



I Unidad: “Fundamentos del Sonido”

¿Qué es el Sonido?

El **sonido** es una perturbación que se propaga (en forma de onda sonora) a través de un medio elástico (sólidos, líquidos o gases) produciendo variaciones de presión o vibración de partículas, que pueden ser percibidas bien por el oído humano o bien por instrumentos específicos para tal fin.

Los elementos indispensables para que exista el sonido son:

- 1.- Fuente sonora
- 2.- Camino de transmisión
- 3.- Receptor

Paradoja del árbol caído

¿Hace ruido un árbol al caer si nadie lo escucha?

En este caso, debemos dejar claro que el sonido es un fenómeno, lo cuál quiere decir que es una percepción nuestra válida para quien lo experimenta. No obstante, existe una expansión de onda, que en este caso no es escuchada. El sonido existe en la medida en que nosotros lo percibimos, dado que es un proceso de transformación de "ondas sonoras" (ondas mecánicas) a "impulsos eléctricos". Si ese proceso (fuente-medio-receptor) no se presenta, no hay sonido (realidad acústica).

El oído

El oído es un conjunto de órganos cuya función principal son dotar de **equilibrio y audición** al cuerpo de los humanos o animales. El oído se divide en tres secciones: **oído externo, oído medio y oído interno**.



Oído Externo

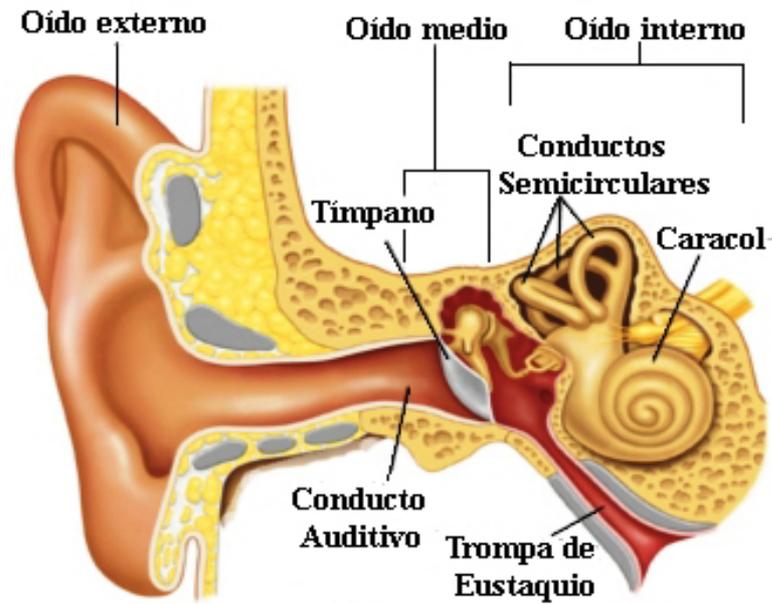
Está formado por el pabellón de la oreja o aurícula y el conducto auditivo externo. Las partes más externas del oído son el pabellón auditivo y el conducto auditivo, que está encerrado y atrapa la suciedad. Este canal transmite los cambios de presión de aire y las ondas sonoras al tímpano, o membrana timpánica. El pabellón de la oreja es la parte visible, un repliegue formado casi completamente por cartílago (tejido blando) , cubierto por piel y adherido al cráneo, con forma de embudo, que envía las ondas sonoras hacia el conducto auditivo. Este, de unos 2,5 centímetros de longitud, tiene en su entrada pelos cortos y gruesos; en su interior, glándulas sebáceas (grasa o cerumen), y al final, una tensa membrana llamada tímpano , donde llegan las ondas, haciéndola vibrar.

Oído Medio

En el tímpano comienza el oído medio, que también incluye la trompa de Eustaquio y los tres pequeños huesos vibrantes del oído: martillo, yunque y estribo.

Oído Interno

El oído interno es un laberinto de conductos enredados que contienen fluido y que están relacionados con el sentido del oído y con el equilibrio. Hay tres canales dentro de una estructura con forma de caracol llamada cóclea. Las vibraciones sonoras, amplificadas por los huesos del oído medio, viajan por estos canales y mueven pequeños pelos que estimulan fibras conectadas a su vez con el nervio auditivo. Los sonidos procedentes del exterior, se codifican de esta forma para viajar al cerebro. La parte posterior del oído interno alberga los canales semicirculares. Estos canales, conectados entre sí por una estructura llamada vestíbulo, son sensibles a la gravedad, a la aceleración y a la postura y movimientos de la cabeza.





Escucha binaural

Los sonidos se reciben independientemente por cada oído y crean efectos diferentes en distintas partes del cerebro.

La información que recibe cada oído se procesa en el cerebro comparando los impulsos nerviosos que produce cada sonido.

Diferencia de

distancia: a un oído el sonido llega más tarde que al otro y con otra fase.

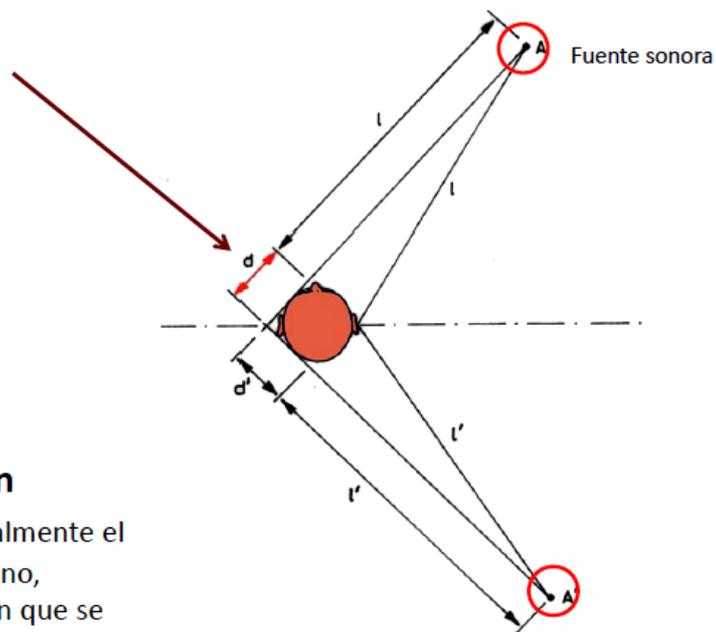
La cabeza como

filtro: a un oído el sonido llega con distinto espectro de frecuencias que al otro y con diferente intensidad.

La forma

asimétrica del pabellón

auditivo modifica sustancialmente el sonido antes de llegar al tímpano, dependiendo de la dirección en que se acerquen.



¿Qué es el Ruido?

El **ruido** en cambio, es frecuentemente definido como cualquier sonido molesto que puede producir efectos fisiológicos y psicológicos no deseados en una persona o grupo.



Definición de ruido acústico

No existe una definición inequívoca de ruido. De forma amplia, podemos definir como ruido cualquier sonido no deseado que puede interferir la recepción de un sonido. Así, el ruido acústico es aquel ruido (entendido como sonido molesto) producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes. La mezcla se produce a diferentes niveles ya que se conjugan tanto las frecuencias fundamentales como los armónicos que las acompañan. La representación gráfica de este ruido es la de una onda sin forma (la sinusoide ha desaparecido).

Clasificación del Ruido

Se pueden hacer dos clasificaciones diferentes de ruido acústico, las mismas se podrían hacer con cualquier otro ruido:

1. En función de la intensidad en conjunto con el periodo.
2. En función de la frecuencia.

Tipos de Ruidos según la intensidad y el Periodo

Ruido fluctuante

El ruido fluctuante es aquel ruido cuya intensidad fluctúa (varia) a lo largo del tiempo. Las fluctuaciones pueden ser periódicas o aleatorias.

Ruido impulsivo

El ruido impulsivo es aquel ruido cuya intensidad aumenta bruscamente durante un impulso. La duración de este impulso es breve, en comparación con el tiempo que transcurre entre un impulso y otro. Suele ser bastante más molesto que el ruido continuo.



Tipos de Ruidos según frecuencia

Existen fuentes de ruido artificiales o generadores de ruido que emiten ruido blanco o rosa. Estos generadores de ruido son utilizados en acústica para realizar ciertas mediciones como aislamiento acústico, insonorización, reverberación, etc.

Ruido Blanco

El ruido blanco, denominado así por asociación con la luz blanca, se caracteriza por su distribución uniforme en el espectro audible (20 Hz a de 20 kHz). Es decir, es un ruido cuya respuesta en frecuencia es plana, lo que significa que su intensidad (amplitud de sonido) es constante para todas las frecuencias.

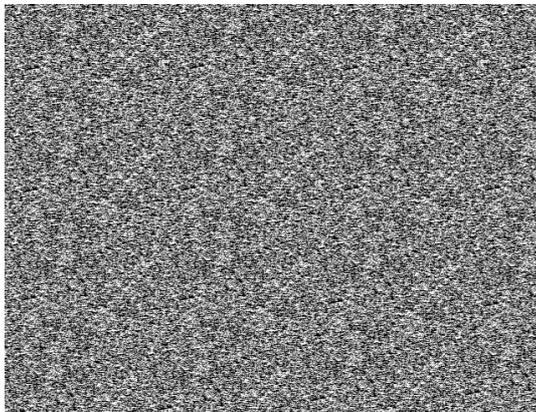
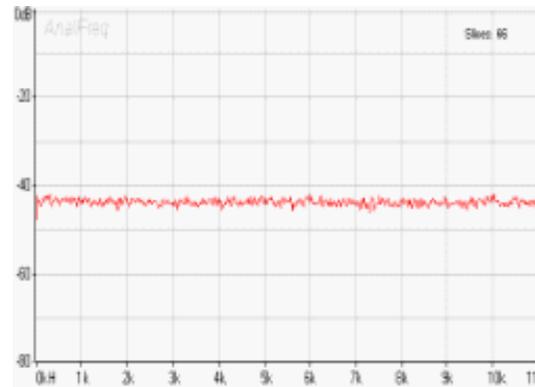


Imagen en Blanco y Negro de Ruido Blanco

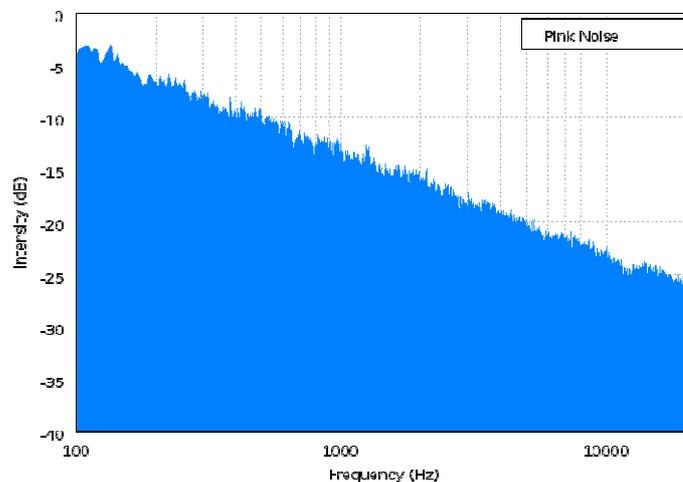


Ejemplo de forma de onda de un ruido blanco



Ruido rosa

La respuesta en frecuencia del ruido rosa no es plana, su intensidad decae 3 decibelios por octava. El ruido rosa que emiten los generadores de ruido se utiliza con filtros de 1/3 de banda de octava para medir la acústica de salas. Se elige 1/3 de octava para el filtro porque es a partir de ahí cuando el oído es capaz de detectar irregularidades en la respuesta en frecuencia).



Ejemplo de forma de onda de un ruido rosa

Cualidades Del Sonido

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.



Propiedades generales

Las cuatro cualidades básicas del sonido son la altura, la duración, el timbre y la sonoridad, fuerza o intensidad.

Cualidad	Característica	Rango
Altura	Frecuencia de onda	Agudo, medio, grave
Sonoridad	Amplitud de onda	Fuerte, débil o suave
Timbre	Armónicos	Fuente emisora del sonido
Duración	tiempo de vibración	Largo o corto

La Altura

Indica si el sonido es grave, agudo o medio, y viene determinada por la frecuencia fundamental de las ondas sonoras, medida en ciclos por segundo o hercios (Hz).

- vibración lenta = baja frecuencia = sonido grave.
- vibración rápida = alta frecuencia = sonido agudo.

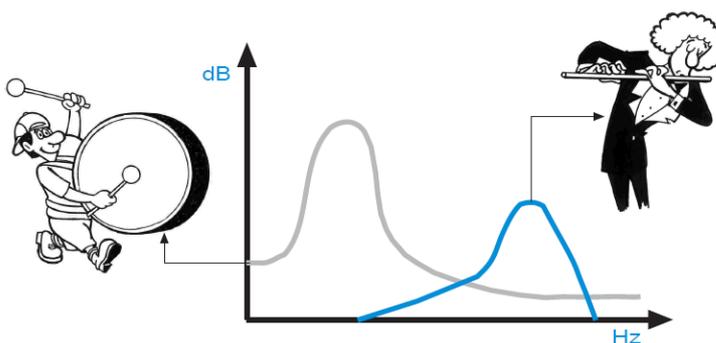
Para que los humanos podamos percibir un sonido, éste debe estar comprendido entre el rango de audición de 20 y 20.000 Hz. Por debajo de este rango tenemos los infrasonidos y por encima los ultrasonidos. A esto se le denomina rango de frecuencia audible. Cuanta más edad se tiene, este rango va reduciéndose tanto en graves como en agudos.



La sonoridad

Es la cantidad de energía acústica que contiene un sonido, es decir, lo fuerte o suave de un sonido. La sonoridad viene determinada por la potencia, que a su vez está determinada por la amplitud y nos permite distinguir si el sonido es fuerte o débil. Los sonidos que percibimos deben superar el umbral auditivo (0 dB) y no llegar al umbral de dolor (140 dB). Esta cualidad la medimos con el sonómetro y los resultados se expresan en decibelios (dB) en honor al científico e inventor Alexander Graham Bell.

SITUACION	INTENSIDAD
Umbral de dolor	140 dB
Avión despegando	130 dB
concierto	110 dB
discoteca	100 dB
Trafico vehicular	90 dB
conversación	50 dB
Ruido del campo	10 dB
Umbral de audición	0dB

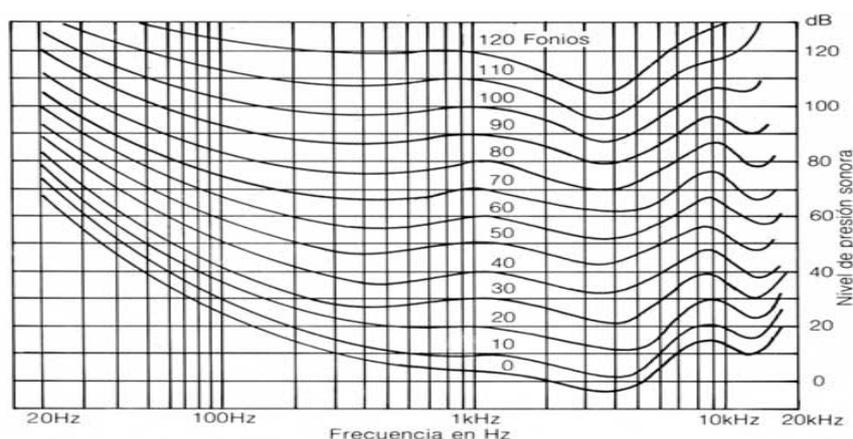


Espectros de los Sonidos generados por un Bombo y una Flauta.
Comparativamente se dice que el Espectro del Bombo es de baja Frecuencia y mayor intensidad, en cambio la Flauta es de alta frecuencia y menor intensidad.



Curvas Isofónicas

Las curvas isofónicas son curvas de igual sonoridad. Estas curvas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad (en decibeles) de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de fuertes, con lo que todos los puntos sobre una misma curva isofónica tienen la misma sonoridad. Así, si 0 isofon corresponden a una sonoridad con una intensidad de 0 dB con una frecuencia de 1 kHz, también una sonoridad de 0 isofon podría corresponder a una sonoridad con una intensidad de 60 dB con una frecuencia de 70 Hz. Las primeras curvas de igual sonoridad fueron establecidas por Fletcher y Munson en 1930.



Curvas Isofónicas

En estas curvas isofónicas se observa cómo, a medida que aumenta la intensidad sonora, las curvas se hacen, cada vez, más planas. Esto se traduce en que la dependencia de la frecuencia es menor a medida que aumenta el nivel de presión sonora, lo que significa que si disminuye la intensidad sonora los últimos sonidos perceptibles en desaparecer serían los agudos (altas frecuencias).

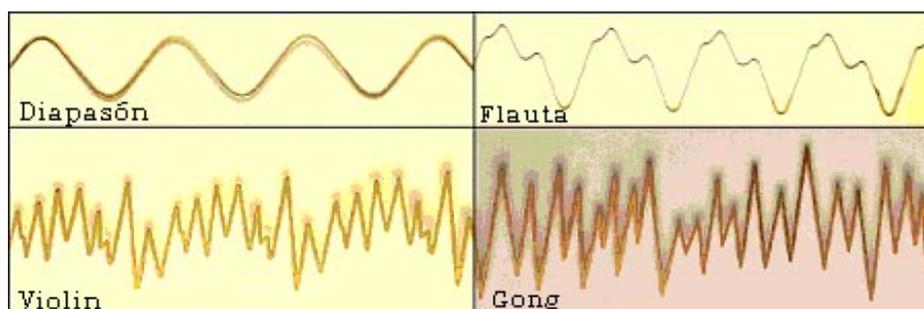


El Timbre

Es la cualidad que confiere al sonido los armónicos que acompañan a la frecuencia fundamental. La voz propia de cada instrumento que distingue entre los sonidos y los ruidos.

Esta cualidad es la que permite distinguir dos sonidos, por ejemplo, entre la misma nota (tono) con igual intensidad producida por dos instrumentos musicales distintos. Se define como la calidad del sonido.

Cada cuerpo sonoro vibra de una forma distinta. Una misma nota suena distinta si la toca una flauta, un violín, una trompeta, etc. Cada instrumento tiene un timbre que lo identifica o lo diferencia de los demás. También influye en la variación del timbre la calidad del material que se utilice.



La duración

Es el tiempo durante el cual se mantiene un sonido. Podemos escuchar sonidos largos, cortos, muy cortos, etc. Los únicos instrumentos acústicos que pueden mantener los sonidos el tiempo que quieran, son los de cuerda con arco, como el violín, y los de viento (utilizando la respiración circular o continua); pero por lo general, los de viento dependen de la capacidad pulmonar, y los de cuerda según el cambio del arco producido por el ejecutante.

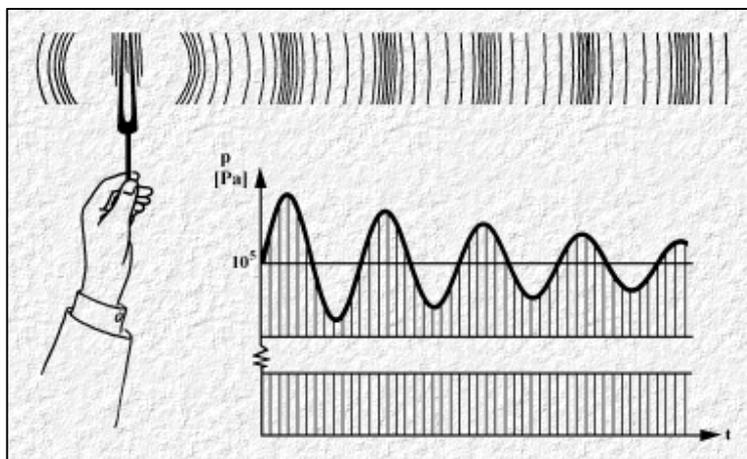


Ondas Sonoras

Las fuentes sonoras que emiten sonidos agradables o molestos se comportan básicamente como un diapasón. Un diapasón es un instrumento con forma similar a un tenedor, que al ser golpeado genera un sonido de referencia que permite afinar instrumentos musicales.

Cuando se golpea, las puntas vibran de un lado a otro empujando al aire que lo rodea una y otra vez. Ese movimiento causará fluctuaciones en la presión circundante por sobre y por debajo de la presión atmosférica.

Esas fluctuaciones son conocidas como compresiones (zonas en las que aumenta la presión) y enrarecimientos o rarefacciones (zonas en las que se reduce la presión). De esta forma el disturbio se propaga en todas direcciones empujando las partículas de aire, en un efecto dominó. Ese disturbio que se propaga por el aire es lo que nosotros escuchamos cuando éste alcanza nuestros oídos.



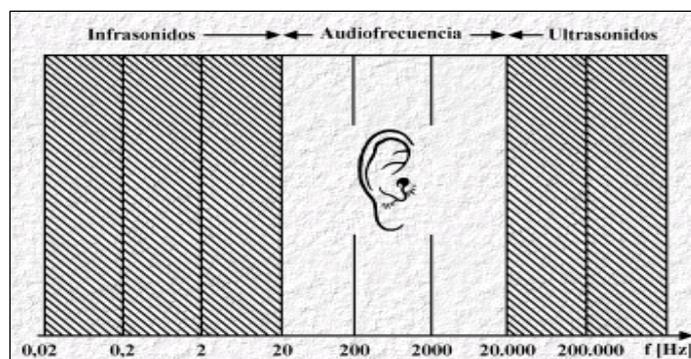


Frecuencia (f)

Dependiendo de qué tan rápido sean los movimientos del cuerpo que vibra, las fluctuaciones en el aire que llegan a los oídos se percibirán como sonidos agudos (cuando los movimientos son muy rápidos) o como sonidos graves (cuando los movimientos son muy lentos). Como conclusión podríamos decir que si pudiéramos contar la cantidad de veces que la fuente sonora empuja el aire en un solo segundo, encontraríamos que los sonidos agudos empujan al aire más veces que los sonidos graves. A esa cantidad de veces que el cuerpo empuja al aire en un segundo la llamaremos **frecuencia**, y la mediremos en ciclos por segundo [1/s] o su equivalente Hertz (abreviado Hz).

Ejemplo: *El diapasón tiene una frecuencia de 440 Hz, o sea que los extremos del diapasón alcanzan a empujar el aire a su alrededor 440 veces en cada segundo que transcurre.*

Cuando la cantidad de vibraciones por segundo está entre 20 Hz y 20.000 Hz, nuestros oídos perciben estas perturbaciones como sonidos audibles o audio frecuencias (AF), (ver figura). Esto no significa que las ondas de frecuencias mayores o menores a este rango no existan o no estén presentes, de hecho ellas también producen efectos sobre el ser humano a pesar de no ser audibles, por lo tanto muchas veces necesitaremos cuantificar, o medir la energía que aportan al ambiente de trabajo, como en el caso de las calderas, motores, sistemas de ventilación, sistemas de calefacción, etc. A aquellas frecuencias por debajo de 20 Hz las llamaremos Infrasonidos y a las mayores a 20 kHz las llamaremos Ultrasonidos. Si la presión del aire que circunda el oído se mantiene constante, no oímos nada, u "oímos el silencio".





Tonos puros

En general, cuando el movimiento que genera la fuente es constante y siempre con la misma cantidad de ciclos de vibración por segundo, se habla que ese es un sonido puro, o **tono puro**. Entonces el tono puro sería un sonido de una sola frecuencia, y puede ser fácilmente graficada y/o explicada mediante una función matemática de tipo senoidal que se puede utilizar tanto para expresar al sonido como también para sistemas móviles como péndulos o sistemas masa-resorte. Para predecir lo que va sucediendo en cada instante con la presión generada por la fuente utilizaremos:

$$x = A \cdot \text{sen} (\omega \cdot t)$$

donde:

- x : expresa la presión sonora en algún momento t
 A : es el valor máximo de presión que se puede alcanzar en un ciclo dado
 ω : equivale a 2π veces la frecuencia del tono puro
 t : el tiempo que transcurre a medida que la onda se propaga

Existe una relación estrecha entre la frecuencia f y el período T que se explica de la siguiente forma:

- la frecuencia indica **cuantas vibraciones** la fuente es capaz de cumplir en **1 segundo**
- el período indica **cuantos segundos** se demora el disturbio en realizar **1 vibración** completa.



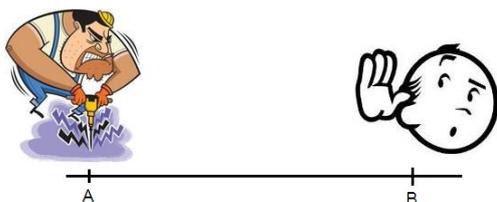
Por lo tanto, podemos decir que el período es inverso a la frecuencia, y utilizar las expresiones:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{o} \quad T = \frac{1}{f}$$

Ahora, al juntar estas fórmulas vemos las equivalencias entre frecuencia angular, frecuencia de la onda y el período:

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

Velocidad del sonido



Si tenemos una fuente y un receptor, como puede ser un martillo neumático y un trabajador ubicado a una distancia dada, ocurrirá que cada vez que el martillo golpee la superficie de trabajo se producirá un disturbio sonoro que viajará desde la punta del martillo, hasta el oído trabajador. Ese disturbio tomará cierta cantidad de tiempo en recorrer esa distancia.

La velocidad que pueda alcanzar el sonido va a depender principalmente de la densidad del medio por el que se propaga (que tan duro o blando es), pero también dependerá del porcentaje de humedad en ese momento, y de la presión atmosférica (metros sobre el nivel del mar). Por lo tanto, *no importará la fuerza ni importará si el ruido posee frecuencias muy agudas o muy graves:*

“TODAS LAS FRECUENCIAS SE PROPAGARÁN CON LA MISMA VELOCIDAD”



Entonces todas las frecuencias de la onda que se propaga llegarán al oído del trabajador al mismo tiempo. En el aire la velocidad del sonido c la podemos calcular como una función de la frecuencia y la longitud de ondas de la onda que se propaga, es decir:

$$c = \lambda \cdot f$$

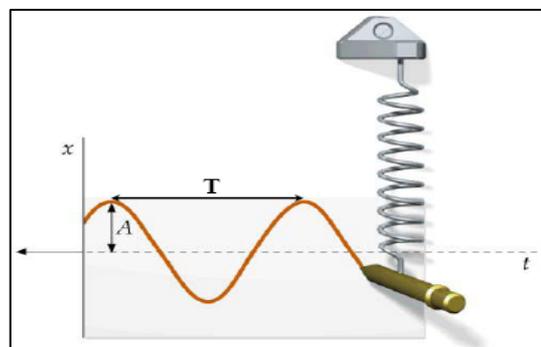
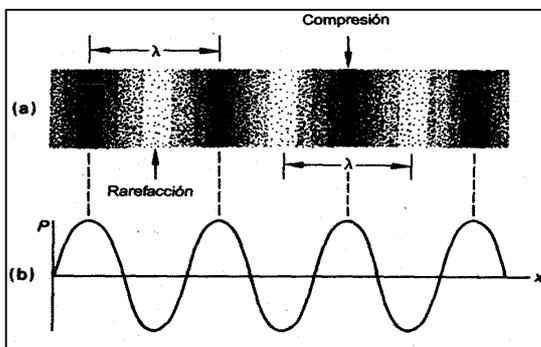
La velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 m/s, lo que equivale a unos 1.200 km/h (1.238,4 km/h, para ser precisos). Es decir que necesita unos 3 s para recorrer 1 km. (Como posible referencia recordemos que la velocidad de la luz es de 300.000 km/s.)

Longitud de onda (λ)

Podemos definir la longitud de onda como la distancia (medida en metros) que recorre una onda en un período de tiempo T . Se refiere a cuanta distancia recorre el disturbio en el ambiente, medida entre dos puntos de máxima presión consecutivos (puntos de compresión) o entre dos puntos de rarefacción. La longitud de onda está relacionada con la frecuencia f (inversa del período T) por medio de la velocidad de propagación del sonido c , de manera que:

$$c = \lambda \cdot f$$

La longitud de onda de las ondas de sonido, en el intervalo que los seres humanos pueden escuchar, oscila entre menos de 2 cm (una pulgada) y aproximadamente 17 metros (56 pies).





Decibel

Decibelio es la unidad relativa empleada en acústica y telecomunicaciones para expresar la relación entre dos magnitudes, acústicas o eléctricas, o entre la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia. El decibelio, cuyo símbolo es dB , es una unidad logarítmica.

Ej 1.: Para el cálculo de la sensación recibida por un oyente, a partir de las unidades físicas medibles de una fuente sonora, se define el nivel de potencia, L_W , en decibelios, y para ello se relaciona la potencia de la fuente del sonido a estudiar con la potencia de otra fuente cuyo sonido esté en el umbral de audición, por la fórmula siguiente:

$$L_W = 10 \times \log_{10} \frac{W_1}{W_0(10^{-12})} (dB)$$

en donde W_1 es la potencia a estudiar, en Watt, W_0 es el valor de referencia cuyo sonido esté en el umbral de audición, igual a 10^{-12} Watt potencia de otra fuente y \log_{10} es el logaritmo en base 10 de la relación entre estas dos potencias. Este valor de referencia se aproxima al umbral de audición en el aire. Podemos observar que un aumento de 10 veces de la potencia W_1 con respecto a la referencia significa un aumento de 10 dB. Y que al aumentar al doble la potencia W_1 con respecto a W_0 significa un aumento de 3 dB.

Ej 2: Las ondas de sonido producen un aumento de presión en el aire, luego otra manera de medir físicamente el sonido es en unidades de presión (pascuales). Y puede definirse el *Nivel de presión*, L_P , que también se mide en decibelios.

$$L_P = 20 \times \log_{10} \frac{P_1}{P_0} (dB)$$



en donde P_1 es la presión del sonido a estudiar, y P_0 es el valor de referencia, que para sonido en el aire es igual a 2×10^{-5} Pa. Este valor de referencia se aproxima al umbral de audición en el aire.

Situación	Número de veces más intenso que I_0	Intensidad en dB
Límite del oído humano	1	0
Sonido de la respiración	10	10
Susurro	100	20
Conversación en voz alta	100.000	50
Calle ocupada	10.000.000	70
Trueno	10.000.000.000	100
Avión de reacción en el despegue	100.000.000.000.000	140
Lanzamiento cohete espacial	10.000.000.000.000.000.000	190

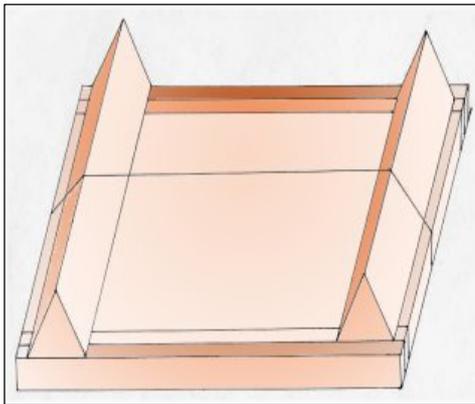


Acústica Musical

Construcción de Intervalo y escalas Musicales

El origen de la escala musical

La escala actual (escala occidental) es el resultado de un largo proceso de aprendizaje de las notas. Los pitagóricos construyeron un aparato llamado monocordio que se componía de una tabla, una cuerda tensa y una tabla más pequeña que se iba moviendo por la grande.



Monocordio

Los pitagóricos observaron que haciendo más o menos larga la cuerda (moviendo la tabla móvil) se producían sonidos diferentes. Entre estos sonidos escogieron algunos que eran armoniosos con el sonido original (cuerda entera).

Los más importantes, por su simplicidad y su importancia a la hora de construir la escala musical, son:



- *La octava.* Cuando la cuerda medía un medio del total, el sonido se repetía, pero más agudo. La octava es lo que correspondería a un salto de ocho teclas blancas del piano; o mejor dicho, una octava es la repetición de un sonido con una cuerda con la mitad de largura, por tanto, otra nota armoniosa. Su frecuencia es doble.
- *La quinta* es otro intervalo entre notas que se obtiene con una cuerda de largura dos tercios de la inicial. Su frecuencia es de tres medios del sonido inicial. Corresponde a un salto de cinco teclas blancas en un piano.
- *La cuarta* es, como las anteriores, otro intervalo entre notas que se obtiene con una cuerda de largura tres cuartos de la inicial. Su frecuencia es cuatro tercios de la nota inicial.

Así, a partir de un sonido original obtenemos diferentes notas armoniosas. Haciendo un pequeño esquema nos aclararemos más:

<i>Nota</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Long. cuerda</i>
Original	F	L
Octava	$2f$	$1/2 \cdot L$
Quinta	$3/2 \cdot f$	$2/3 \cdot L$
Cuarta	$4/3 \cdot f$	$3/4 \cdot L$

Si suponemos que la nota inicial es el do, entonces la octava, quinta y cuarta son las notas:

Nota base	Cuarta	Quinta	Octava
Do	Fa	Sol	Do (1 octava más alta)



que corresponden a la cuarta, quinta y octava notas respectivamente de la escala diatónica (las teclas blancas del piano). Todas estas relaciones entre las notas se denominan intervalos.

La construcción de la escala musical

Pero, ¿cómo se pueden encontrar las notas de nuestra escala musical a partir de una nota base (tónica)? Vamos a hacer un proceso repetitivo a partir de esta nota, utilizando las quintas y las octavas. Lo que queremos hacer es encontrar notas armoniosas con la nota base que se encuentren entre la nota original y su octava. Supondremos que la nota original tiene una frecuencia f . Entonces, la octava tendrá frecuencia $2f$. Queremos encontrar notas que tengan frecuencia entre f y $2f$. La primera que tenemos es la quinta, la frecuencia es $3/2 \cdot f$. Corresponde a una cuerda de longitud $2/3$ la inicial. El siguiente paso es encontrar la quinta de la quinta. La frecuencia será $3/2 \cdot 3/2 \cdot f = 9/4 \cdot f$. El problema es que esa nota tiene una frecuencia más grande que $2f$. Lo que hacemos es encontrar una nota una octava más abajo. Es decir, una nota con frecuencia $9/8 \cdot f$.

Si vamos repitiendo el proceso obtenemos las notas siguientes:

- f
- $3/2 \cdot f$
- $9/8 \cdot f$. Después de haber descendido una octava.
- $3/2 \cdot 9/8 \cdot f = 27/16 \cdot f$
- $3/2 \cdot 27/16 \cdot f = 81/32 \cdot f$. Como la frecuencia es más grande que $2f$, descendemos una octava y obtenemos $81/64 \cdot f$
- $3/2 \cdot 81/64 \cdot f = 243/128 \cdot f$

Hemos obtenido 7 notas, contando la octava, que podemos ordenar de frecuencia más pequeña a más grande de la forma siguiente:



	Frecuencia	Razón nota anterior	
Tónica	f		Do
Segunda	$9/8 \cdot f$	$9/8=1,125$	Re
Tercera	$81/64 \cdot f$	$9/8=1,125$	Mi
Cuarta	$4/3 \cdot f$	$256/243=1,053$	Fa
Quinta	$3/2 \cdot f$	$9/8=1,125$	Sol
Sexta	$27/16 \cdot f$	$9/8=1,125$	La
Séptima	$243/128 \cdot f$	$9/8=1,125$	Si
Octava	$2f$	$256/243=1,053$	Do

En la columna de la derecha hemos puesto el nombre de la nota que correspondería si la nota base fuese el do. Esta es la escala que llamamos diatónica. Consta de 7 notas, la octava es la misma que la anterior una octava más alta. Se corresponden a las teclas blancas del piano. Podemos ver que hay dos razones diferentes: el tono $9/8$ y el semitono $256/243$. La pregunta que nos hacemos es qué relación hay entre las dos razones. Se puede ver que dos semitonos hacen casi un tono $(256/243)^2 = 1,109$, pero no es exactamente el mismo, esto se llama "Coma Pitagórico". Si ahora descendemos por quintas desde el 4to grado (Fa), comenzarían a salir las "teclas negras" del piano, es decir, los sostenidos y los bemoles. Cuando la escala queda completa con 12 notas (las teclas negras y las blancas), esto es lo que se llama la escala cromática.

Nota	Relación de Frecuencias
<i>Reb</i>	$256/243$
<i>Mib</i>	$32/27$
<i>Solb</i>	$1024/729$
<i>Lab</i>	$128/81$
<i>Sib</i>	$16/9$



Algunos Inconvenientes:

- Inevitablemente se encuentra la “Coma Pitagórica”
- Incompatibilidad entre los intervalos de 5ta y 8va.
- Relación con las 3eras Mayores.

Escala Natural o de Aristogenes

Así como la Escala Pitagórica calcula todos sus intervalos exclusivamente mediante encadenamientos de quintas, la diatónica tiene una organización más compleja.

Respeto los intervalos de 5ta y 4ta, pero los valores de 3era, 6ta, y 7ma, los calcula como terceras puras a partir del 1er, 4to y 5to grado respectivamente.

Nota	Relación de Frecuencias
Do	1
Re	9/8
Mi	5/4
Fa	4/3
Sol	3/2
La	5/3
Si	15/8
Do	2

Más inconvenientes:

- Persiste la “Coma Pitagórica”.
- La configuración de la Escala Cambia si cambio el eje tonal (Ej: cambio de Tonalidad).



Afinación Temperada

Para solucionar todos los inconvenientes anteriores, se creó la escala temperada. La cantidad de notas que tiene es la misma, pero la forma de afinación es diferente. En la escala temperada, la razón entre la frecuencia de una nota y la anterior es siempre constante.

Si llamamos r a esta razón, se cumplirá que las frecuencias formaran una progresión geométrica del tipo:

$$f, f \cdot r, f \cdot r^2, f \cdot r^3, f \cdot r^4, \dots, f \cdot r^{12} = 2 \cdot f$$

de lo que se deduce que $r^{12} = 2$ $r = \sqrt[12]{2} = 1,059\dots$, de donde esta escala resuelve los problemas de afinación, pero no podemos olvidar que las notas más armoniosas eran las que se había encontrado mediante el método geométrico, es decir las de la escala cromática. Instrumentos sin intervalos fijos como violines, contrabajos, etc. pueden utilizar la afinación de la escala cromática.

Nota	Valor de los Intervalos	
Do	$(1,05946)^0$	1
Do#	$(1,05946)^1$	1,05946309
Re	$(1,05946)^2$	1,12246205
Re#	$(1,05946)^3$	1,18920712
Mi	$(1,05946)^4$	1,25992105
Fa	$(1,05946)^5$	1,33483985
Fa#	$(1,05946)^6$	1,41421356
Sol	$(1,05946)^7$	1,49830708
Sol#	$(1,05946)^8$	1,58740105
La	$(1,05946)^9$	1,68179283
La#	$(1,05946)^{10}$	1,78179744
Si	$(1,05946)^{11}$	1,88774863
Do	$(1,05946)^{12}$	2