidad (sonoridad) se agudiza para sonidos débiles, y disminuye para sonidos fuertes, lo que se debe a que **la audición humana no es lineal, sino logarítmica**.

La sonoridad depende tanto de la intensidad como de la frecuencia.

Escala de decibeles A (dBA): unidad de nivel sonoro medido con un filtro previo que quita parte de las bajas y las muy altas frecuencias.

Después de la medición se filtra el sonido para conservar solamente las frecuencias más dañinas para el oído, razón por la cual la exposición medida en dBA es un buen indicador del riesgo auditivo y vital.

FACTORES SUBJETIVOS DEL SONIDO

Tono de un sonido está relacionado con su frecuencia.

Es la sensación auditiva (atributo psicológico) de los sonidos que los caracteriza como más agudos o más graves, en función de la frecuencia.

Por encima de los 3.000 Hz, el tono aumenta con la intensidad aunque la frecuencia se mantenga constante.

Por debajo de 2.000 Hz, el tono disminuye al aumentar la intensidad.

Un **tono puro** corresponde a una onda senoidal: $f(t) = A \sin(2\pi ft)$, donde A es la amplitud, t es el tiempo y f la frecuencia.

En el mundo real no existen tonos puros, pero cualquier onda periódica se puede expresar como suma de tonos puros de distintas frecuencias (análisis de Fourier).

Existiría una **frecuencia fundamental** y varias frecuencias múltiplos de la fundamental, llamados **armónicos**.

Las frecuencias de estos armónicos son un múltiplo entero de la principal.

Calidad o timbre de un sonido es todavía más ambigua.

La respuesta perceptiva humana asociada con diferentes mezclas de armónicos es la *calidad o timbre del sonido*

Algunos tipos de sonidos constituidos por armónicos son agradables.

No podemos caracterizar la calidad con una definición precisa con parámetros que se puedan medir físicamente

FACTORES SUBJETIVOS DEL SONIDO

Dos tonos producidos por diferentes instrumentos podrían tener la misma frecuencia fundamental (y por lo tanto el mismo tono), pero sonar distinto debido al contenido de diversos armónicos.

Esta diferencia se llama *color de tono*, *calidad* o **timbre**, y a menudo se describe con términos subjetivos como “delgado”, “dorado”, “redondo”, “suave” y “débil”.

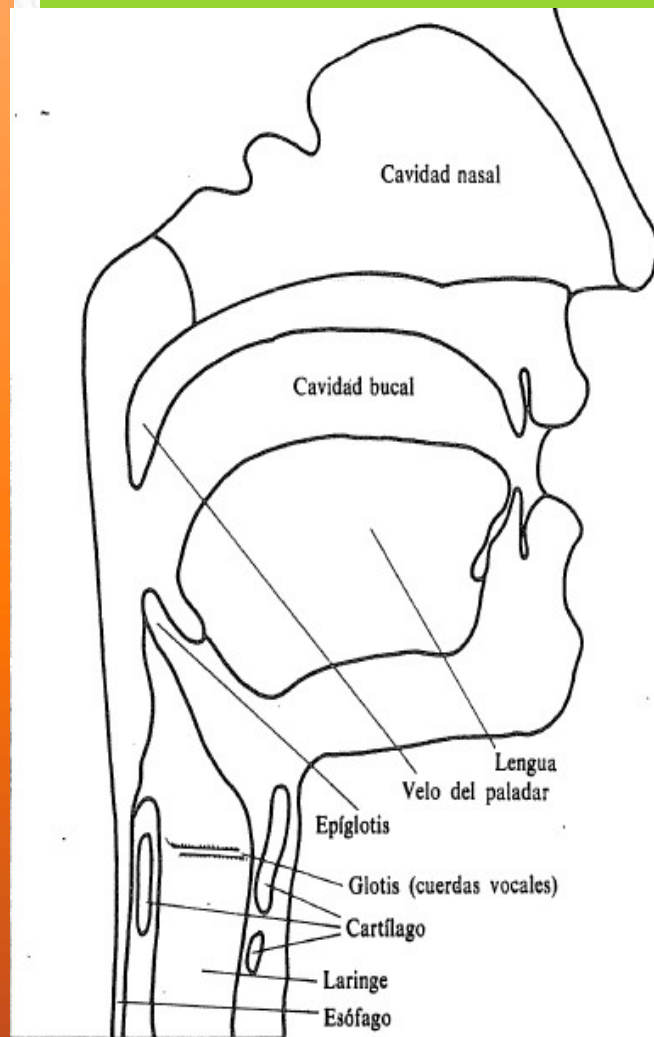
A diferencia de los tonos creados por instrumentos musicales o las vocales del habla humana, el **ruido** es una combinación de *todas las frecuencias, no solo* las que son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental.

Un caso extremo es el “**ruido blanco**”, que contiene cantidades iguales de todas las frecuencias de la gama audible.

Como ejemplos está el sonido del viento.



LA VOZ HUMANA



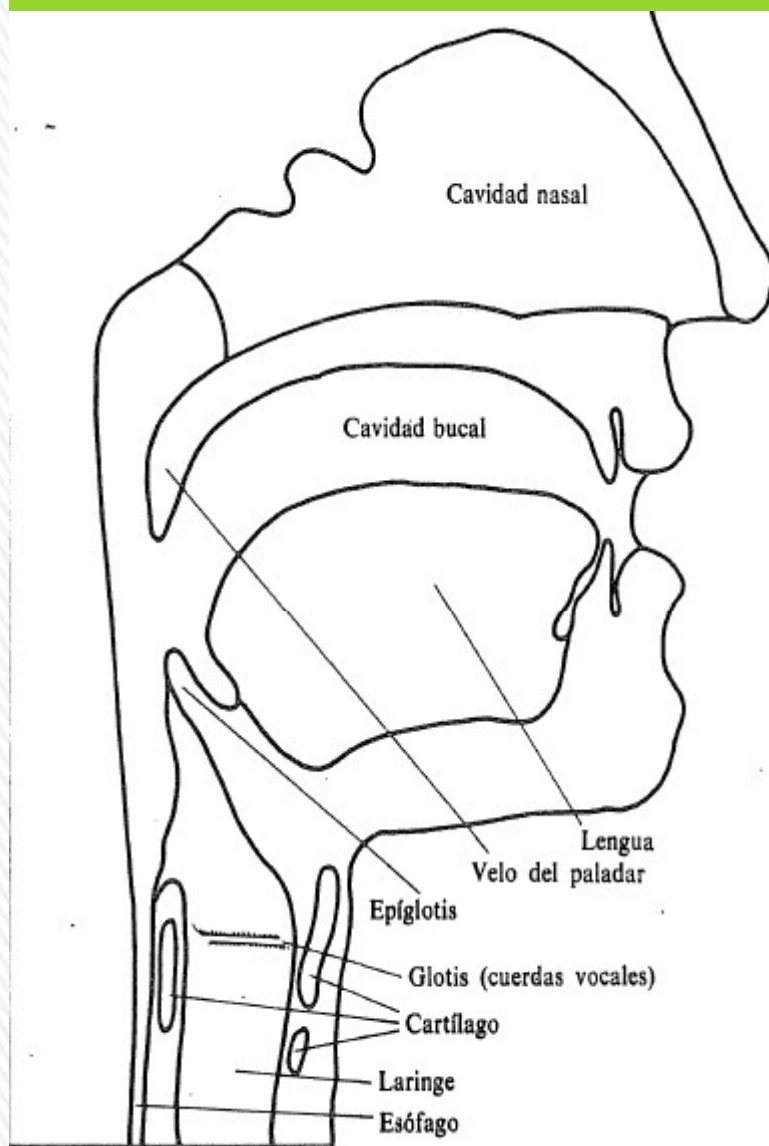
En el habla humana, las cuerdas vocales (en realidad deberían llamarse pliegues vocales, ya que no son cuerdas) producen las vibraciones del aire, la garganta y las cavidades bucal y nasal actúan como estructuras resonantes.

La variedad de sonidos producidos por los seres humanos se debe a que las cuerdas vocales pueden generar diversas frecuencias y las estructuras resonantes (en particular la cavidad bucal) puede cambiar su forma y dimensiones para modificar las resonancias y de este modo los sonidos amplificadas. Normalmente, las cuerdas vocales están relajadas y no presentan ninguna obstrucción al paso del aire a través de la laringe.

Al prepararse para hablar, la tensión de las cuerdas vocales aumenta y la laringe se cierra.

La presión del aire por debajo de las cuerdas vocales aumenta hasta que obliga a abrir las cuerdas y el aire se precipita a través de las aberturas haciendo vibrar las cuerdas vocales.

LA VOZ HUMANA



Estas vibraciones se pueden explicar usando la ecuación de Bernoulli. Cuando el aire sale a través de la abertura, su velocidad es grande y por tanto la presión disminuye, dejando que las cuerdas vocales se aproximen entre sí.

Una vez que la abertura es suficientemente pequeña, la presión por debajo de las cuerdas vocales aumenta de nuevo y hace que éstas se vuelvan a separar.

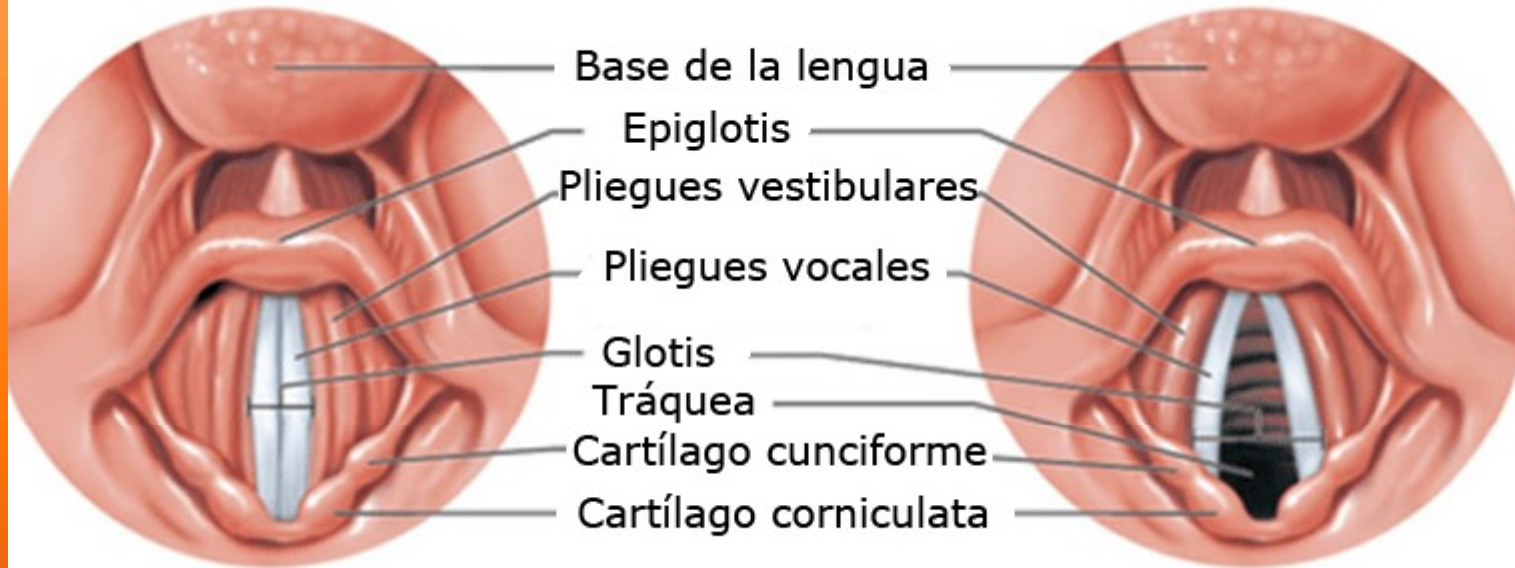
El proceso continúa mientras dura la exhalación, excitándose la frecuencia fundamental y otros armónicos de las cuerdas.

El espectro de salida producido por las cuerdas vocales es bastante uniforme hasta 3.000 Hz, que es el intervalo de frecuencias usado en el habla.

Si no se modificase, sería solamente ruido, pero la modificación tiene lugar en las estructuras resonantes.

LA VOZ HUMANA

Las cuerdas vocales



Fonación
(cerradas)

Respiración
(abiertas)



124 Hz



174 Hz



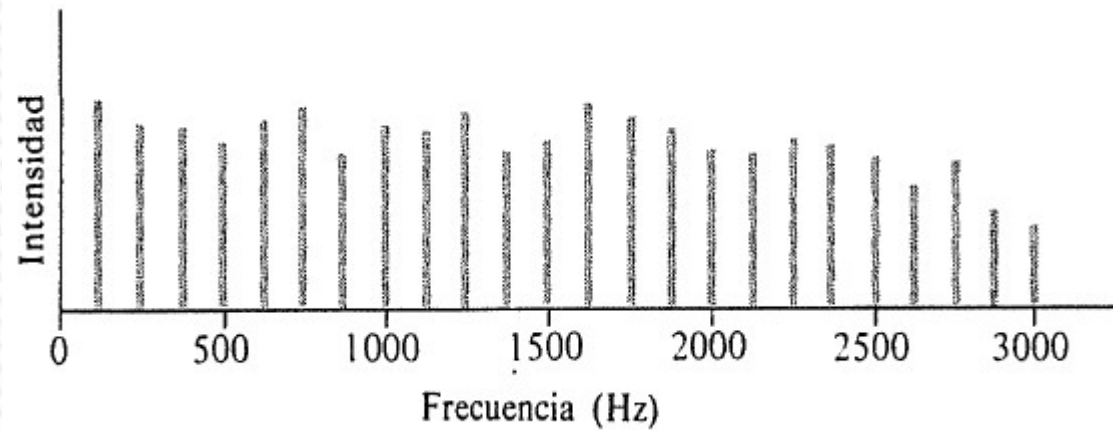
248 Hz



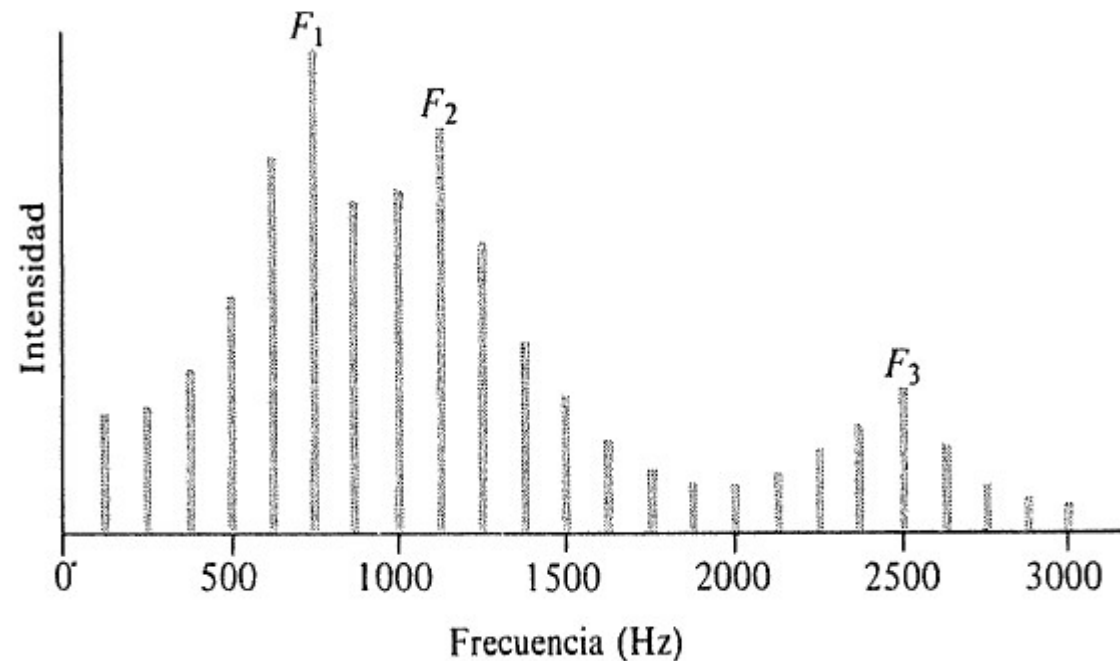
330 Hz

Al cantar las cuerdas vocales presentan varias frecuencias fundamentales. Las frecuencias más elevadas ocurren cuando aumenta la tensión.

LA VOZ HUMANA

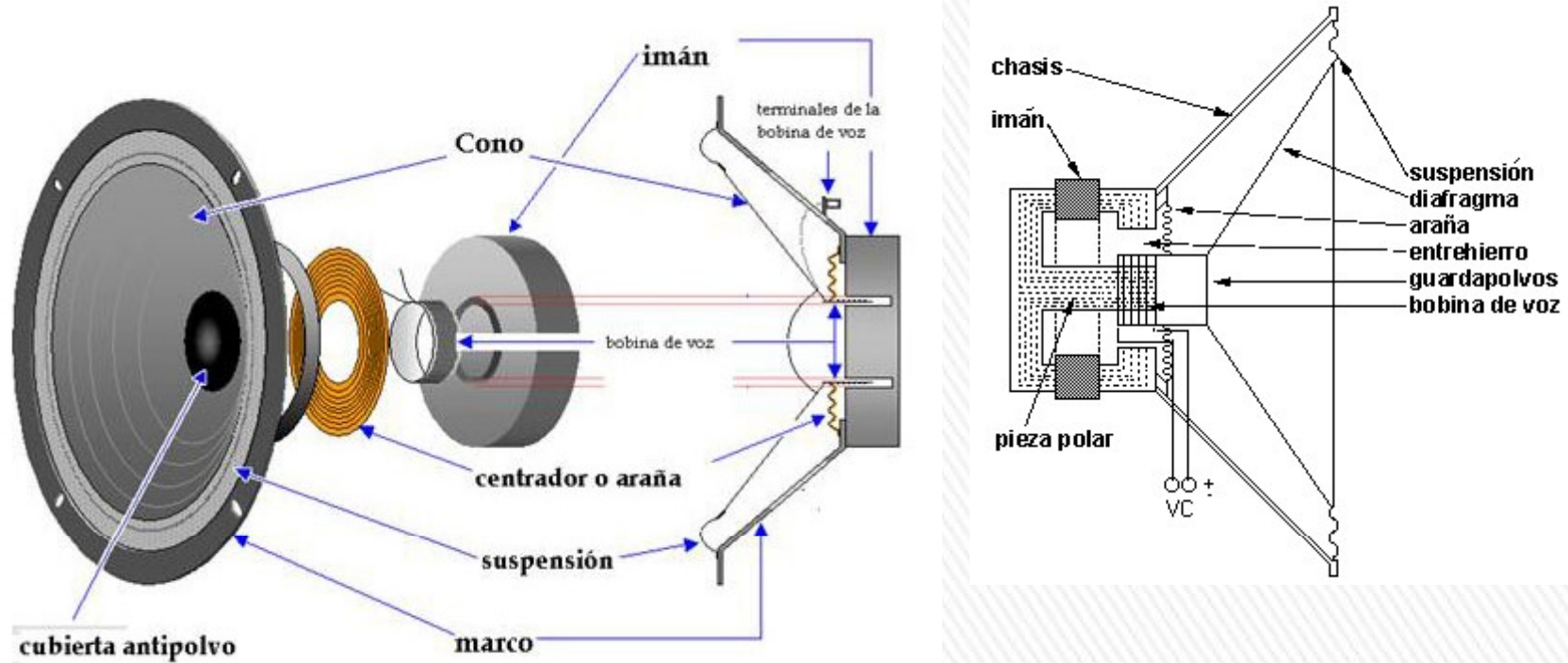


Ejemplo de la frecuencia fundamental y los armónicos producidos por las cuerdas vocales al hablar. El espectro varía con la tensión en las cuerdas.



Espectro intensidad – frecuencia del sonido “a” en “fado”. Las formantes son amplias resonancias señaladas con F_1 , F_2 y F_3 . Las líneas verticales muestran cómo las frecuencias de las cuerdas vocales de la figura anterior son transmitidas selectivamente por la estructura de resonancia.

EL ALTAVOZ



El sonido que ha sido modificado por aparatos electrónicos se vuelve a convertir en sonido mediante un altavoz (parlante).

El más común usa un imán permanente rodeado por una bobina por la que pasa corriente.

La bobina conduce una corriente que varía con el tiempo desde el amplificador que produce un campo magnético variable en el interior de la bobina.

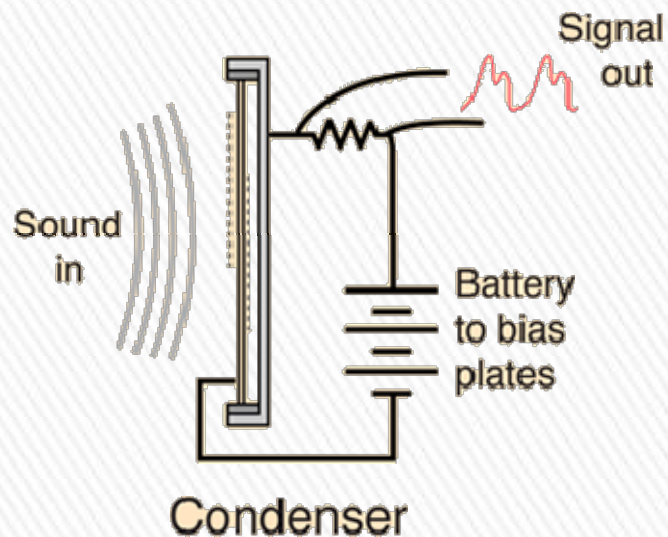
Esto produce una fuerza variable sobre el imán permanente.

Cuando éste se mueve se desplaza también el cono (diafragma) y su movimiento produce ondas sonoras en el aire.

DETECTORES DE SONIDO

La detección del sonido requiere la conversión de las vibraciones mecánicas de las ondas sonoras en una forma que permita el análisis de su frecuencia e intensidad.

Ejemplos son el micrófono electrostático y el oído humano.



El micrófono electrostático contiene una membrana flexible que contiene una capa eléctricamente conductora.

Esta membrana se encuentra en las proximidades de un segundo conductor rígido, de forma que ambas forman un condensador cuya capacidad varía a medida que la membrana vibra en respuesta a una onda sonora.

En un circuito, esta variación de la capacidad causa una variación temporal de la corriente que puede actuar sobre un altavoz o grabar la información en una cinta magnética o similar.



ULTRASONIDOS

Ondas mecánicas cuya frecuencia está por encima de la capacidad de audición del oído humano (aprox. 20.000 Hz).

En la actualidad pueden producirse ultrasonidos superiores a 10^9 Hz, siendo su empleo en medicina para diagnóstico, terapéutica y como instrumento quirúrgico.

Algunas especies como ciertos insectos y mamíferos (los delfines y los murciélagos) lo utilizan de forma parecida a un radar para su orientación; a este fenómeno se lo conoce como ecolocalización.

Los delfines emiten frecuencias de hasta 130 kHz.

Se sabe que las ondas emitidas por estos animales son tan altas que “rebotan” fácilmente en todos los objetos alrededor de ellos, permitiéndoles crear una “imagen” de lo que está a su alrededor para poder orientarse fácilmente

La **imagen ultrasónica** es una técnica médica que usa ondas sonoras de muy alta frecuencia y longitud de onda muy corta, conocidas como *ultrasonido*, realizan un barrido del cuerpo humano, y luego los “ecos” de los órganos internos se utilizan para crear una imagen.

Con ultrasonido de frecuencia de 5 MHz, la longitud de onda en agua (principal constituyente del cuerpo) es de 0,3 mm, y características tan pequeñas como esto pueden distinguirse en la imagen.

El ultrasonido es más sensible que los rayos X para distinguir los diversos tipos de tejidos y no presenta los riesgos de radiación de esos rayos.

ULTRASONIDOS



Esta imagen tridimensional de un feto en la matriz se obtuvo mediante una sucesión de exploraciones con ultrasonido. Cada exploración revela una “rebanada” bidimensional del feto; después, se combinaron digitalmente muchas de esas imágenes. El ultrasonido también se usa para estudiar la operación de las válvulas cardíacas y detectar tumores.

ULTRASONIDOS

Generalmente los ultrasonidos se envían como pulsos que son parcialmente reflejados. Entre pulsos, el transmisor actúa como un receptor que detecta el eco u onda reflejada. Para una localización precisa se necesitan haces estrechos y de longitud de onda suficientemente pequeña.

Ocurre que para altas frecuencias (λ pequeña) la absorción aumenta. Para una frecuencia de 1 MHz la intensidad disminuye un 50% en 7 cm de tejido animal blando.

El límite de intensidad viene determinado principalmente por los efectos destructivos de ultrasonidos intensos sobre tejidos animales.

Son útiles porque se reflejan en los límites entre materiales casi de la misma densidad y no tienen los efectos perjudiciales como el uso de Rayos X (ecografía de embarazo).

Fracción de intensidad sonora reflejada en un límite donde se pasa de un medio 1 con densidad ρ_1 donde la velocidad del sonido es v_1 , a un medio 2 con densidad ρ_2 y velocidad v_2 :

$$\frac{I_R}{I_I} = \left(\frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \right)^2$$

Es esta pequeña diferencia en los límites lo que hace detectable los contrastes.

ULTRASONIDOS

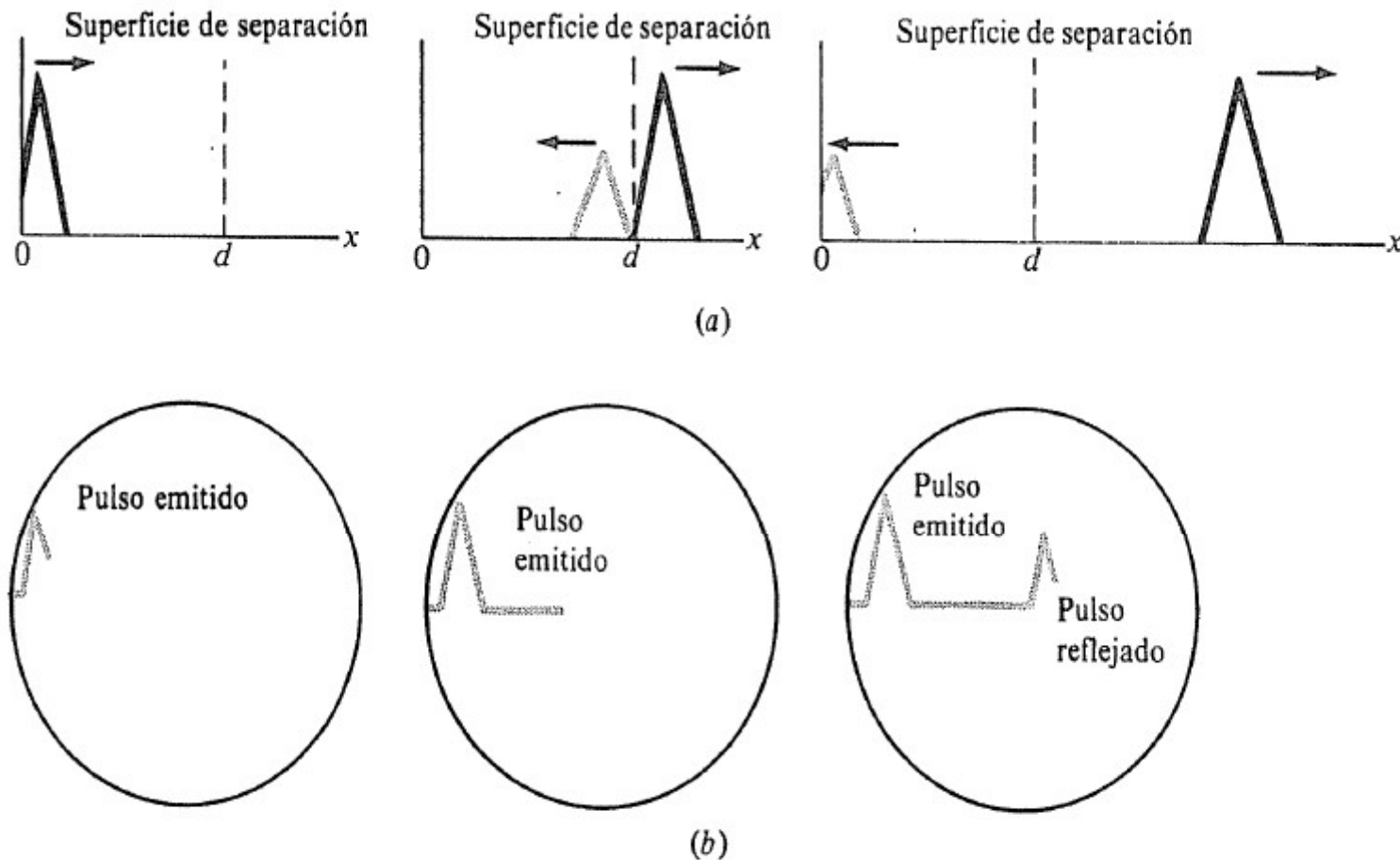


Figura 24.20. (a) Emisión de un pulso que recorre una distancia d hasta la superficie de separación de un tejido. Parte del pulso (en color) se refleja en la interfase y vuelve al transductor. (b) La señal del osciloscopio recoge el pulso emitido y el pulso reflejado un tiempo $t = 2d/c$ más tarde. Como estos sucesos son tan rápidos, el ojo sólo ve la señal completa.