

# ONDAS SONORAS



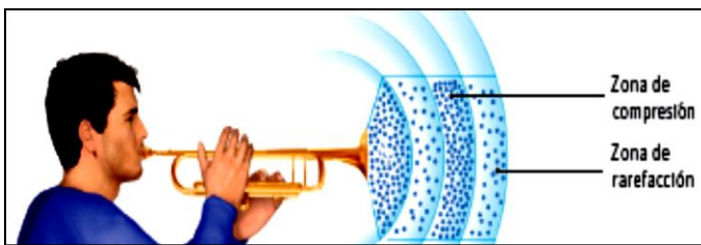
Cuando un cuerpo sólido, líquido o gaseoso vibra, nos percatamos del fenómeno fundamentalmente por la vista o el oído. Es lo que ocurre al golpear una mesa, al agitar el agua, al hacer pasar el aire con fuerza a través de una rendija o al soplar contra una membrana.

Los fenómenos debidos a las vibraciones mecánicas de un medio cualquiera, y cuya percepción logramos mediante el oído, se llaman **fenómenos sonoros**.

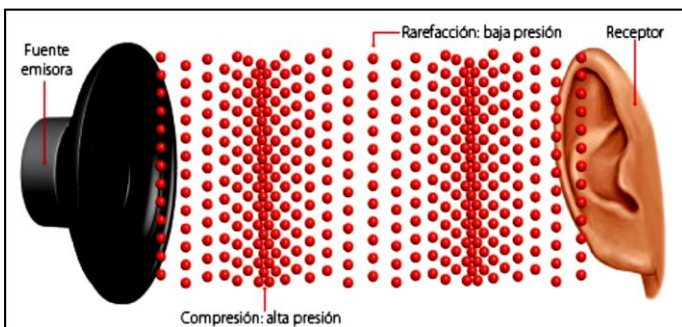
El término **sonido** se emplea corrientemente en dos sentidos:

subjetivamente, es la sensación que el oído transmite al cerebro al ser impresionado por determinadas vibraciones mecánicas y, objetivamente, es el movimiento vibratorio u oscilatorio, causa de dicha sensación.

- Cuando una fuente sonora produce un sonido, las partículas de aire más cercanas a dicha fuente vibran y hacen vibrar las partículas de aire contiguas, lo que origina una onda longitudinal.



- En el aire por el que se propaga el sonido se generan sectores de mayor concentración de partículas, denominados zonas de compresión, y sectores de menor concentración de partículas, llamados zonas de rarefacción.



- La onda sonora se propaga longitudinalmente hasta llegar al receptor de la onda.

En el lenguaje diario se usan diversos términos para caracterizar sensaciones **rechinar, zumbar**, etc., a las cuales se les llama más bien ruidos por la irregularidad de las vibraciones y de su amortiguamiento. Ahora bien, para que el fenómeno sonoro exista realmente, es necesario que concurren las siguientes condiciones:

condiciones:

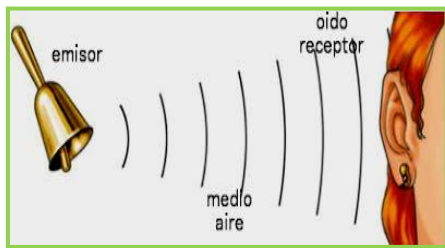
a) **La existencia de una fuente sonora**, es decir, de un cuerpo cuyas moléculas puedan vibrar bajo la acción de un estímulo externo;

b) **La existencia de un medio transmisor**, o sea, de un sistema de moléculas suficientemente elástico y ponderable como para que a través de él se propaguen las ondas producidas por la fuente sonora, y

c)



d) **La existencia de un sujeto receptor** (el hombre o algún animal) capacitado para captar las ondas producidas y transformarlas en sensación sonora.



**El oído** es el órgano de que dispone el sujeto receptor para la percepción de las ondas y su transmisión al cerebro en forma de sensaciones sonoras.

En consecuencia, todo fenómeno sonoro desaparecerá o pasará inadvertido si faltare alguna de estas condiciones. Así, por ejemplo, si no existe un medio de propagación de la onda sonora, el sonido no existe, esto es, **la onda sonora no se propaga en el vacío**. Para comprobar esto

basta colocar una campanilla eléctrica o un reloj despertador dentro de la campana de una bomba de vacío: el sonido va desapareciendo gradualmente a medida que aumenta el enrarecimiento producido por la bomba.

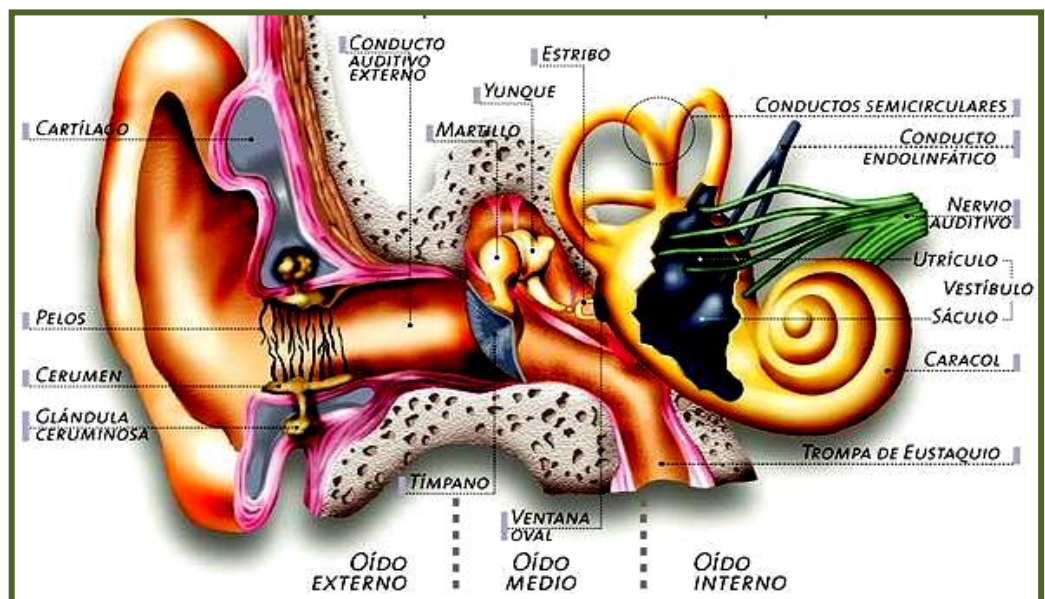
**Las ondas sonoras no se propagan en el vacío**

Por otra parte, siendo la onda sonora una onda longitudinal, a ella corresponden todas las características de ésta. De este modo, **para calcular la velocidad de propagación de la onda sonora, pueden aplicarse las fórmulas  $v = d/t$  y  $v = \lambda * f$**  Según la primera, la velocidad es el cociente entre el camino recorrido por la onda y el tiempo empleado en recorrerlo y, de acuerdo con la segunda fórmula, es el producto entre la frecuencia y la longitud de onda.



**MECANISMO MEDIANTE EL CUAL EL SER HUMANO PUEDE OÍR**

Las ondas sonoras penetran en el oído por el canal auditivo, que mide unos 25 mm, y al llegar a su extremo chocan con el tímpano, que es una membrana delgadísima (de aproximadamente 0,0001 m), sujeta muy tensamente por los huesos del cráneo. Es como el parche de un tambor, y a ello debe su nombre. Al llegar la onda sonora, el tímpano vibra, y esta vibración se propaga hacia adentro, mediante los huesecillos del oído, el primero de los cuales está apoyado en el tímpano y el último en la ventana oval, por donde la vibración pasa al laberinto.



No se sabe con certeza cómo es que oímos, pero en el laberinto hay una multitud de nerviecitos, que parecerían funcionar como las cuerdas de un piano: cada uno de ellos es sensible a un cierto sonido, y cuando es excitado, envía la sensación al cerebro, el que elaborando todas las sensaciones recibidas nos las hace percibir como sonidos.

## VELOCIDAD DEL SONIDO

**La velocidad de propagación de la onda sonora depende de la naturaleza del medio de propagación y de su temperatura,** siendo independiente de la frecuencia y de la amplitud de la onda, por lo cual resulta que en un medio homogéneo y a temperatura constante esta velocidad es también constante.

### 1.- Naturaleza del medio de propagación

A medida que aumenta la cohesión molecular del medio, aumenta también la velocidad de propagación de la onda sonora, de manera que, por regla general, resulta mayor en los sólidos que en los líquidos y en éstos, mayor que en los gases.



### 2.- Temperatura del medio de propagación

La velocidad del sonido varía ante los cambios de temperatura del medio. Esto se debe a que un aumento de la temperatura se traduce en que aumenta la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración y este aumento de actividad hace que aumente la velocidad.

Por ejemplo sobre una superficie nevada, el sonido es capaz de desplazarse atravesando grandes distancias. Esto es posible gracias a las refracciones producidas bajo la nieve, que no es medio uniforme. Cada capa de nieve tiene una temperatura diferente. Las más profundas, donde no llega el sol, están más frías que las superficiales. En estas capas más frías próximas al suelo, el sonido se propaga con menor velocidad.

La velocidad del sonido en el aire depende también de su temperatura, por ejemplo, cuanto mayor es la temperatura del aire mayor es la velocidad de propagación. La velocidad del sonido en el aire aumenta 0,6 m/s por cada 1° C de aumento en la temperatura.

Una velocidad aproximada (en metros/segundo) puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

Medio	Temperatura en °C	Velocidad en m/s.
aire	0	331
aire	15	340
hidrógeno	0	1270
agua	15	1450
agua	8	1435
cobre	20	3560
hierro y acero	20	4900 a 5100
aluminio	20	5100

$$v_{\text{Sonido-aire}} = 0,6 \cdot t + 331$$

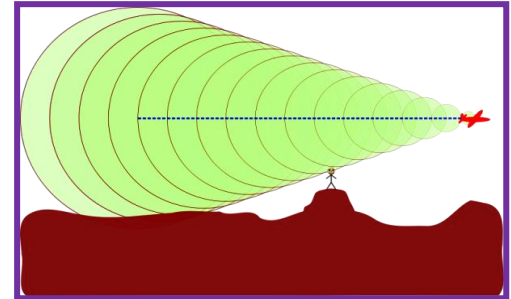
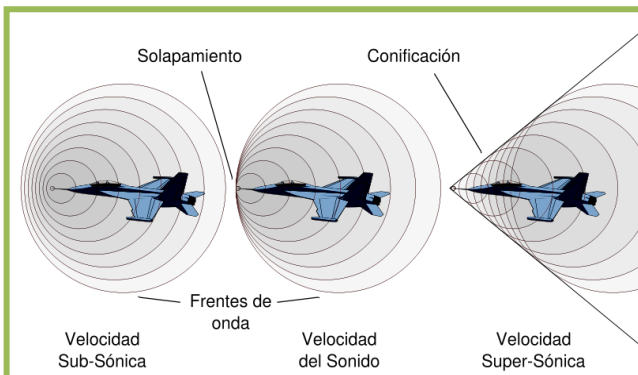
Donde: **V = velocidad del sonido en el aire**  
**t = Temperatura del aire en ° Celsius**

## BARRERA DEL SONIDO

La velocidad del sonido influye en el vuelo de aviones, proyectiles y cohetes. Las perturbaciones producidas en el aire, a causa del movimiento de estos cuerpos, se alejan de ellos con una velocidad equivalente a la del sonido.

Si el cuerpo va a una velocidad menor que la del sonido y en aire tranquilo, no dará alcance a las perturbaciones que produce. A estas velocidades el aire sólo experimenta cambios graduales de velocidad y presión. Pero cuando el cuerpo se desplaza a velocidades superiores a la velocidad local del sonido, en aire tranquilo, las perturbaciones no pueden adelantar al móvil y se dice que se ha roto la **barrera del sonido**. Por lo tanto, el aire por delante del móvil sólo experimenta alteración cuando llega hasta él la **onda de choque** originada por el avance del cuerpo, con lo cual varían bruscamente la velocidad y las propiedades del fluido.

Esta onda de choque se origina en la superficie delantera del cuerpo o cerca suyo, según sea la forma del móvil,



transformando en calor gran parte de la energía cinética del móvil.

El resultado de esta onda de choque es un aumento del **arrastre** del cuerpo, que se llama **arrastre de onda** y que se suma al que produce la viscosidad del aire, por pequeña que sea; en otras palabras, aumenta considerablemente la fricción o roce.

El cociente entre la velocidad del móvil y la velocidad local del sonido, se conoce con el nombre de **número de mach**.

Así, por ejemplo, la expresión mach 2, significa que la velocidad del móvil es el doble de la velocidad del sonido en la zona en que aquél se desplaza.

Cuando las ondas de choque se despegan del móvil al virar o acelerar éste, y llegan a la superficie terrestre, su energía es capaz de producir una especie de trueno con tal intensidad que rompe los vidrios y otros

### Mach Number

$$\text{ratio} = \frac{\text{Object Speed}}{\text{Speed of Sound}} = \text{Mach Number}$$

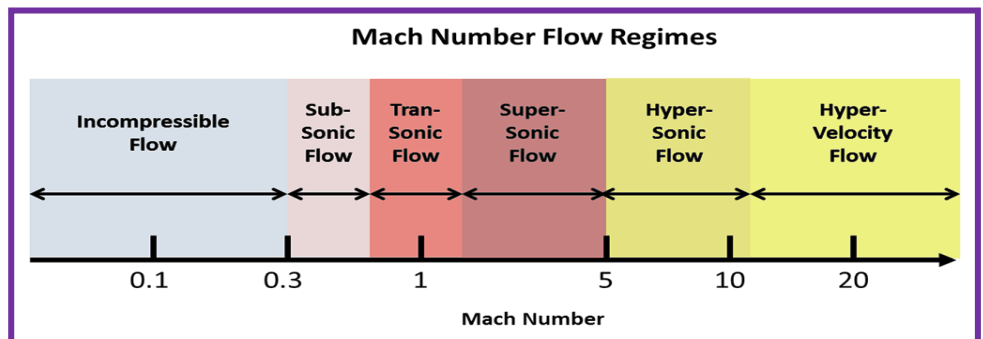
**Subsonic**  
Mach < 1.0

**Transonic**  
Mach = 1.0

**Supersonic**  
Mach > 1.0

**Hypersonic**  
Mach > 5.0

objetos frágiles que se hallen a su alcance. Por ello los vuelos supersónicos se limitan a grandes alturas.



## CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO

El diapasón es un instrumento que permite averiguar bastante acerca de los sonidos. Es una varilla metálica, prismática, doblada en U y sostenida por su punto medio.

Golpeando una de sus ramas, el diapasón vibra con una frecuencia bien definida, por lo cual el sonido emitido resulta puro, sin que otros de frecuencias diferentes se le superpongan. Cuando se lo golpea entra en vibración, produciendo un sonido que llama la atención.

Las características fundamentales que se distinguen en los sonidos o sensaciones sonoras son: **altura o tono, intensidad y timbre**. Cada una de ellas se atribuye a alguna propiedad de la fuente sonora o característica de la onda respectiva y permite diferenciar los sonidos entre sí.



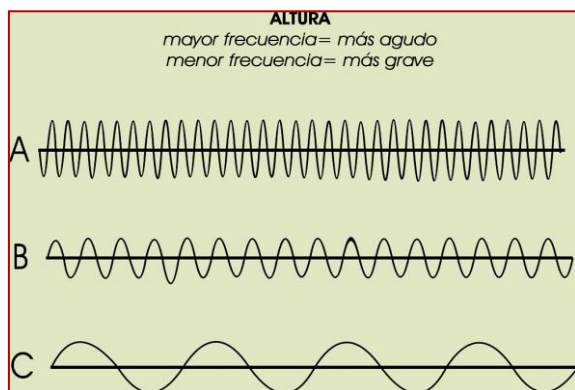
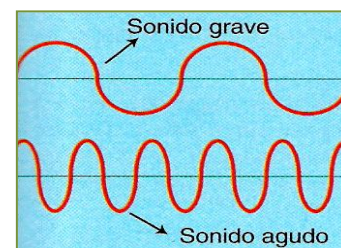
### a) ALTURA O TONO DEL SONIDO

Es la característica que permite distinguir cuándo un sonido es más agudo o más grave que otro.

Depende principalmente de la **frecuencia** del sonido y, por lo tanto, de las compresiones y enrarecimientos que el oído percibe por segundo (frecuencia).

Los sonidos graves o tonos bajos corresponden a las ondas de baja frecuencia (pocas vibraciones por segundos).

Los sonidos agudos o tonos altos corresponden a las ondas de mayor frecuencia (gran número de vibraciones por segundos).



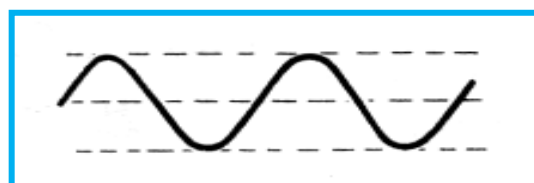
En lenguaje musical a un sonido grave se le llama "Bajo" y a un agudo "Alto".

En el gráfico hay tres ejemplos de onda de tres sonidos: en el caso A hay mayor frecuencia por lo tanto este sería un sonido agudo, en el caso B hay menos frecuencia por lo tanto sería un sonido más grave con respecto al anterior, y por último en el caso C es del de menor frecuencia por lo tanto sería el más grave de los tres.

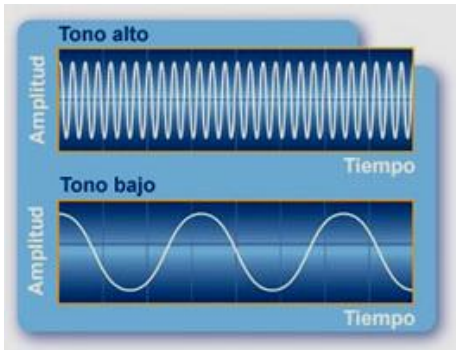
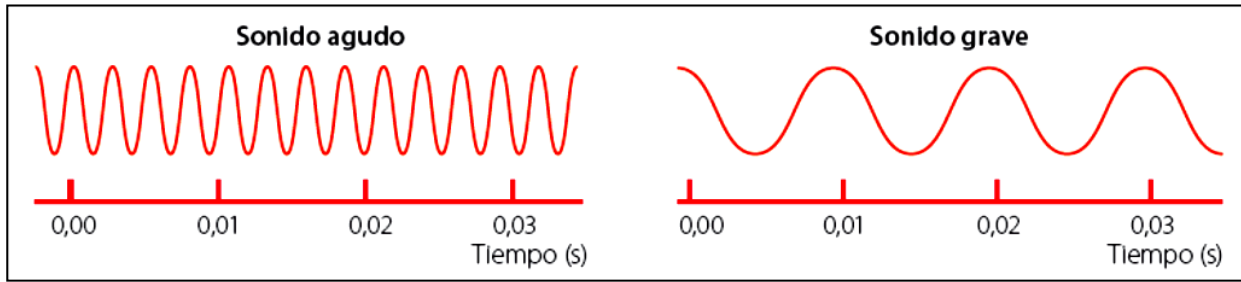
Si se toman dos diapasones que produzcan sonidos diferentes, y se hacen vibrar de tal forma que ambos tengan la misma intensidad (Amplitud). Observaremos que las dos sinusoides tienen la misma amplitud, pero el sonido del esquema N° 1 presenta una senoide más apretada, es decir este sonido posee mayor frecuencia, por lo tanto el sonido de la onda N° 1 es más agudo que la N° 2 (o menos grave).



Esquema N° 1



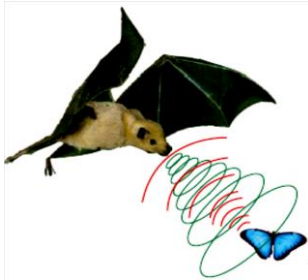
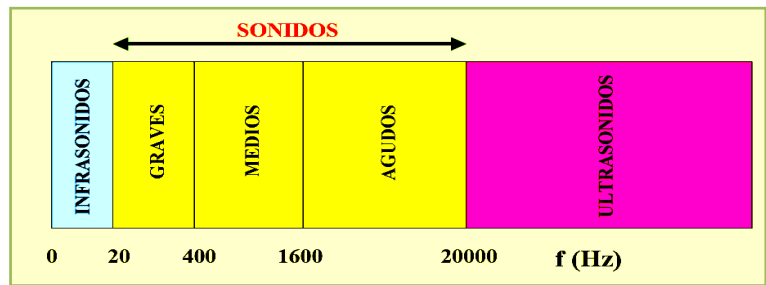
Esquema N° 2



En términos generales, los hombres emiten sonidos entre 110 Hz y 160 Hz y las mujeres 200 Hz y 300 Hz. Se tienen casos especiales, en los cantantes de ópera. En los varones, los bajos emiten sonido entre 110 Hz y 600 Hz; en las voces femeninas, las sopranos emiten sonidos entre 250 Hz y 1400 Hz.

El rango de audición humano es de **20 Hz** a **20000 Hz**, aproximadamente, y sus cuerdas vocales emiten sonidos entre 85 y 1400 Hz.

Algunos animales tienen la capacidad especial de escuchar algunas frecuencias fuera del rango audible de los seres humanos como las frecuencias de ultrasonido. De hecho, esta capacidad es altamente importante para su supervivencia,



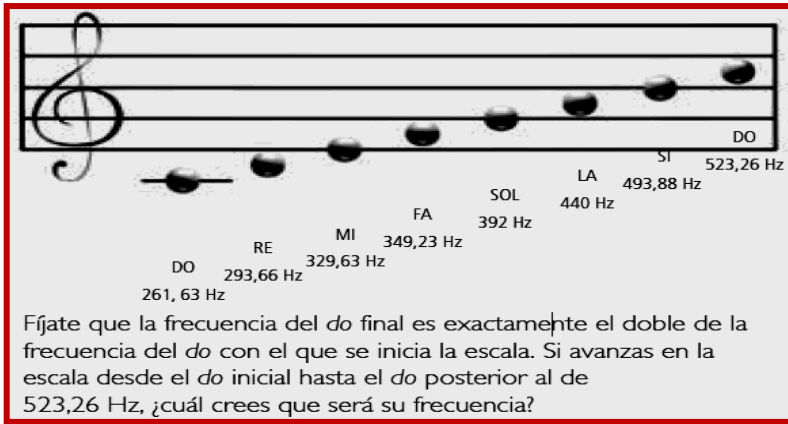
como es el caso de los delfines y ballenas, que se guían por el eco del sonido, caso similar al de los murciélagos.

Los murciélagos son los únicos mamíferos voladores nocturnos que vuelan y cazan utilizando el sonido como medio para ubicar tanto los obstáculos como a sus presas. Los mamíferos marinos, como delfines y ballenas, también usan el sonido para comunicarse entre ellos y nadar a profundidades donde no hay luz solar y poder cazar a sus presas.

### CONEXIÓN CON LA MÚSICA

El sonido, en combinación con el silencio, es la materia prima de la música. En música los sonidos se califican en categorías como: largos y cortos, fuertes y débiles, agudos y graves, agradables y desagradables. El sonido ha estado siempre presente en la vida cotidiana del hombre. A lo largo de la historia el ser humano ha inventado una serie de reglas para ordenarlo hasta construir algún tipo de lenguaje musical.

La escala musical es un ordenamiento ascendente de tonos; una de las escalas más conocidas es la diatónica, que corresponde a una escala conformada por ocho notas musicales. La frecuencia correspondiente a cada una de dichas notas musicales ha ido cambiando en el transcurso de la historia, según el gusto, estilo y posibilidades de cada época, hasta que en 1939 se fijó la frecuencia de una nota de referencia, a partir de la que se dedujeron las demás. La nota y frecuencia escogida fue la, a 440 Hz, las frecuencias correspondientes a cada nota de la escala diatónica son las siguientes:



## LA ESCALA MUSICAL Y SU ORIGEN

Se remonta a los griegos el estudio cuantitativo de la primera escala musical cuando, al relacionar entre sí los sonidos emitidos por un instrumento de una sola cuerda montada en una caja de resonancia conocido como **monocordio**, descubren los intervalos musicales (diferencia de tonos), al variar su longitud

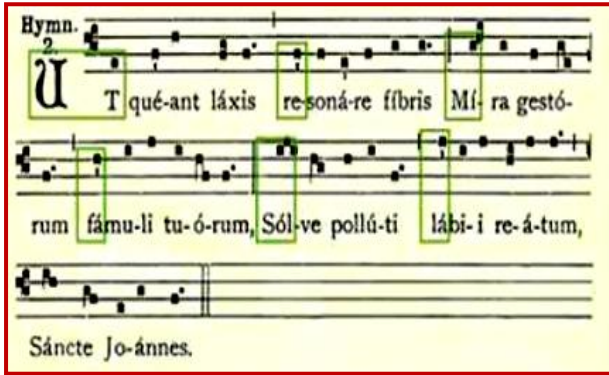
mediante el desplazamiento de una cuña móvil. Fue **Pitágoras** (580-520 A.C.) quien se dio cuenta de la relación existente entre la longitud de la cuerda tensada y el conjunto de notas que emite, al pulsarla en diferentes puntos; de que existe una armonía en la música, que depende a su vez de cómo se tensen y de qué tan larga sea la cuerda.



Esta armonía surge de la adaptación evolutiva de nuestro oído a la diversidad de sonidos emitidos por los objetos en la naturaleza. Cualquier objeto cuando vibra, lo hace con su modo fundamental y con un conjunto de armónicos cuyas frecuencias de vibración son múltiplos enteros o semi enteros de la frecuencia fundamental. En consecuencia, nuestro cerebro ha evolucionado en forma tal que, aquellos sonidos que guarden una relación de frecuencia en forma de proporción simple ( $2/1$ ,  $3/2$ ,  $4/3$ ...), los reconoce como sonidos consonantes y producen una sensación armoniosa y agradable al escucharlos. De esto se dio cuenta Pitágoras y por lo tanto, procedió a establecer la primera escala musical.

A partir de un minucioso estudio, Pitágoras determina que la cuerda tensada de cierta longitud ( $L$ ) emite un sonido cuya sensación auditiva es exactamente igual al generado cuando se pulsa su mitad ( $L/2$ ), pero con un tono más agudo de frecuencia doble; hoy en día, se conoce como la **octava** ( $L/2$ ) de la nota inicial denominada **tónica** ( $L$ ). Luego, la dividió en tres partes iguales y pulsó dos tercios ( $2L/3$ ) de la misma, encontrando que la cuerda emitía un sonido consonante, armonioso, es decir agradable al oído y que su frecuencia era  $3/2$  veces mayor que la frecuencia de la tónica; este intervalo se conoce como la **quinta**. La dividió en cuatro partes iguales y pulsó tres cuartas ( $3L/4$ ) partes de su longitud, encontrando que la frecuencia de la nota era  $4/3$  mayor que la frecuencia de la tónica; este intervalo se denomina la **cuarta**. Procediendo de manera similar se obtienen los demás intervalos. En particular, para una cuerda de longitud  $L$ , el **segundo** intervalo se obtiene pulsando la cuerda a  $2/3$  de la longitud de la quinta la cual es igual a  $2/3 L$ ; es decir, a  $(2/3) L = 4/9 L$ ; como la frecuencia de la nota que da este trozo de cuerda es  $9/4 f = 2,25 f$  y superior a  $2 f$ , es necesario elegir una cuerda que sea el doble de  $4/9 L$ , es decir de longitud  $8/9 L$ ; de modo que al ser pulsada emita un tono entre  $f$  y  $2f$  y su frecuencia será de  $9/8 f = 1,125 f$ . En forma análoga se procede con los demás intervalos para obtener las notas musicales y completar así las siete que se conocen: **Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si**. Por otra parte, si se elige como tónica la nota  $Do_4$  cuya frecuencia es de 261,63 Hz se puede calcular la frecuencia de cada nota.

## NOMBRE DE LAS NOTAS MUSICALES: HIMNO A SAN JUAN



**Ut queant laxis** es el primer verso del Himno a San Juan Bautista, escrito por el historiador lombardo Pablo el Diácono en el siglo VIII.

De las primeras sílabas de los versos de este himno se toma el nombre las notas musicales de la notación latina moderna, hecho realizado por Guido de Arezzo en el Siglo XI. Guido de Arezzo utilizó la primera sílaba de cada estrofa, excepto la última: ut, re, mi, fa, sol, la. Siglos más tarde, Anselmo de Flandes introdujo el

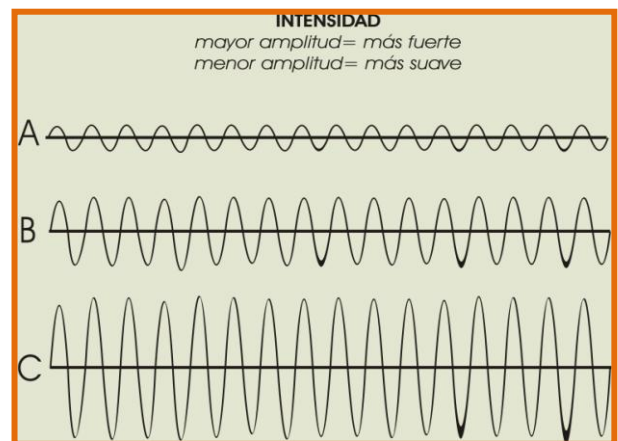
nombre si para la nota faltante, combinando las iniciales de Sancte Ioannes. Posteriormente, en el siglo XVII el musicólogo italiano Giovanni Battista Doni sustituyó la nota ut por do, pues esta sílaba facilitaba el solfeo por terminar en vocal. Constató que era difícil solfear con la nota ut ya que terminaba en una consonante sorda, tuvo la idea de reemplazarla con la primera sílaba de su propio apellido (do) para facilitar su pronunciación. Otra teoría afirma que quizá provenga del término Dominus, Señor en latín. En Francia todavía se sigue usando ut para algunos términos musicales técnicos o teóricos, por ejemplo trompette en ut o clé d'ut.

Nota	Texto original en latín	Traducción
<i>Ut - Do</i>	<i>Ut queant laxis</i>	<i>Para que puedan</i>
<i>Re</i>	<i>Resonare fibris</i>	<i>exaltar a pleno pulmón</i>
<i>Mi</i>	<i>Mira gestorum</i>	<i>las maravillas</i>
<i>Fa</i>	<i>Famuli tuorum</i>	<i>estos siervos tuyos</i>
<i>Sol</i>	<i>Solve polluti</i>	<i>perdona la falta</i>
<i>La</i>	<i>Labii reatum</i>	<i>de nuestros labios impuros</i>
<i>Si</i>	<i>Sancte Ioannes.</i>	<i>San Juan.</i>

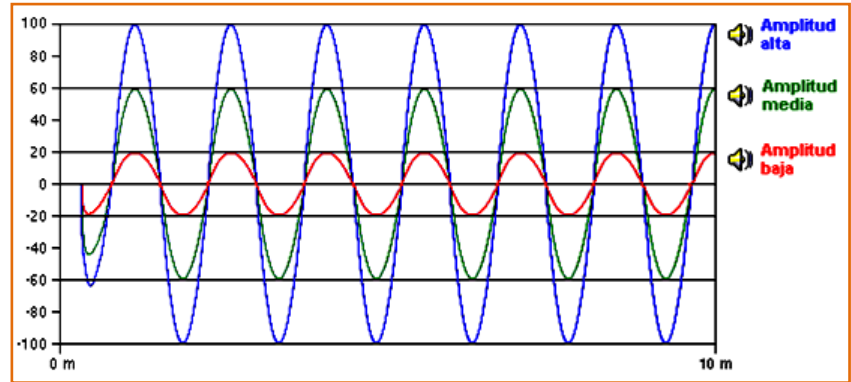
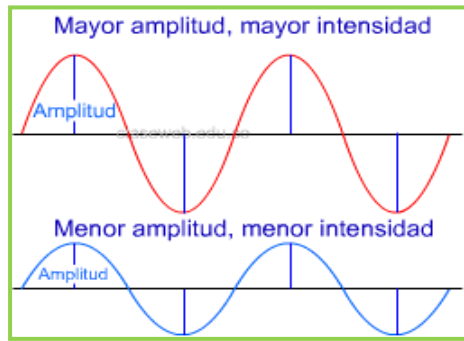
### b) INTENSIDAD DEL SONIDO

Cuando se habla de sonidos intensos y débiles, se refiere a la intensidad del sonido y ésta depende de la **Amplitud** de la vibración, siendo un sonido más intenso cuando la amplitud es mayor y un sonido más débil cuando la amplitud es menor.

En cuanto a la intensidad que se muestra en el ejemplo podríamos decir que el ejemplo A corresponde a un sonido suave o piano como se indica en el lenguaje musical y el ejemplo C a un sonido fuerte o forte, B se encuentra en un término medio o mezzo forte.





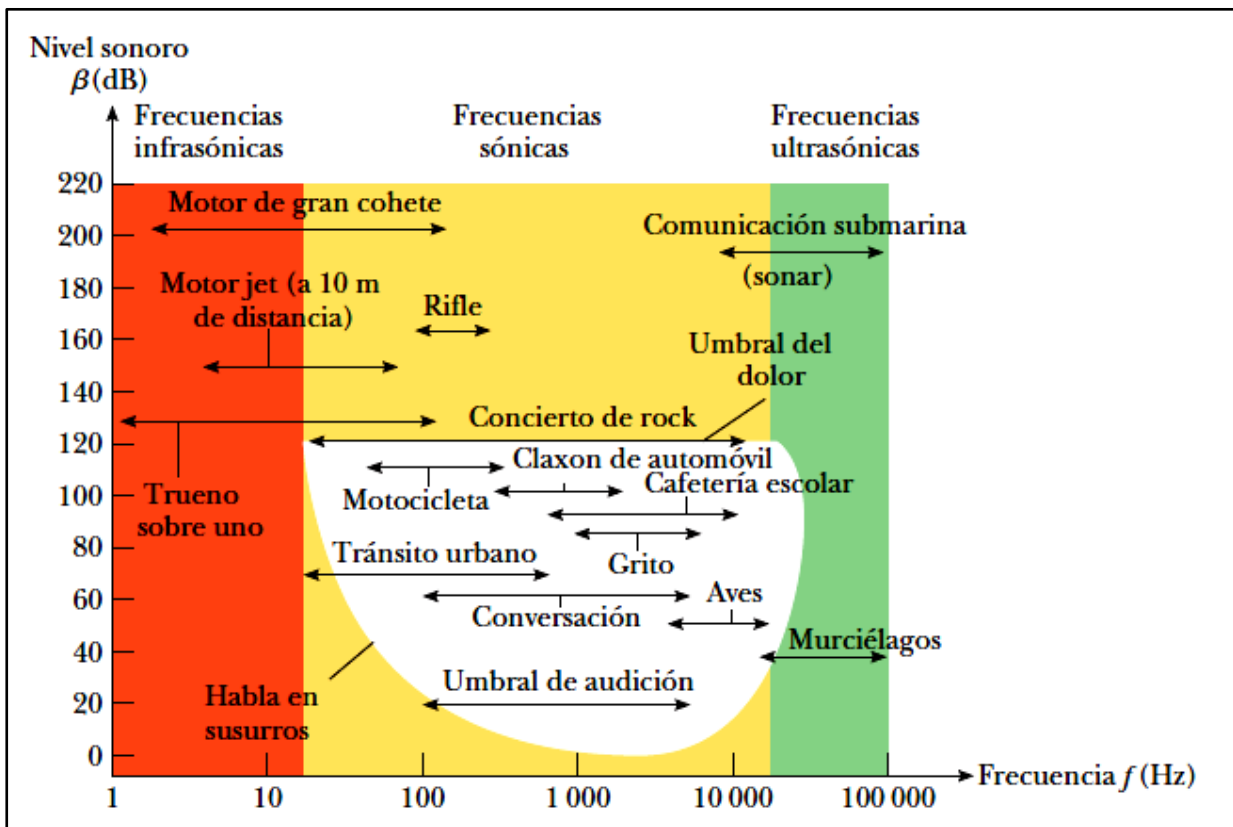
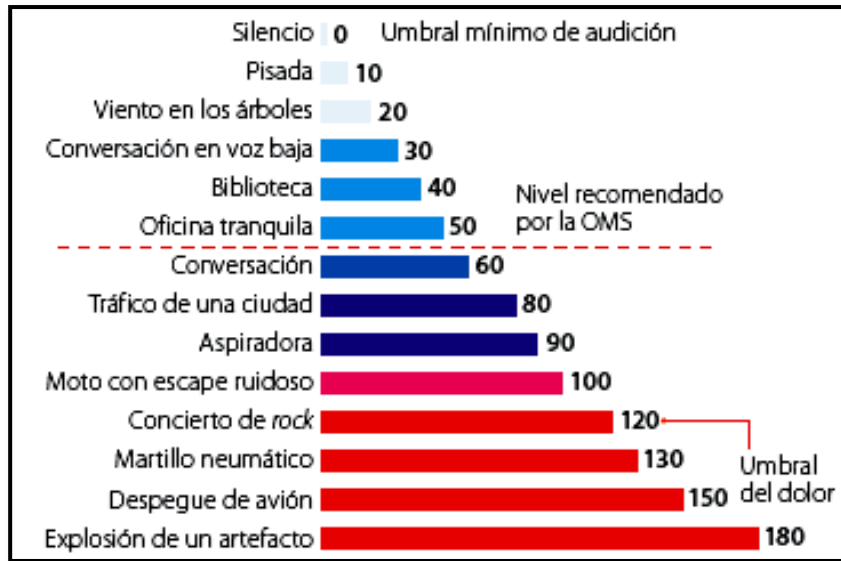


El **nivel de la intensidad** del sonido se mide en una unidad llamada decibel, que corresponde a la décima parte de otra unidad mayor llamada Bel. Así, el nivel mínimo o umbral de audición corresponde a 0 dB, que se asocia a la mínima intensidad que es capaz de percibir nuestro oído; por lo tanto, los sonidos bajo este nivel de intensidad no son perceptibles por el ser humano. El nivel máximo, también llamado umbral de dolor, corresponde a 120 dB y por encima de él se percibe una sensación dolorosa. La siguiente tabla muestra distintas situaciones, sus niveles de intensidad de sonido y los efectos que provocan en la audición de los seres humanos.

### EJEMPLOS DE NIVELES DE INTENSIDAD DEL SONIDO

140 dB	Disparo de escopeta / Umbral de dolor
130 dB	Avión despegando / fuegos artificiales
120 dB	Motor de avión / martillo neumático
110 dB	Concierto de rock
100 dB	Taladro
90 dB	Atasco de tráfico en una ciudad
80 dB	Tren / secador de pelo
70 dB	Tráfico tranquilo / aspiradora
60 dB	Conversación normal
50 dB	Sonido ambiental en una oficina
40 dB	Conversación susurrada / lluvia
30 dB	Sonido ambiental en el campo
20 dB	Estudio de grabación vacío
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición normal

	dBA	Nivel aproximado de ruido asociado a diferentes actividades
Son esperables daños en la audición	140	Umbral del dolor
	130	
	120	
	110	
Son esperables molestias en función del tipo de trabajo	100	
	90	
	80	
	70	
No son esperables daños ni molestias	60	
	50	
	40	
	30	
	20	
	10	
	0	Umbral de la audición



Con el uso de sujetos experimentales se ha podido estudiar la respuesta humana a los sonidos, y los resultados se muestran en el área blanca de la figura, junto con la frecuencia aproximada y los alcances de nivel sonoro de otras fuentes sonoras. La curva inferior del área blanca corresponde al umbral de audición. Su variación con la frecuencia es clara a partir de este diagrama. Note que los humanos son sensibles a frecuencias en el intervalo de casi 20 Hz hasta aproximadamente 20 000 Hz. La frontera superior del área blanca es el umbral del dolor. En este caso la frontera del área blanca es recta porque la respuesta psicológica es en cierta medida independiente de la frecuencia a este nivel sonoro alto.

El cambio más dramático con la frecuencia está en la región inferior izquierda del área blanca, para frecuencias bajas y niveles de intensidad bajos. Los oídos humanos son insensibles en esta región. Si usted escucha su estéreo y los sonidos graves (frecuencias bajas) y agudos (frecuencias altas) se equilibran a un volumen alto, intente bajar el volumen y escuchar de nuevo. Quizá notará que el grave parece débil, lo que se debe a la insensibilidad del oído a frecuencias bajas a niveles sonoros bajos, como se muestra en la figura.

### Nivel sonoro de una sonora en decibeles

Dado que el oído es sensible a una amplia gama de intensidades, suele usarse una escala de intensidad logarítmica. El nivel de intensidad de sonido  $\beta$  de una onda sonora está definido por la ecuación:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Donde:

$\beta$  = Nivel de intensidad del sonido, decibeles

I = Potencia acústica, watt

M<sup>2</sup> = Área, metro<sup>2</sup>

En esta ecuación,  $I_0$  es una intensidad de referencia que se toma como  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, aproximadamente el umbral de la audición humana a 1000 Hz. I es la intensidad de la onda sonora en watts por metro cuadrado. "log" significa logaritmo base 10. Los niveles de intensidad de sonido se expresan en decibeles, cuya abreviatura es dB. Un decibel es de un 1/10 bel, unidad llamada así en honor de Alexander Graham Bell (el inventor del teléfono). El bel es demasiado grande para casi todos los fines, así que el decibel es la unidad usual de nivel de intensidad de sonido.

Si la intensidad de una onda sonora es igual a  $I_0$  o a  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, su nivel de intensidad de sonido es de 0 dB. Una intensidad de 1 W/m<sup>2</sup> corresponde a 120 dB. Por lo tanto si se considera  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, la ecuación se reduce a:

$$\beta = 10 \cdot \log I + 120$$

Por ejemplo, una potencia de 0,05 watt corresponde a un nivel de potencia:

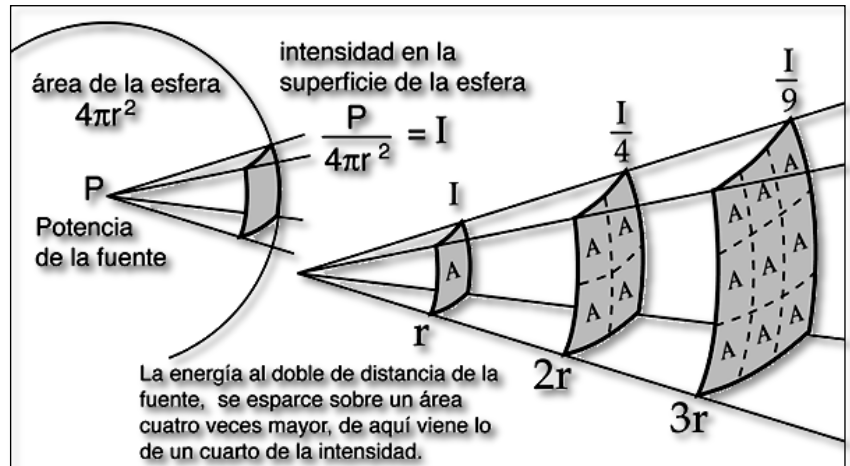
$$\beta = 10 \cdot \log \frac{0,05}{10^{-12}} = 107 \text{ decibeles}$$

o

$$\beta = 10 \cdot \log 0,05 + 120 = 107 \text{ decibeles}$$

### Intensidad del sonido en función de la distancia a una fuente puntual. Ley del inverso del cuadrado

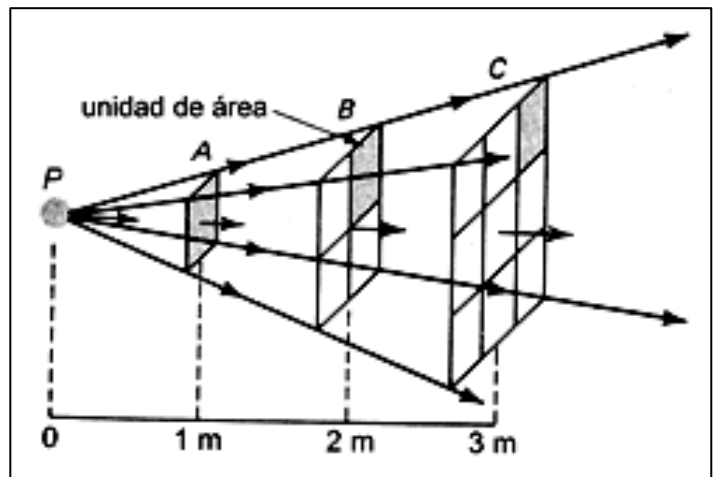
La intensidad del sonido proveniente de una fuente puntual, si no hay reflexiones o reverberaciones, obedece la ley del inverso del cuadrado. Una gráfica muestra esta abrupta caída de intensidad. Es decir la potencia que pasa por la unidad de área a 1 m de la fuente se ha distribuido en 4 unidades de área a 2 m de la fuente, y en 9 unidades de área a 3 m de la fuente. Per tanto, la potencia que pasa por unidad de área ha ido disminuyendo  $d^2$  veces, siendo  $d$  la distancia en metros.



Otro enunciado de esta ley: La relación entre las intensidades  $I_1$  e  $I_2$  a distancias  $d_1$  y  $d_2$  respectivamente es:

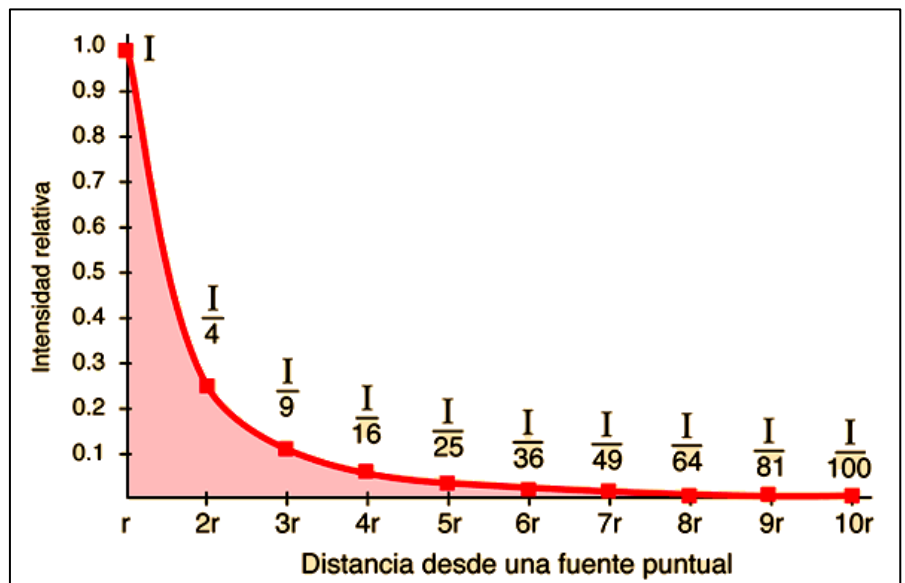
$$I_1 \cdot d_1^2 = I_2 \cdot d_2^2$$

Esta es la expresión de la denominada ley del cuadrado de la distancia: "la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente (considerada puntual)".



### Gráfico de la Ley del Inverso del Cuadrado

El gráfico de la caída de la intensidad de sonido de acuerdo con la ley del inverso del cuadrado enfatiza la rápida pérdida asociada con ella. En un auditorio, tal pérdida rápida es inaceptable. En un buen auditorio, queda mitigada por la reverberación. Este gráfico muestra los puntos conectados por líneas rectas, pero la caída real es una suave curva entre esos puntos.



## EL EFECTO ENMASCARAMIENTO



Una persona está descansando plácidamente en el campo, percibiendo el canto de un pájaro. En forma seguida, pasa un camión emitiendo un ruido muy fuerte. En este caso la persona ya no oye sólo el canto del pájaro, sino también, y al mismo tiempo, el ruido del camión.



El sonido que nos interesa (el del pájaro) no desaparece: queda "enmascarado" por el ruido indeseable (del camión).

La audición de una fuente sonora, la comprensión de una conversación o de un discurso queda a menudo perturbados por ruidos indeseables.

Nuestro oído percibe entonces un sonido mezclado cuya inteligibilidad o claridad queda disminuida por el efecto de enmascaramiento, que es consecuencia del ruido de fondo perturbador.

En estas condiciones de audición, aparecen dos necesidades fundamentales: disminuir el ruido de fondo y aumentar el nivel sonoro de la fuente.

Otros fenómenos tienen los mismos efectos y alteran nuestra capacidad para reconocer un mensaje: distorsiones, eco y reverberación, falta de nivel, etc.

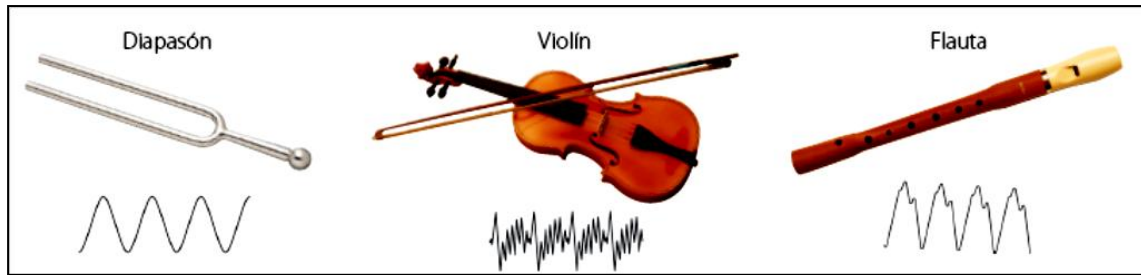
Para obtener una audición adecuada es necesario tener una presión acústica de **10 dB por encima del ruido ambiental**.

### c) TIMBRE O CALIDAD DEL SONIDO

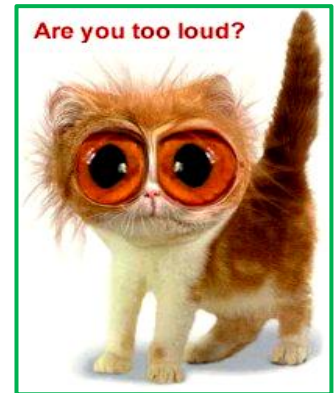


El timbre es otra cualidad del sonido el cual distingue entre sonidos de igual altura e intensidad producidos por **fuentes sonoras diferentes**. Si tocamos una cierta nota de un piano, y si la misma nota (de la misma frecuencia) fuese emitida con la misma intensidad por un violín, podríamos distinguir una de la otra; es decir, podemos decir claramente cuál nota fue la que emitió el piano, y cuál, el violín. Decimos entonces que estas notas tienen un "timbre" diferente.

Esto se debe a que la nota emitida por un piano es el resultado de la vibración no única de la cuerda accionada, sino también de algunas otras partes del piano (madera, columna de aire, otras cuerdas, etc.) las cuales vibran junto con ella. Así pues, la onda sonora emitida tendrá una forma propia, característica del piano. De la misma manera, la onda emitida por un violín es el resultado de vibraciones características de este instrumento, y por ello presenta una forma diferente a la de la onda emitida por un piano.



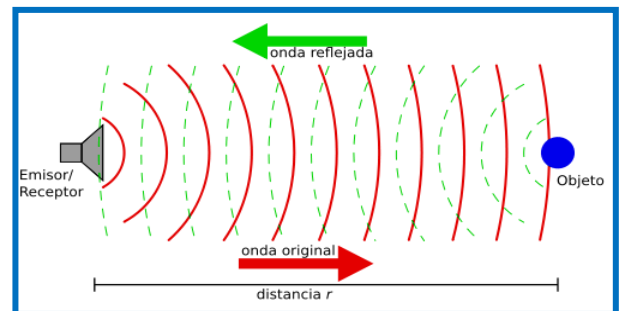
Lo que se dice para el violín y el piano, se aplica también a los demás instrumentos musicales: la onda sonora resultante que cada uno de ellos emite, y que corresponde a una nota determinada, tiene una forma propia, característica del instrumento; es decir, cada uno de ellos posee su propio timbre. La voz de las personas también tiene un timbre propio, porque la forma de la onda sonora que producen está determinada por características personales. Este es el motivo por el cual podemos identificar a una persona por su voz.



## PROPIEDADES DEL SONIDO

### REFLEXIÓN DEL SONIDO

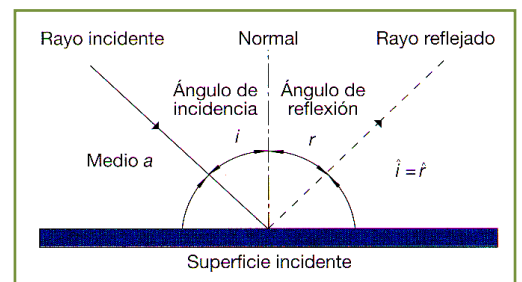
Cuando un frente de ondas incide sobre una superficie, una parte de la energía sonora se transforma en calor por efecto del choque, siendo **absorbida** por la sustancia correspondiente; otra da origen a ondas que continúan propagándose a través de la nueva sustancia, produciendo el fenómeno llamado **refracción** de las ondas sonoras, y una tercera porción todavía se **refleja**, es decir, da origen a ondas sonoras que se propagan en el mismo medio de procedencia, con igual o distinta dirección que la de incidencia.



**Luego, una onda sonora ha experimentado una reflexión si, al incidir sobre una superficie, desvía su trayectoria propagándose en el mismo medio de origen.**

Fácil es comprobar experimentalmente que la reflexión de las ondas sonoras se rige por las siguientes leyes:

1. Los rayos sonoros, incidente y reflejado, y la Normal en el punto de incidencia están en un mismo plano, perpendicular a la superficie reflectora.
2. El ángulo de incidencia de una onda sonora es igual al ángulo de reflexión de la misma.

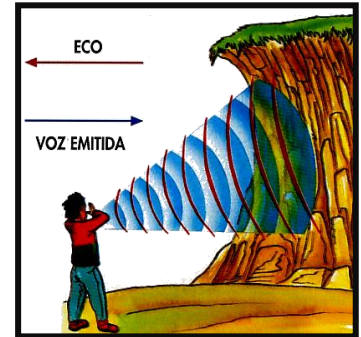


Un caso particular corresponde a aquella onda sonora que incide normalmente sobre una superficie y que se refleja en sentido contrario sobre su dirección de incidencia.

## ECO Y REVERBERACIÓN



Otro fenómeno interesante debido a la reflexión de las ondas sonoras es el eco. Consiste en que un sonido que se refleja a cierta distancia de la fuente sonora o del auditor, puede volverse a escuchar después que se ha extinguido la sensación inicial. Puede ocurrir por reflexión normal o por varias reflexiones sucesivas.

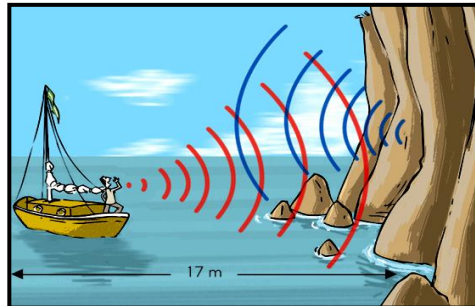
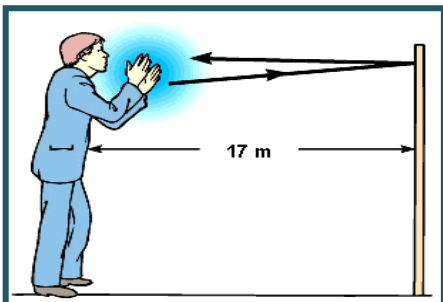


Es frecuente este fenómeno en los grandes edificios y en las montañas. En los primeros se procura evitarlo al máximo para dar una **buena acústica** a las construcciones, haciendo que las salas no sean demasiado grandes o, si deben serlo, que estén dotadas de adornos, columnas, cortinajes, etc., que reduzcan las distancias o absorban gran cantidad de energía sonora.

Si se trata de palabras y no de gritos o golpes, el eco puede ser **monosilábico** si reproduce sólo la última sílaba; **bisilábico**, si reproduce las dos últimas y, en general, **polisilábico** si reproduce muchas.

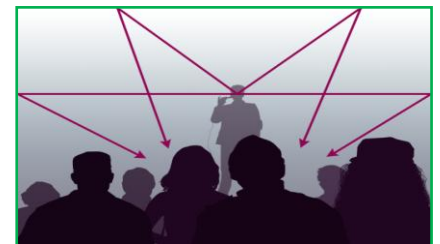
Además, si el eco se produce una sola vez recibe el nombre de **eco simple** y si lo hace varias veces, **eco múltiple**. Este último se debe a la presencia de varias superficies reflectoras y se produce especialmente cuando éstas son más o menos paralelas.

Por otra parte, como el oído puede distinguir y percibir con claridad unas diez sílabas por segundo, la impresión sonora de cada una persistirá durante  $1/10$  de segundo, por lo cual, para que se produzca eco monosilábico el sonido deberá recorrer, en ese lapso, aproximadamente  $1/10$  de 340 m, o sea, 34 m. Esto quiere decir que **la distancia mínima a que debe encontrarse la superficie reflectora para que produzca eco es de 17 metros**, ya que en  $1/10$  de segundo la onda sonora debe ir al obstáculo y volver a su fuente de origen.



Cuando el sonido reflejado llega al oído del auditor en un tiempo menor que  $1/10$  de segundo después de emitido, podría suceder que el sonido reflejado y el directo se perturben o

se superpongan para el oyente. En este último caso se origina el fenómeno llamado **reverberación**, el cual, debidamente controlado, contribuye a mejorar las condiciones acústicas de teatros, salas de conciertos, etc. Sucede cuando las ondas sonoras experimentan múltiples reflexiones y llegan al oído con una diferencia de menos de 0,1 s. Cuando esto pasa, se entorpece la claridad de la audición porque el oído no diferencia entre el sonido emitido y el reflejado, ya que ambos se mezclan. Este fenómeno ocurre frecuentemente en catedrales y teatros cuando escuchamos el "alargamiento" de los sonidos.



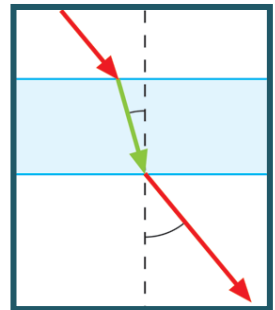
La reverberación es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido. Se produce en lugares cerrados amplios y vacíos. Consistente en una ligera prolongación del sonido una

vez que se ha extinguido el original, debido a las ondas reflejadas. Este fenómeno ocurre frecuentemente en catedrales y teatros cuando escuchamos el "alargamiento" de los sonidos. Estas ondas reflejadas sufrirán un retardo no superior a 0,1 s. Cuando el retardo es mayor ya no hablamos de reverberación, sino de eco.

En salas de conciertos, teatros y cines se emplean materiales absorbentes para evitar la reverberación. Sin embargo, una ausencia de reverberación resta sonoridad y calidad a la música. De ahí que las salas se diseñen de forma adecuada para conseguir la mejor audición.

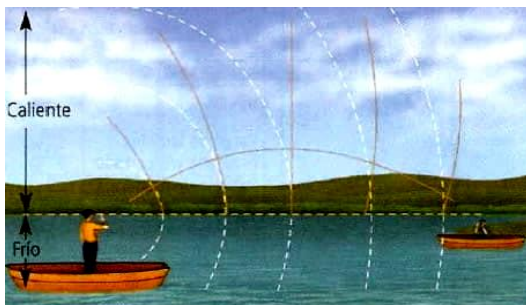
### REFRACCIÓN DEL SONIDO

La refracción es un fenómeno que afecta a la propagación del sonido, y que consiste en la desviación que sufren las ondas en la dirección de su propagación, cuando el sonido pasa de un medio a otro diferente. A diferencia de lo que ocurre en el fenómeno de la reflexión, en la refracción, el ángulo de refracción ya no es igual al de incidencia.

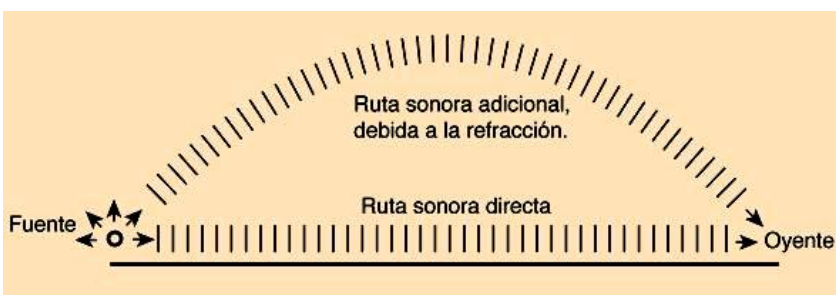


Cuando una onda sonora se propaga en dos medios distintos la rapidez con la cual lo hace es diferente, dependiendo de la elasticidad del medio; por ejemplo un sonido generado en las profundidades del agua avanza mucho más rápido en este medio que en el aire (en el agua de mar la rapidez de propagación del sonido es de 1530 m/s en cambio en el aire es aproximadamente de 340 m/s). La elasticidad del medio corresponde a la capacidad de este para recuperar su forma inicial, lo anterior significa que los átomos están más juntos por lo que reaccionan rápidamente a la transmisión de energía. Por lo tanto en la refracción de un sonido **cambia la velocidad, la longitud de onda, pero la frecuencia se mantiene constante.**

En el caso de la atmósfera la temperatura influye en la transmisión del sonido, esto se debe al cambio de la densidad del aire y por lo tanto a la rapidez con que se transfiere la información. Si consideramos dos días en los cuales la temperatura es diferente, lo que significa que la atmósfera se calienta en forma diferente nos encontraremos que un sonido generado paralelo a la superficie en su viaje se curvará.



La figura muestra la propagación de dos sonidos la propagación del sonido durante un día caluroso, en este caso las ondas tienden alejarse del suelo, porque viajan más rápidas en esa zona. En cambio la propagación del sonido

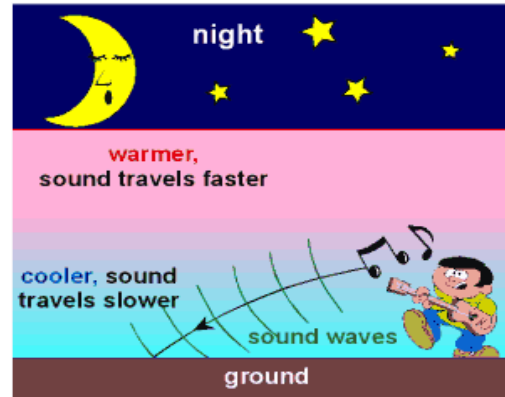
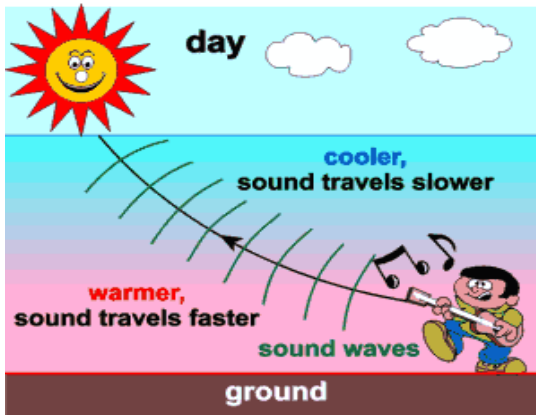


en un día frío, cuando las capas del aire cercanas al suelo están más frías que en la parte superior, por lo tanto el sonido viaja con menor rapidez en las cercanías del suelo curvándose hacia abajo.

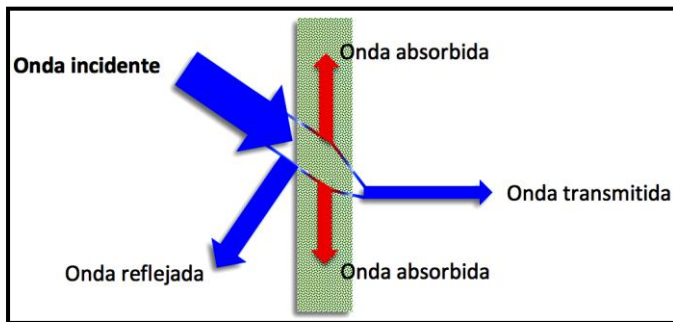
en un día frío, cuando las capas del aire cercanas al suelo están más frías que en la parte superior, por lo tanto el sonido viaja con menor rapidez en las cercanías del suelo curvándose hacia abajo.







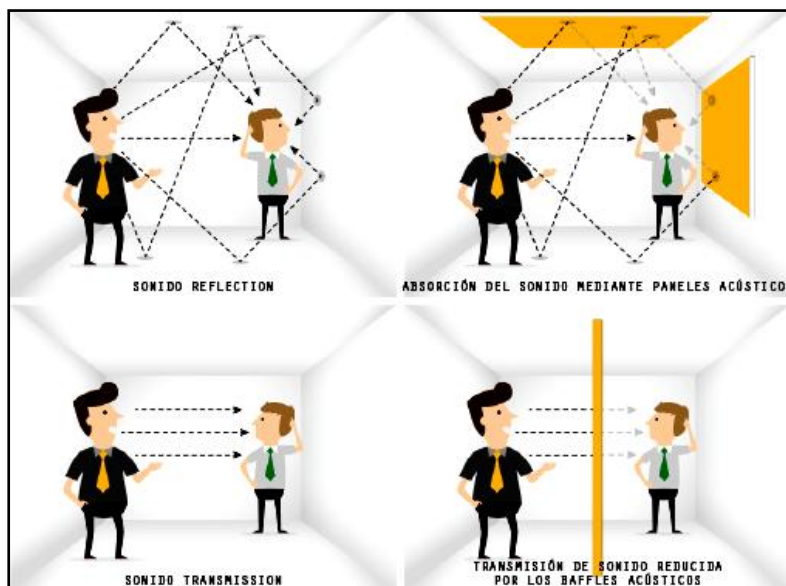
## ABSORCIÓN DEL SONIDO



Cuando una onda sonora se propaga por el aire nos encontramos que esta viaja una distancia limitada, esto significa que el medio absorbe parte de la energía que transportaba la onda. La absorción de la onda sonora depende de la plasticidad del medio por donde se propaga, siendo mayor para las frecuencias altas que para las frecuencias bajas, si en alguna ocasión has gritado en una sala vacía el sonido se ha reflejado

múltiples veces generando una reverberación, dando la sensación de soledad en el interior de la sala, en cambio si la sala está con personas, mobiliario, cortinajes y alfombrada encontraremos que no se genera reverberación, es decir, el sonido ha sido absorbido en gran parte.

El sonido se absorbe más en los materiales blandos y porosos que en los materiales perfectamente lisos. Son buenos absorbentes del sonido las telas, las alfombras, la espuma, la plumavit y el cartón corrugado. Por ejemplo un sonido de 550 Hz que es emitido en una sala de baldosas con alfombras absorbe 15 veces más que cuando esta sin alfombras.



La propiedad de reflejar o absorber el sonido resulta ser muy importante al momento de decidir cuál es el mejor material para revestir una pared. En paredes construidas con madera es recomendable en el interior de ellas ubicar material absorbente para evitar que se escuche los sonidos de la habitación contigua, también en las salas de conciertos y estudios musicales la reflexión del sonido juega un papel importante en la claridad de la audición, un buen teatro es aquel en el cual el sonido de la caída de una aguja sobre la superficie del escenario es escuchado en cualquier parte de la sala, lo anterior significa que la reflexión y absorción en la sala es óptima.

La siguiente tabla muestra el coeficiente de absorción de algunos materiales según la frecuencia del sonido.

Material	Coeficiente de absorción del sonido según frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Vidrio	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Corcho	0,12	0,27	0,72	0,79	0,76	0,77
Ladrillo pintado	0,012	0,014	0,017	0,020	0,023	0,025
Alfombra de goma	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Tejido de algodón 360 g/m	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Butaca de madera	0,02	0,02	0,03	0,035	0,038	0,038
Butaca tapizada	0,30	0,32	0,27	0,30	0,33	0,33
Asiento de madera con persona	0,15	0,25	0,35	0,38	0,38	0,35
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Por ejemplo, si una onda sonora de frecuencia 125 Hz incide sobre una alfombra de goma, cuyo coeficiente de absorción es 0,04, significa que la alfombra absorberá el 4 % de la energía incidente del sonido.

## RESONANCIA

Cuando un cuerpo o sistema de cuerpos es excitado por una fuerza periódica de frecuencia igual o semejante a la del sistema, éste es puesto en vibración con la frecuencia de la fuerza excitante. Este fenómeno recibe el nombre de **resonancia** y las vibraciones, **vibraciones por simpatía**.

**La frecuencia propia** de un sistema se denomina **frecuencia natural** del mismo y es aquella que corresponde a las ondas del sistema cuando vibra libremente. En cambio, se dice que un sistema efectúa **vibraciones forzadas** cuando la frecuencia de sus vibraciones difiere de su frecuencia natural.

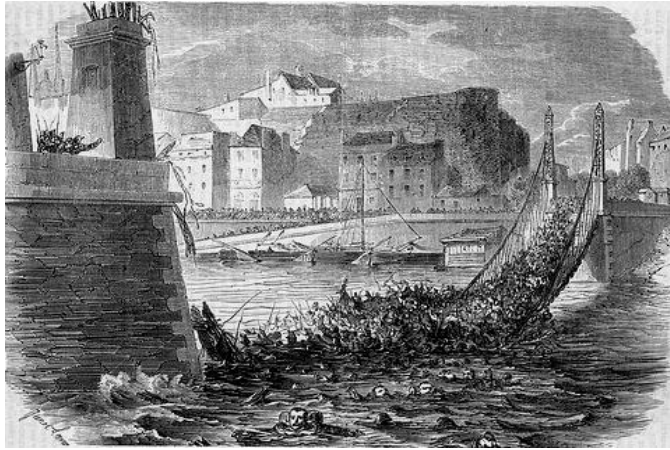
Luego, se tendrá resonancia si la frecuencia de la fuerza excitante es igual a la frecuencia natural del sistema o cuerpo resonante.

Cualquiera estructura, por ejemplo un edificio o puente, tiene su propia frecuencia natural. La resonancia es un fenómeno general que existe tanto en el campo mecánico como electrónico, acústico, etc.

Un ejemplo sencillo de resonancia mecánica se tiene en un columpio, al que puede considerársele como un péndulo con una frecuencia natural que depende de su longitud.

La amplitud de la oscilación será grande cuando el columpio oscile con una frecuencia igual a su frecuencia natural; en caso contrario, la amplitud de la oscilación será mucho menor.

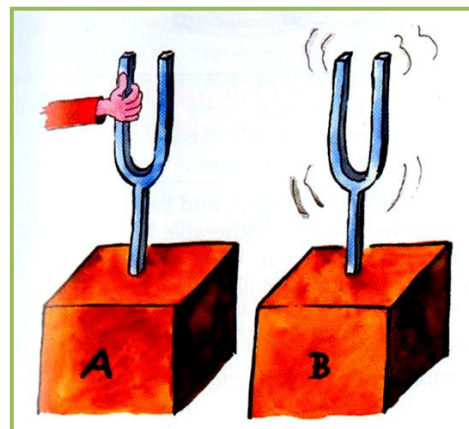
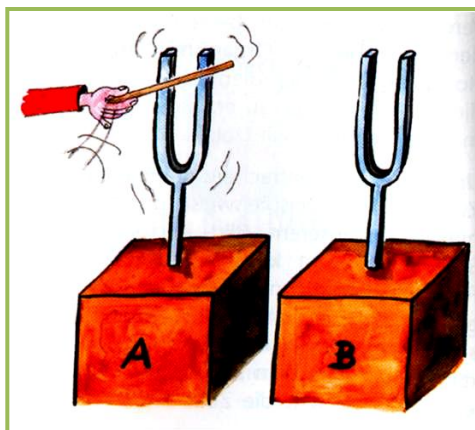
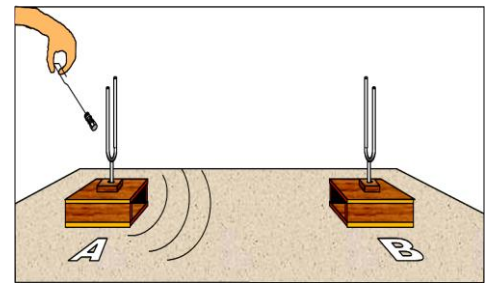
Un hecho que encuentra su explicación en este fenómeno, es el que ocurre cuando por un puente debe pasar un ejército a paso regular y se ordena romper filas a fin de evitar que la frecuencia de la vibración impresa por los soldados coincida con la frecuencia natural del puente.



Los soldados rompen filas al cruzar un puente para evitar que la frecuencia de su marcha pueda entrar en resonancia mecánica con la frecuencia natural del puente, derribándolo. Como ocurrió en Francia en abril de 1850 al paso de una tropa en formación en el puente de La Maine.

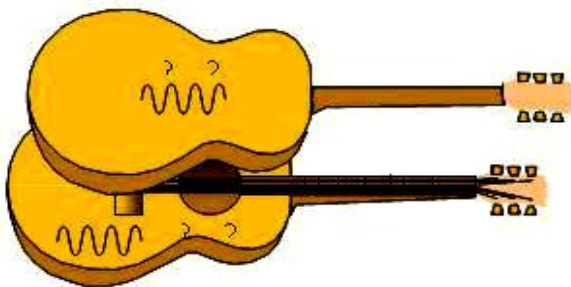
El sintonizar una radio es un fenómeno de resonancia eléctrica, y se logra cuando la frecuencia natural de una corriente alterna coincide con la frecuencia de las ondas emitidas por la estación que se desea sintonizar.

El fenómeno de resonancia acústica se pone fácilmente en evidencia con dos diapasones idénticos, situados a alguna distancia uno de otro. Al golpear uno de ellos y luego "apagar su sonido" tocándolo con la mano, se oirá al otro vibrar con la misma frecuencia, sin haber sido tocado.



La resonancia no es un privilegio de los cuerpos sólidos, pues los gases contenidos en un cuerpo hueco se comportan de igual manera. Por ejemplo, al soplar la boca de una botella vacía se produce un sonido, no muy musical, pero de frecuencia bien definida.

La resonancia desempeña un papel destacado en la función del oído. Podemos considerar que el oído posee unas 20.000 cuerdas, cada una con su propia frecuencia natural. Las vibraciones de estas cuerdas excitan el nervio auditivo y producen la sensación de oír.



Si se enfrentan las cavidades de dos guitarras bien afinadas se podrá constatar visual y auditivamente que al hacer vibrar una cuerda

cualquiera en una de ellas, en la otra empezará a vibrar la misma cuerda. Este es un ejemplo de lo que se denomina resonancia, y quienes interpretan música en conjuntos instrumentales lo deben haber observado muchas veces. Lo interesante desde el punto de vista de la física, es que cada objeto posee una frecuencia natural de vibración. Ahora, si un objeto vibra y cerca de él hay otro que posee la misma frecuencia natural, también empezará a vibrar.

Es muy posible que esta sea la explicación de varios hechos popularmente conocidos: cantantes



es de ópera capaces de romper copas de cristal, la caída de puentes cuando soldados marchan sobre ellos, edificios que se desmoronan en terremotos y la caída del famoso puente colgante de Tacoma Narrows en Estados Unidos en 1940.



La fotografía del puente Tacoma Narrows (Washington, 1940), a los cuatro meses quedó destruido a causa de rachas de viento de 68 Km/h, repetitivas y continuadas que produjeron un efecto amplificador en la oscilación de la estructura del puente (vibración). Del puente Tacoma, pasando por el edificio Empire Estate, estamos hablando de efectos de resonancia de ondas mecánicas, que son las del sonido. (Hoy en día, cualquier obra de ingeniería, tiene en consideración los efectos de estas ondas y vibraciones).

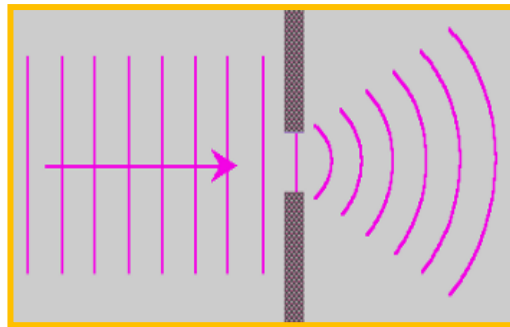
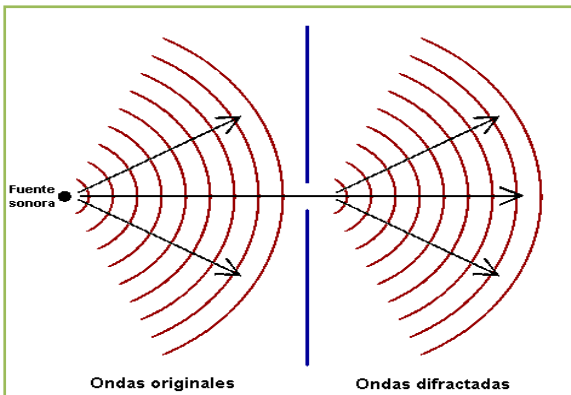
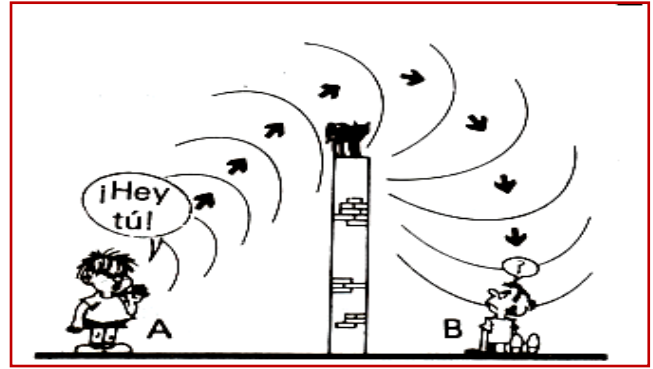
Es importante señalar que es usual que las personas confundan la resonancia con la vibración forzada, no hay que confundir el fenómeno de la resonancia con el de las vibraciones forzadas. Cuando un cuerpo vibra por resonancia, lo hace con su propia frecuencia natural de vibración. Sin embargo, existen situaciones en que un cuerpo vibra debido a la acción de un sonido muy potente, como ocurre cuando los vidrios de nuestras ventanas vibran al poner la música con mucho "volumen". En este caso decimos que se trata de una vibración forzada, ya que los vidrios vibran no con su frecuencia natural, sino que son forzados a vibrar con la frecuencia del sonido que al ser tan potente termina "golpeando" la ventana. Lo mismo ocurre cuando una fuente vibra en contacto con un cuerpo; forzándolo a vibrar con una frecuencia que no es la natural del cuerpo. Por ejemplo, cuando un celular vibra sobre la mesa forzando al mueble a hacerlo.

## DIFRACCIÓN DEL SONIDO

Si se considera una onda sonora la cual se propaga en una dirección determinada, si el sonido encuentra un obstáculo en su camino es posible que él rodee el obstáculo, es decir, parte de la onda sonora se curve, por ejemplo en la figura muestra un sonido el cual rodea un muro.

Si la onda sonora encuentra un orificio, como podría ser una puerta o una ventana abierta, la onda pasara por el orificio propagándose en todas las direcciones.

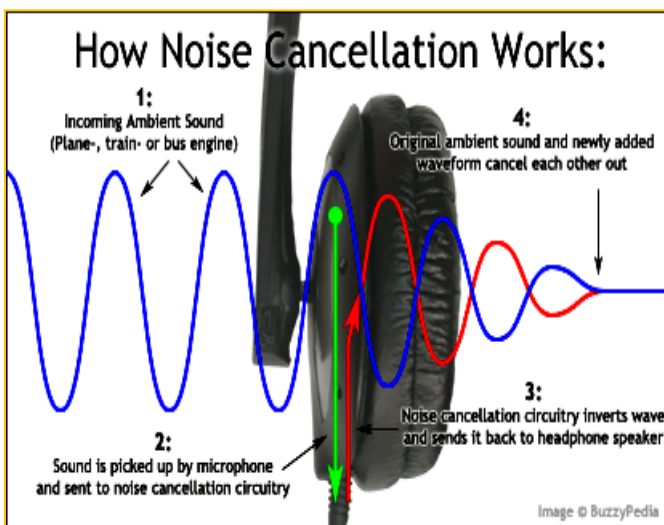
En las figuras se muestra un frente de onda que se propaga en una dirección y luego de encontrar un obstáculo con un orificio, el frente continúa su propagación cambiando su dirección de viaje.



## INTERFERENCIA DEL SONIDO

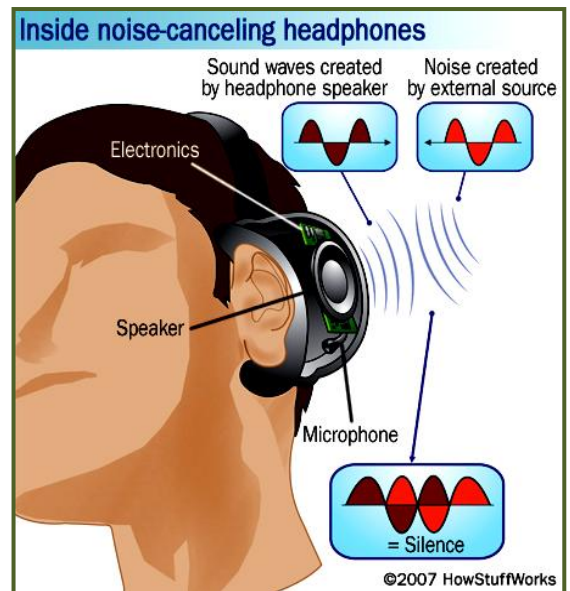
En algunas ocasiones cuando asistimos a una reunión se generan en ellas conversaciones "cruzadas", es decir, en un mismo espacio se generan sonidos múltiples producto de las conversaciones de las personas, en tal caso, decimos que existen más de una vibración en un mismo espacio, en algunas ocasiones estas ondas llegan simultáneamente a nuestros oídos generando en él una imposibilidad en la determinación del sonido y de la fuente, por lo tanto, en ese instante no se entiende ninguna conversación.

Diremos que cuando dos o más ondas sonoras se propagan en un mismo medio y pasan por el mismo punto al mismo tiempo se genera una superposición o interferencia, la cual puede ser constructiva o destructiva. Si dos ondas sonoras se interfieren constructivamente, significa que la intensidad del sonido aumenta puesto que la onda resultante es equivalente a la suma de a las amplitudes de cada una de las ondas que la origina, en cambio si la interferencia es destructiva y total significa que no existe



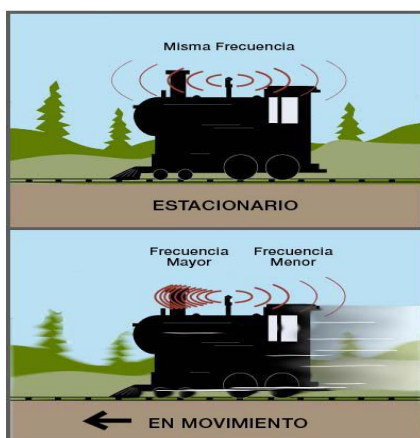
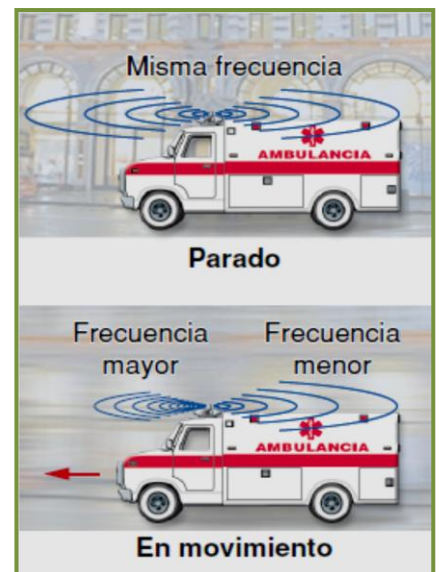
sonido. Una aplicación de la interferencia destructiva corresponde a los audífonos de cancelación de ruido los cuales son utilizados por los pilotos y los operadores de martillos hidráulicos.

Los audífonos con cancelación de ruido, por lo menos los auténticos, reducen el ruido ambiente mediante un control activo del ruido (ANC, Active Noise Cancellation en inglés). Lo que hace el ANC, es tomar el ruido captado del ambiente utilizando un micrófono puesto cerca del oído (en la práctica integrado en los fonos), y mediante un circuito electrónico se produce una onda de sonido de polaridad opuesta, lo que cancela la onda original.



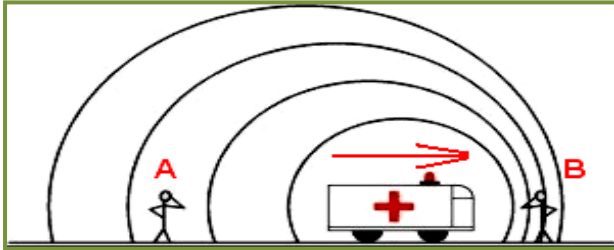
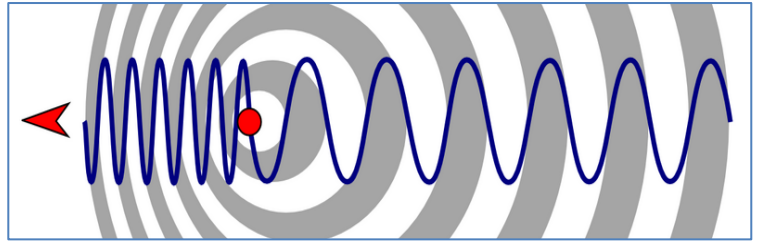
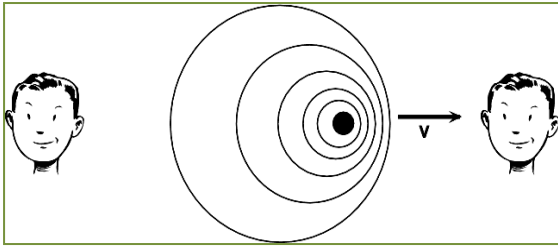
**EFFECTO DOPPLER**

El efecto Doppler fue desarrollado por Christian Doppler en 1842. Casi todos nosotros estamos familiarizados de alguna manera con el efecto Doppler por las experiencias de nuestra vida cotidiana. Cuando una ambulancia o un tren o un avión se acerca a nosotros a gran velocidad produciendo un ruido con una frecuencia audible ya sea con su sirena o con el ruido de sus motores, escuchamos el sonido con cierto tono distintivo. Pero en cuanto la ambulancia o el tren o el avión se empiezan a alejar de nosotros, el tono del sonido se vuelve distintivamente más grave. Doppler determinó que las ondas de sonido tendrían una frecuencia más alta si la fuente del sonido se movía en dirección al receptor y una frecuencia más baja si la fuente del sonido se alejaba del receptor.



Un ejemplo típico de esto es el tren. Cuando un tren se acerca, el sonido del silbato tiene un tono más alto que lo normal. Puede oír como el tono cambia mientras el tren pasa. Lo mismo ocurre con las sirenas de los autos de policía, ambulancias y con los motores de autos de carrera. Una manera de visualizar el efecto Doppler es pensar en las ondas como pulsaciones que se emiten a intervalos regulares. Imagina que caminas hacia adelante. Cada vez que das un paso, emites una pulsación. Cada pulsación frente a tí estará un paso más cercano, mientras que cada pulsación detrás de ti estará un paso más alejada.

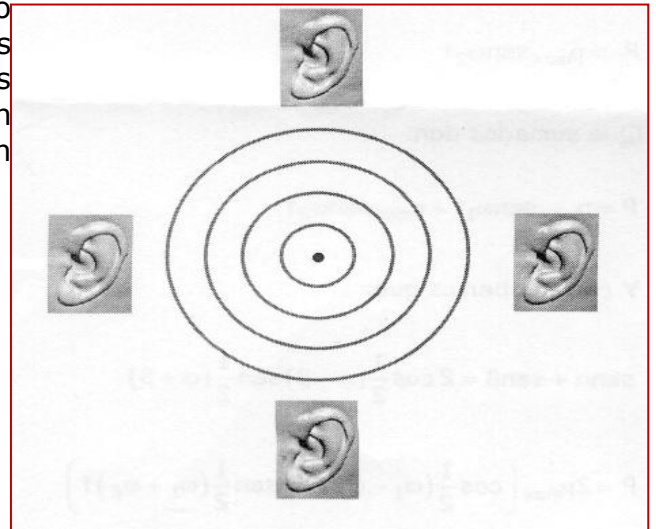
Las pulsaciones frente a ti son de mayor frecuencia y las pulsaciones detrás de ti tienen menor frecuencia.



El efecto Doppler no solo se aplica a los sonidos. Funciona con otro tipo de ondas. Esto incluye a la luz. Edwin Hubble usó el efecto Doppler para determinar que el universo se está expandiendo. Hubble encontró que la luz de galaxias distantes está corrida hacia frecuencias más elevadas, hacia el rojo final del espectro. A esto se le conoce como el desplazamiento Doppler, o cómo desplazamiento al rojo. Si las galaxias se estuviesen acercando, la luz se desplazara al azul. Los radares Doppler ayudan a los meteorólogos a detectar posibles tornados.

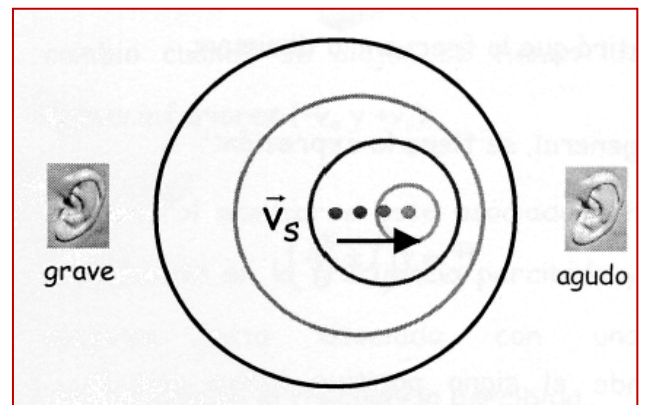
**Análisis de percepción de frecuencias emitidas por una fuente emisora de sonido:**

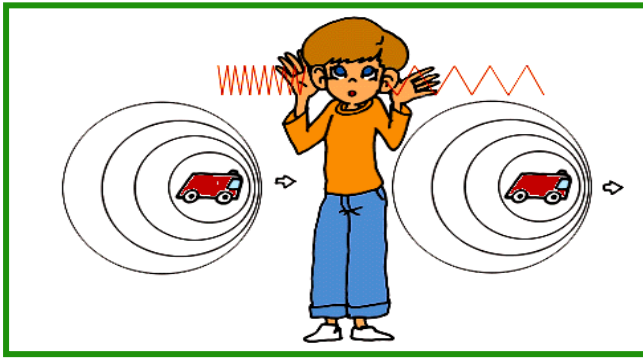
- **Fuente y observador en reposo:** Cuando un emisor de sonido está en reposo entonces los frentes de onda se propagan formando esferas concéntricas, con el emisor en el centro. Un observador en reposo sentirá el sonido con frecuencia constante.



- **Fuente moviéndose y observador en reposo:**

Cuando el emisor se está moviendo acercándose al observador (oído), entonces los frentes de onda se irán aproximando unos a otros generando un cambio en la frecuencia (aumentando). Esto ocurre ya que las ondas aparentan comenzar a juntarse al mismo tiempo que el coche se dirige hacia una dirección. En el diagrama la fuente emisora está acercándose hacia la derecha. Al ocurrir tal cosa, la velocidad de la fuente se suma (clásicamente) a la velocidad con la cual se trasladan las ondas sonoras en el aire, dando como resultado que para el receptor a la





cual se le está acercando la fuente a gran velocidad llegará una cantidad mayor de ondas sonoras que las que escucharía alguien en la fuente emisora en un mismo intervalo de tiempo.

En cambio si se está alejando del observador los frentes de onda se irán espaciando, sintiéndose una disminución de la frecuencia. Es decir para el receptor del cual se está alejando la fuente emisora, escuchará el sonido algo

más grave, más bajo en frecuencia, con una frecuencia menor a la emitida por la fuente emisora.

**Es decir, en este ejemplo, hacia la derecha aumentaría la frecuencia aparente percibida por el oyente y hacia la izquierda disminuiría. En el caso de la longitud de onda ocurre lo inverso.**

### **CÁLCULO DE FRECUENCIAS CON EFECTO DOPPLER, CONSIDERANDO LA RAPIDEZ DE LA FUENTE EMISORA, DEL SONIDO Y RECEPTOR**

El efecto Doppler son las variaciones aparentes en la frecuencia de una onda cualquiera (sonora, luminosa), causadas por el movimiento ya sea de la fuente emisora, ya sea del receptor de la onda sonora o de ambos. Ahora se va a considerar la rapidez de todos los entes involucrados.

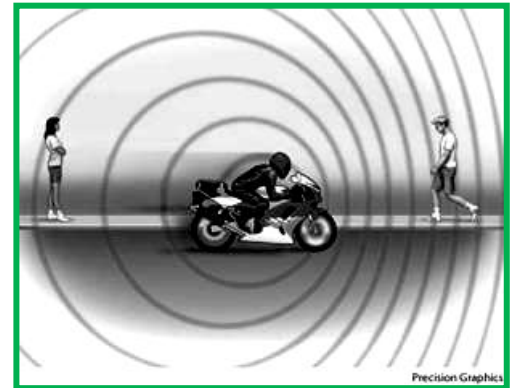
Supóngase una moto emitiendo un sonido, es decir que actúa como una fuente sonora, con una frecuencia de 200 Hz, dicho sonido viaja por el espacio hacia todas direcciones a una velocidad de 340 metros por segundo. A su vez, la moto lleva una velocidad propia, de 80 km por hora (22 m/s)

¿Qué sucede con los receptores respecto a la frecuencia con que perciben el sonido de la moto?

Todo depende de las velocidades de los involucrados.

La chica de la izquierda está en reposo, respecto al suelo, el sonido debería llegar a la velocidad de 340 m/s, pero resulta que el emisor del sonido (la moto) se aleja de ella a 22 m/s, por lo tanto, a ella le llega el sonido solo a 318 m/s ( $340 - 22$ ), por lo tanto percibirá un sonido de menor frecuencia respecto a la frecuencia de la frecuencia inicial (ondas más largas, tono menos agudo).

El muchacho de la derecha camina, supongamos a 3 m/s, hacia la moto. Respecto a este muchacho, el sonido viaja hacia él a 340 m/s, más los 22 m/s de la moto y más los 3 m/s de su caminar hacia la moto; por lo tanto, percibirá un sonido de mayor frecuencia que la inicial de la fuente emisora, ondas más cortas, tono más agudo).





La siguiente fórmula general permite hallar la frecuencia que percibirá el receptor u observador:

$$f_o = f_f \frac{V_s \pm V_o}{V_s \mp V_f}$$

Donde:

$f_o$  = frecuencia que percibe el observador (también se usa como  $f_r$  o frecuencia de la señal recibida)

$f_f$  = frecuencia real que emite la fuente (también se usa como  $f_e$  o frecuencia de la señal emitida)

$v_s$  = velocidad del sonido (340 m/s)

$v_o$  = velocidad del observador (también se usa como  $v_r$  o velocidad del receptor)

$v_f$  = velocidad de la fuente (también se usa como  $v_e$  o velocidad del emisor)

Debemos fijar la atención en los signos + (más) y - (menos) de la ecuación. Notemos que en el numerador aparece como  $\pm$  (más menos) y en el denominador aparece invertido (menos más). Esta ubicación de signos es muy importante ya que usar uno u otro depende de si el observador se acerca o se aleja de la fuente emisora de sonido.

Importante:

Si el observador se acerca a la fuente emisora, el signo en el numerador será + (más) y simultáneamente el signo en el denominador será - (menos).

Ahora, si el observador se aleja de la fuente emisora, el signo en el numerador será - (menos) y simultáneamente el signo del denominador será + (más).

Ejemplo N° 1:

Una radio emite un sonido con frecuencia de 440 Hz, un receptor camina hacia la fuente emisora (la radio) con velocidad de 20 m/s. ¿Con qué frecuencia recibe el sonido el receptor?

Datos obtenidos:

$f_o = x$  (desconocida), frecuencia aparente que percibe el observador

$f_f = 440$  Hz: frecuencia real que emite la fuente

$v_s = 340$  m/s: velocidad del sonido

$v_o = 20$  m/s: velocidad del observador (con signo + ya que se acerca a la fuente)

$v_f = 0$ : velocidad de la fuente (fuente en reposo)

Al usar fórmula y sustituir datos:

$$f_o = f_f \frac{V_s \pm V_o}{V_s \mp V_f} \qquad f_o = 440 \frac{340 + 20}{340 - 0}$$

$$f_o = 466 \text{ Hz}$$

Nótese que la velocidad de la fuente (la radio) es 0 (cero) pues se encuentra en un lugar fijo, no tiene movimiento. Por lo tanto el receptor percibe el sonido con una frecuencia aparente de 466 Hz, mayor a la de la fuente emisora.

Ejemplo N° 2:

La sirena de la ambulancia emite un sonido cuya frecuencia es 200 Hz. La ambulancia viaja a 80 m/s, alejándose del receptor. El receptor se aleja de la ambulancia a velocidad de 5 m/s.

¿Con qué frecuencia aparente percibe el sonido el receptor?

Datos obtenidos:

$$f_o = x$$

$$f_f = 200 \text{ Hz}$$

$$v_s = 340 \text{ m/s}$$

$$v_o = -5 \text{ m/s: velocidad del observador (con signo - ya que se acerca a la fuente)}$$

$$v_f = 80 \text{ m/s}$$

Al usar fórmula y sustituir datos:

$$f_o = f_f \frac{v_s \pm v_o}{v_s \mp v_f}$$
$$f_o = 200 \frac{340 - 5}{340 + 80}$$
$$f_o = 160 \text{ Hz}$$

El receptor percibe el sonido con una frecuencia aparente de 160 Hz.

## APLICANDO LO APRENDIDO



### I.- PROBLEMAS DE SELECCIÓN MÚLTIPLE

1.- La(s) característica(s) fundamental(es) del sonido es (son) que:

- I) Transporta energía.
  - II) Transporta materia.
  - III) No necesita medio de propagación.
- Es (son) correcta(s)

- A) Sólo I
- B) Sólo II
- C) Sólo III
- D) Sólo I y II
- E) Sólo I y III

2.- El sonido es

- A) una onda longitudinal electromagnética.
- B) una onda transversal.
- C) una onda mecánica longitudinal.
- D) una onda electromagnética.
- E) una onda mecánica transversal.

3.- La velocidad de propagación del sonido depende de

- A) su frecuencia.
- B) su longitud de onda.
- C) el medio de propagación.
- D) amplitud.
- E) su energía.

4.- De las siguientes afirmaciones:

I) El efecto Doppler se refiere al cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido, cuando hay movimiento relativo de la fuente y del que escucha.

II) Sonido audible es el que corresponde a las ondas sonoras en un intervalo de frecuencias de 20 a 20.000 Hz.

III) Las ondas sonoras que tienen frecuencias por debajo del intervalo audible se llaman ultrasónicas.

Es (son) verdadera(s)

A) Sólo I

B) Sólo II

C) Sólo III

D) Sólo I y II

E) Todas ellas

5.- En un cuerpo o sistema de cuerpos se produce resonancia cuando

A) vibra con su frecuencia propia.

B) la frecuencia de la fuerza excitante es igual a la frecuencia natural del cuerpo o del sistema.

C) vibra con oscilaciones forzadas.

D) la longitud de la onda excede la longitud del cuerpo.

E) la frecuencia se mantiene constante.

6.- La intensidad de un sonido está relacionada con

A) la frecuencia.

B) el período.

C) la fase.

D) la amplitud.

E) los armónicos.

7.- El tono de un sonido está relacionado con

A) la frecuencia.

B) la diferencia de fase.

C) la fase inicial.

D) la amplitud.

E) los armónicos.

8.- Si aumentamos la frecuencia con que vibra una fuente de sonido en un medio homogéneo

A) el período aumenta.

B) la velocidad disminuye.

C) el período no se altera.

D) la velocidad aumenta.

E) la longitud de onda disminuye.

9.- Los sonidos se propagan en el aire con velocidad

A) mayor cuando más agudos.

B) mayor cuanto más graves.

C) igual para cualquier frecuencia.

D) mayor en la zona audible.

E) menor en la zona audible.

- 10.- Cuando una onda sonora alcanza una región en que la temperatura del aire es diferente, cambia su
- A) frecuencia.
  - B) timbre.
  - C) altura.
  - D) longitud de onda.
  - E) Ninguna de las anteriores.
- 11.- ¿Cuáles de las características de las ondas sonoras determinan, respectivamente las sensaciones de altura y de intensidad del sonido?
- A) frecuencia y amplitud.
  - B) frecuencia y longitud de onda.
  - C) longitud de onda y frecuencia.
  - D) amplitud y longitud de onda.
  - E) amplitud y frecuencia.
- 12.- En relación a las ondas sonoras, la afirmación más correcta es
- A) cuanto más grave el sonido, mayor será su frecuencia.
  - B) cuanto más agudo el sonido, mayor será su amplitud.
  - C) el timbre del sonido está relacionado con su velocidad de propagación.
  - D) podemos distinguir dos sonidos del mismo tono y de la misma intensidad emitidos por dos personas si ellas tienen timbres diferentes.
  - E) la intensidad de un sonido queda caracterizada por su frecuencia.
- 13.- Dos personas conversan a través de una gruesa pared de 3 metros de altura interpuesta entre ellos. Este hecho puede ser mejor explicado por el fenómeno de
- A) difracción.
  - B) refracción.
  - C) reflexión.
  - D) polarización.
  - E) Ninguna de las anteriores
- 14.- Un cantante logra quebrar una copa de cristal al emitir determinado sonido. Esto se puede explicar por
- A) el efecto de un sonido de muy alta frecuencia.
  - B) el efecto de un sonido de gran amplitud.
  - C) resonancia.
  - D) interferencia constructiva.
  - E) interferencia destructiva.
- 15.- Ordene en forma decreciente la rapidez del sonido, en los siguientes medios  
I. Acero. II. Agua. III. Aire.
- A) I – II – III
  - B) II – III – I
  - C) III – II – I
  - D) I – III – II
  - E) III – I – II

16.- Una radioemisora transmite en la "banda" de 30 [m] en el aire, donde su rapidez es 300 [m/s]. ¿Con qué frecuencia transmite?

- A) 10 [Hz]
- B) 10 [kHz]
- C) 10 [MHz]
- D) 10 [Ghz]
- E) 10 [THz]

## II. DESARROLLAR

1.- Caracterice el sonido indicando:

- Qué tipo de onda es:

- Cuáles son los rangos de frecuencia audibles para el ser humano.

- Indique a lo menos tres fenómenos asociados al sonido

2.- Un astronauta se encuentra solo en la superficie de la Luna, en ese instante su compañero le informa que una nave espacial esta alunizando en las vecindades: ¿Por qué no escucha la llegada de la nave?

¿Puede escuchar cuando se le golpea el casco?

3.- Una onda sonora se propaga en el aire con una rapidez de 340 m/s. El "La" normal tiene una frecuencia de 440 Hz.

¿Cuál es el periodo de oscilación cuando se genera esta nota musical?

Calcule la longitud de onda para esta nota musical.

4.- Un niño está frente a un acantilado, emite un sonido el cual se refleja. Si en ir y volver el sonido se demora 0,8 s y la rapidez de propagación del sonido es de 340 m/s, ¿a qué distancia se encuentra el fondo del acantilado?

5.- La rapidez del sonido en el agua es de 1498 m/s. Se envía una señal de sonar desde un barco a un punto que se encuentra debajo de la superficie del agua. 1,8 s más tarde se detecta la señal reflejada. ¿Qué profundidad tiene el océano por debajo de donde se encuentra el barco?

6.- En un frío día de invierno, a una temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$ , Sara, mamá de Tatiana, se asoma a la puerta de la casa y la llama diciéndole que ya es hora de almorzar. Si Tatiana está, exactamente, a 50 m de donde está su mamá, ¿cuánto tarda el sonido de la voz de Sara en llegar a los oídos de Tatiana?

7.- Durante una tempestad una persona observa un relámpago (luz), después de 12 s escucha el ruido del trueno. ¿A qué distancia se produjo la descarga eléctrica que provocó el relámpago y escuchó el trueno?

8.- Un murciélago puede detectar pequeños objetos, como por ejemplo insectos, cuyo tamaño es aproximadamente igual a la longitud de onda del sonido que emite el murciélago. Si él emite un chillido de 60 KHz de frecuencia y se propaga con una rapidez de 340 m/s, ¿qué tamaño mínimo deberá tener el insecto para que el murciélago lo detecte?

9.- Una flauta emite un sonido agudo, en cambio la tuba emite un sonido grave. ¿Cuál de estos instrumentos produce el sonido de menor longitud de onda?

10.- Un sonido es emitido en el aire, mientras viaja ingresa al agua. Indique que pasa con el tono y la longitud de onda de este sonido cuando cambia de medio.

11.- Un entrenador de delfines está ubicado a una distancia de 50 m de un estanque de agua, cuya profundidad es de 30 m. Si él emite un sonido en el aire, ¿cuánto tarda en ser escuchado por el delfín, el cual se encuentra en el fondo del estanque?

12.- Indique la diferencia que existe entre los conceptos de tono y timbre en un sonido.

13.- Un carro de bombero se desplaza por una calle haciendo sonar su sirena; perpendicular a la calle por la cual viaja se encuentra una persona. ¿Qué fenómeno le permite a la persona escuchar el sonido de la sirena? Explique.

14.- En un escenario simultáneamente es emitida la misma nota por un violín y por un clarinete. Un espectador que se encuentra al medio del teatro, percibe la llegada de los sonidos simultáneamente. ¿Qué característica del sonido le permite al espectador diferenciar un sonido del otro?

15.- A qué rapidez se propaga un sonido en el aire a 1 (atm) de presión cuando la temperatura es de 0°C y 12°C.

16.- Una persona desde su embarcación envía una señal hacia la profundidad del mar; 1,5 segundos más tarde se escucha el eco de la onda reflejada en el suelo marino directamente debajo. ¿Cuál es la profundidad del mar en ese punto?

17.- Se ha comprobado que cierto pájaro tropical vuela en cuevas totalmente oscuras. Para sortear los obstáculos utiliza el sonido, pero la frecuencia más elevada que puede emitir y detectar es de 8000Hz. Evaluar el tamaño de los objetos más pequeños que puede detectar.

18.- El oído humano es sensible a frecuencias sonoras dentro del margen comprendido entre 20 y 20.000 Hz. ¿Cuáles son las longitudes de onda en el aire y en el agua de dichas frecuencias?

19.- Si una persona está situada a más de 17 m de un acantilado grita fuertemente ¿recibirá el eco de su voz?

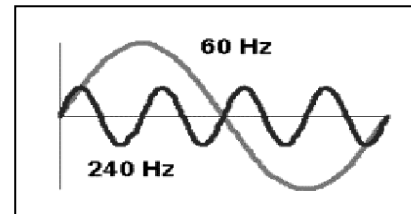
20.- Cuánto tiempo tardará en oírse el eco de un ruido si el foco emisor está a 645 m. Velocidad del sonido 340 m/s.

21.- El sonar de un barco registra el eco de la onda emitida hacia el fondo 5 s después. Calcular la profundidad del mar en ese punto. Vs. agua = 1480 m/s.

22.- Un cohete de fuegos artificiales explota a 1 km de altura sobre nosotros. Calcula qué tiempo tardaremos en oír el sonido de la explosión (Velocidad del sonido = 340 m/s).

23.- Si las dos ondas fueran sonoras:  
a) ¿Cuál corresponde al sonido más agudo?

b) ¿Cuál corresponde al sonido más intenso?



24.- ¿Qué es el eco?

25.- Para medir la distancia a una muralla se palmotean las manos una vez, observando que el eco ocurre luego de 0,7 segundos. ¿Cuál es entonces la distancia? Dato: velocidad del sonido en el aire = 340 m/s

26.- Para bajar la afinación de una cuerda de guitarra, ¿se debe soltar o apretar la clavija que la sujeta? Justifique su respuesta.

27.- El trombón es un instrumento musical de bronce formado por un tubo hueco cuya longitud puede variarse en forma continua a voluntad. Al aumentar esa longitud, el sonido ¿se hace más agudo o más ronco?



- 28.- ¿Por qué los parlantes para sonidos agudos son en general más pequeños que los para sonidos graves?
- 29.- Antiguamente se acostumbraba colocar el oído pegado al riel de ferrocarril para saber si se aproximaba un tren. De dos razones que justifiquen este procedimiento.
- 30.- Las señales de radio AM tiene longitudes de onda entre 600 m y los 200 m, mientras que las señales FM las tienen alrededor de los 3m. Explique por qué las señales AM se pueden oír usualmente detrás de las colinas y no las de FM.
- 31.- ¿Por qué algunos animales, como el murciélago, teniendo oídos mucho más pequeños y livianos pueden escuchar sonidos con frecuencias más altas que los humanos?
- 32.- Si pone un oído bajo el agua en una tina, usted puede escuchar sonidos de otras partes de la casa o del edificio donde vive. ¿Por qué esto es cierto?
- 33.- Cuando un timbre se coloca dentro de una campana conectada a una bomba de vacío y se remueve el aire, no se escucha sonido alguno. Explique.
- 34.- Cuando se cronometra una carrera de 100 m, los jueces tiene la instrucción de accionar sus cronómetros cuando vean el humo proveniente del disparo de partida y no cuando escuchen el sonido. Explique. ¿Qué pasaría con los tiempos cronometrados si se tomaron cuando se oye el disparo?
- 35.- ¿El efecto Doppler se presenta para todo tipo de ondas, o sólo para algunas de ellas?

36.- ¿Qué propiedad diferencia la nota tocada en una trompeta y en un clarinete si ambas tienen el mismo tono y volumen?

37.- La velocidad del sonido se incrementa cuando la temperatura se incrementa. Para un sonido dado, cuando la temperatura se incrementa, ¿qué sucede con:

a) la frecuencia?

b) la longitud de onda?

38.- Suponga que todas las bocinas de los autos emitieran sonidos con la misma frecuencia. ¿Cómo sería la frecuencia de la bocina de un auto cuando se mueve:

a) aproximándose hacia usted?

b) alejándose de usted.

39.- Si el tono de un sonido se incrementa, ¿cuáles son los cambios en:

a) la frecuencia?

b) la longitud de onda?

c) la amplitud de la onda?

40.- Considera los conceptos siguientes:

**A) Sonido B) Tono C) Timbre D) Intensidad E) Efecto Doppler F) Elasticidad**

Determina a que concepto se refiere cada descripción:

\_\_\_\_\_ Es una propiedad del medio por donde se propaga el sonido. Si el medio carece de esta, el sonido no se transmite.

\_\_\_\_\_ Característica que permite diferenciar dos o más sonidos de igual altura e intensidad emitidos por fuentes sonoras distintas.

\_\_\_\_\_ Característica que permite distinguir cuando un sonido es más agudo o más grave que otro. Depende principalmente de la frecuencia de la onda sonora.

\_\_\_\_\_ Es una onda mecánica longitudinal que se produce por la vibración de un medio elástico que puede ser sólido, líquido o gaseoso y se transmite por variaciones de presión del medio.

\_\_\_\_\_ Cuando un sonido en movimiento se percibe con distinta frecuencia a la de la fuente emisora dependiendo de si el sonido se acerca o se aleja del receptor.

\_\_\_\_\_ Característica que permite distinguir cuando un sonido es fuerte o débil. Depende fundamentalmente de la amplitud de la onda.

41.- ¿Qué se percibe primero en una tormenta eléctrica, el rayo o el trueno? Explica por qué.

42.- ¿A qué se debe que el sonido viaje más rápido en los sólidos que en los gases?

43.- Si una señal sonora viaja por el fondo del mar (1500 m/s) con una longitud de onda de 0,05 m, entonces ¿la señal es: infra sónica, ultrasónica o un sonido dentro del rango audible?

44.- Determinar la velocidad del sonido para las siguientes temperaturas:

a) 25° C

b) - 10° C

c) 12° C

d) - 4° C

45.- Un sonido cuya frecuencia es 780 Hz se desplaza por aire (20° C) y luego por una barra de cobre.

a) ¿Qué fenómeno se produce cuando el sonido cambia de medio de propagación?

b) ¿Qué sucede con la frecuencia de la onda sonora al pasar del aire al cobre?

c) ¿Determina la longitud de onda del sonido en el aire y en el cobre?

46.- En una línea férrea se están realizando trabajos y se observa que un obrero golpea el metal produciendo un sonido que viaja a través del hierro. Si la distancia que recorre el sonido es 740 m.

a) ¿Cuánto demora el sonido que viaja por el aire (15° C), en llegar al observador?

b) ¿Cuánto demora el sonido que viaja por el hierro en llegar al observador?

47.- Se tienen tres sonidos:  $S_1$  de 25 dB,  $S_2$  de 10 dB y  $S_3$  de 75 dB.

a. ¿Podemos asegurar que el sonido  $S_3$  es el más agudo?, ¿por qué?

b. ¿Cuál de ellos suena más fuerte?

c. ¿A cuál de ellos le corresponde una mayor amplitud de onda?

48.- Se tienen tres sonidos diferentes de los anteriores:  $S_1$  de 28000 Hz,  $S_2$  de 15 Hz y  $S_3$  de 1570 Hz

a) ¿Podemos asegurar que el sonido  $S_2$  es el más débil?, ¿por qué?

b) ¿Cuál (es) no podemos oír?

c) ¿Cuál es infrasonido?

d) ¿Cuál es el más agudo?

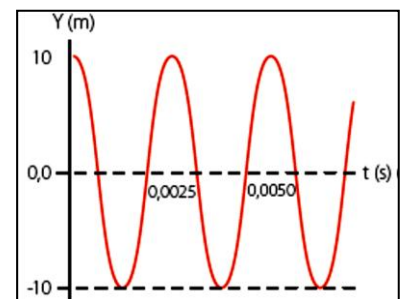
49.- El sonido que emite un diapasón, es representado por un osciloscopio en el perfil de onda que se representa a continuación. Si se sabe que la rapidez de propagación del sonido en el aire es de 340 m/s, determinar:

a) el periodo.

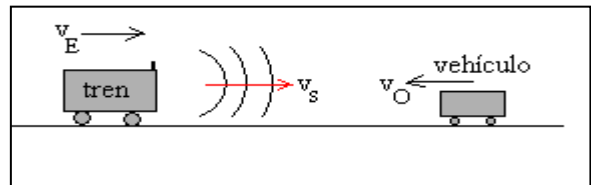
b) la frecuencia.

c) la amplitud.

d) la longitud de onda.



50.- Un silbato emite sonido de frecuencia 500 Hz se mueve con una máquina de tren a velocidad de 25 m/s. Un conductor se mueve en la misma dirección pero en sentido contrario en un vehículo con una velocidad de 40 m/s acercándose al tren. Calcular la frecuencia del sonido escuchado por el conductor.



51.- Una ambulancia viaja al este por una carretera con velocidad 34 m/s, su sirena emite sonido con una frecuencia de 400 Hz. Qué frecuencia escucha una persona en un auto que viaja al oeste con velocidad 24 m/s

a) cuando el auto se acerca a la ambulancia

b) cuando el auto se aleja de la ambulancia

52.- Un conductor viaja al norte con velocidad 25 m/s. Un auto policial que viaja al sur con velocidad 40 m/s, se acerca con su sirena emitiendo a una frecuencia de 2500 Hz.

a) ¿Qué frecuencia observa el conductor cuando se acerca el auto policial?

b) ¿Qué frecuencia observa el conductor cuando se aleja el auto policial?

53.- Un murciélago que persigue una mosca emite ultrasonidos a una frecuencia de 55 kHz. El murciélago se mueve a 13 m/s y la mosca a 2,4 m/s, ambos en la misma recta y no hay viento apreciable. Calcular en estas condiciones:

a) Frecuencia con la que llegan las ondas a la mosca.

b) Frecuencia que detectará el murciélago para el sonido reflejado en la mosca.

54. ¿Cuál es el nivel de sensación sonora en decibelios correspondiente a una onda de intensidad  $10^{-10}$  W/m<sup>2</sup>? ¿Y de intensidad  $10^{-2}$  W/m<sup>2</sup>? (Intensidad umbral  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>).

55. ¿En cuántos decibelios aumenta el nivel de sensación sonora si se duplica la intensidad de un sonido?

56. Supongamos que al gritar una persona la intensidad del sonido es 500 veces mayor que cuando habla. ¿Cuál es la diferencia en el nivel de sensación sonora en dB?

57. La intensidad debida a un número de fuentes de sonido independientes es la suma de las intensidades individuales. ¿Cuántos decibelios es mayor el nivel de intensidad sonora cuando lloran cuatro niños que cuando llora uno?

58. Una ventana con una superficie de 1,5 m<sup>2</sup> está abierta a una calle cuyo ruido produce un nivel de intensidad de 65 dB. ¿Qué potencia acústica entra por la ventana?

59. Si nos acercamos al foco sonoro a la mitad de la distancia original. ¿Cómo varía la intensidad de sonido?

60. La intensidad del sonido de una persona hablando en voz baja es 100 veces mayor que la intensidad umbral. Calcular el nivel de intensidad o sonoridad.