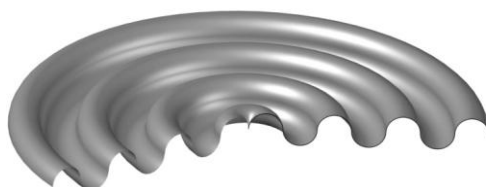


1.1- PROPIEDADES DEL SONIDO

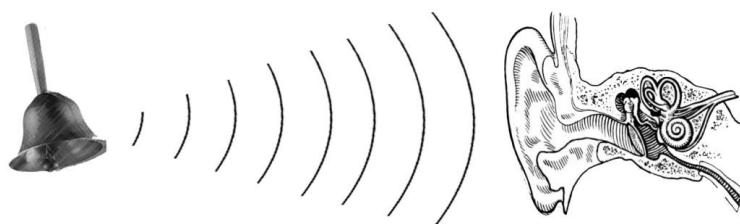
Por definición el **sonido** es un fenómeno físico que se produce cuando un objeto al vibrar provoca la propagación de ondas en un medio sólido, líquido o gaseoso. Es una forma de energía mecánica y como tal responde a las leyes newtonianas del movimiento.

Las ondas del sonido se propagan de manera parecida a las ondas que provoca una piedra al caer en el agua.

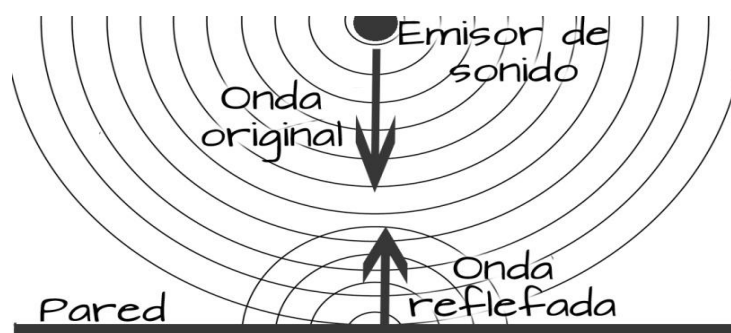


El movimiento pendular de un objeto al vibrar empuja las moléculas que hay a su alrededor. Estas a su vez transmiten el movimiento en cadena a las siguientes moléculas y se genera el movimiento ondulatorio. El sonido implica únicamente transporte de energía, no de materia. No se produce en el vacío pues es necesario un soporte material para su propagación. La velocidad del sonido varía en función del medio en el que se desenvuelve. Es mayor cuando la densidad es más alta por ser menor la distancia entre las moléculas. Adquiere mayor velocidad en el medio sólido que en el líquido y es más lento en el medio gaseoso. En un medio elástico como es el aire la onda de presión que provoca el sonido comprime las moléculas haciendo que estas se aproximen mucho entre sí. Con la descompresión las moléculas se separan para volver a su lugar de origen. La compresibilidad y la densidad de un medio gaseoso varía mucho en función de la presión y la temperatura, de manera que son muchos los factores que influyen en la propagación del sonido.

El **oído** es un complejo órgano diseñado para captar las vibraciones acústicas que se propagan por el aire. Cuando las ondas de sonido alcanzan los tímpanos estos se estimulan con la vibración y el aparato auditivo traduce los movimientos vibratorios en impulsos nerviosos que a continuación serán procesados por el cerebro para su identificación e interpretación.



Al igual que sucede con las ondas de movimiento en el agua, cuando el sonido topa con una pared o con un objeto se produce un rebote de la onda conocido como **reflexión**.



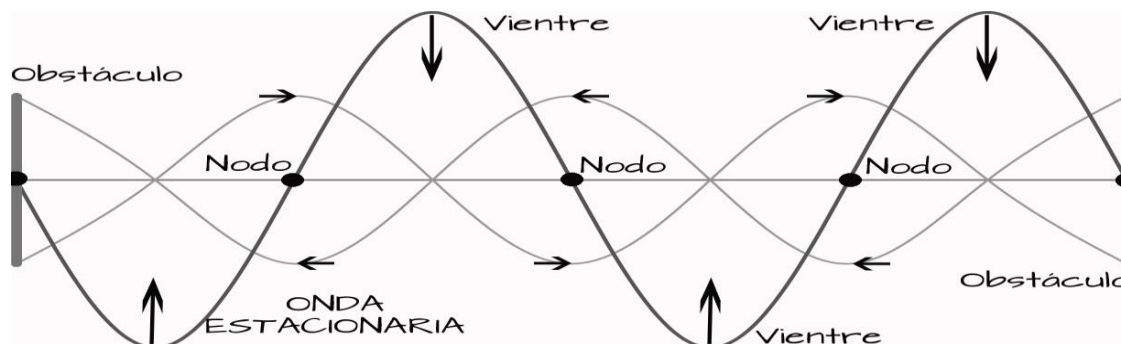
La reflexión depende y varía en función del material de la pared u objeto con el que topa la onda. Cuando el material es absorbente el sonido se amortigua y la onda se desvanece. En este caso el rebote no se produce.

La reflexión explica fenómenos acústicos como la **reverberación, el eco y las ondas estacionarias**.

La **reverberación** consiste en una ligera permanencia del sonido una vez la fuente detiene la emisión. Es la suma total de todas las reflexiones originadas en la sala. Se cuantifica mediante el "tiempo de reverberación" que es el tiempo que transcurre entre que se detiene la emisión y desaparece el sonido.

Cuando la pared donde rebota el sonido se encuentra a una distancia de más de 17 metros se produce el **eco**. El tiempo que transcurre desde que emitimos un sonido hasta que este rebota en un obstáculo lejano y regresa a nuestra posición hace que percibamos la reflexión como una repetición del sonido.

El fenómeno de las **ondas estacionarias** sucede cuando el sonido queda atrapado entre dos o más obstáculos enfrentados. Las repetidas reflexiones que se producen provoca la aparición de ondas estables que viajan constantemente de un obstáculo al otro interfiriendo entre sí en torno a un mismo eje. El resultado de las fuerzas vectoriales que ejercen estas ondas da como resultado las ondas estacionarias, caracterizadas por la anulación del movimiento vibratorio en los puntos fijos denominados nodos y por duplicar el movimiento vibratorio en los puntos denominados vientres o antinodos.

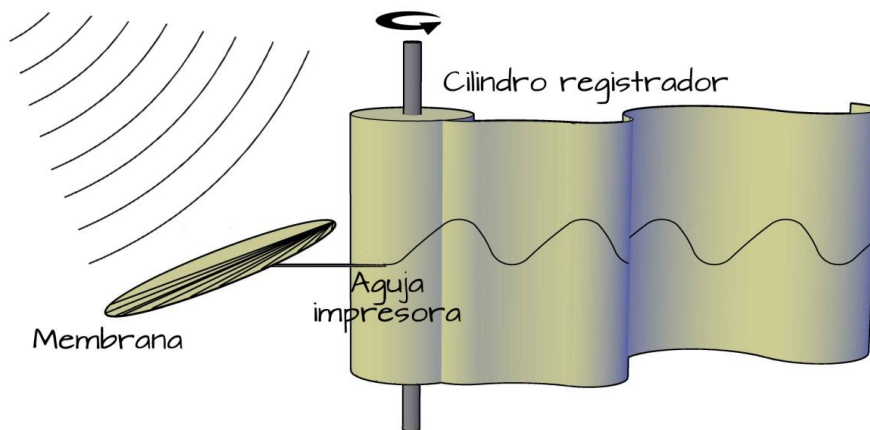


Las ondas estacionarias se generan en los movimientos vibratorios de la cuerda, también en las columnas de aire contenidas en los tubos, en las membranas y en todo tipo de objetos. El movimiento estable de las ondas estacionarias genera sonidos con una oscilación que se repite periódicamente con un ritmo constante. Cuando esto sucede aparecen las notas musicales

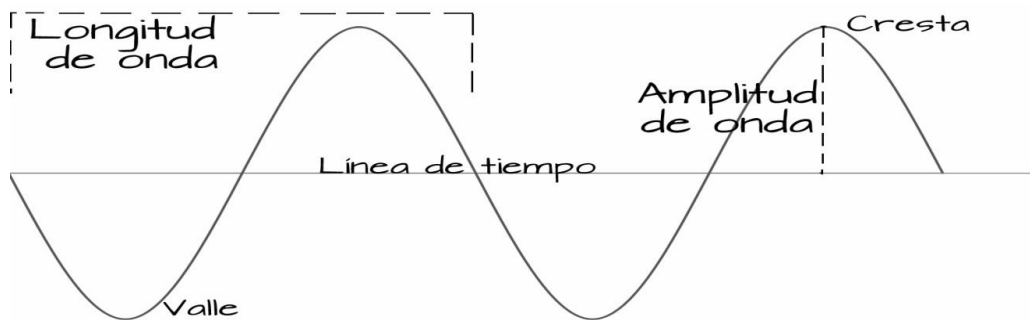
Las ondas estacionarias explican a su vez el fenómeno de la **resonancia acústica**. Cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a una vibración periódica similar a su periodo de vibración, el cuerpo comienza a vibrar por simpatía multiplicando la fuerza original. Por esa razón una cantante soprano es capaz de reventar una copa de cristal al entonar con fuerza la frecuencia de resonancia de la copa.

Para obtener el registro de las ondas de sonido y estudiar su comportamiento se inventó el **fonoautógrafo**. Este aparato patentado en 1857 por el francés Édouard-Leon Scott permite registrar de forma gráfica las ondas del sonido, aunque no será posible después reproducirlas hasta la invención del fonógrafo de Edison dos décadas más tarde.

El fonógrafo consiste básicamente en una membrana que vibra excitada por las ondas del sonido unida a una aguja que imprime el movimiento de la membrana en un cilindro registrador que gira con una velocidad constante.

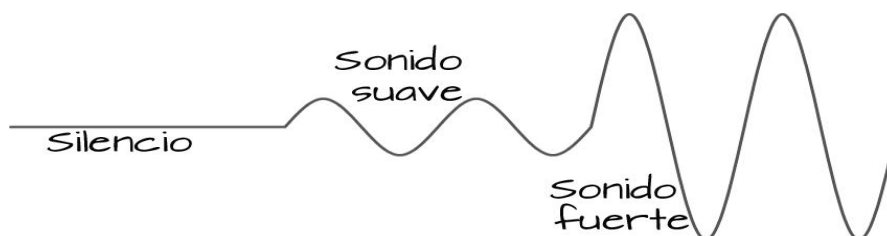


Analizando el registro gráfico de una onda de sonido determinamos cuales son las partes de las que consta.



El eje horizontal en torno al cual se mueve la curva del sonido representa el paso del tiempo. El movimiento constante del cilindro registrador de nuestro fonógrafo hace posible que la aguja impresora unida a la membrana dibuje el movimiento de la onda de sonido en el transcurso del giro.

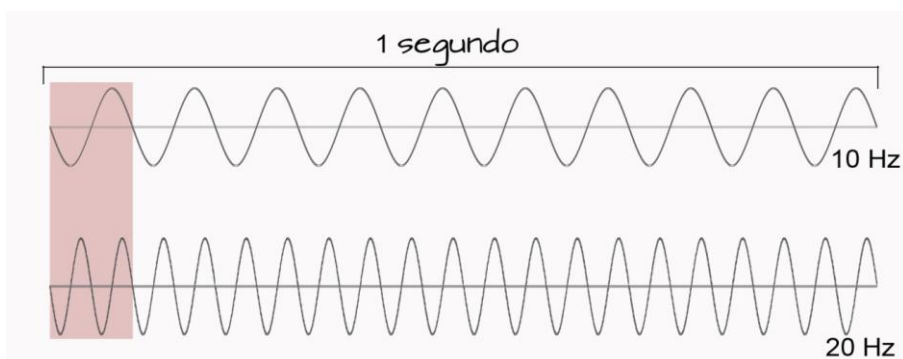
La **amplitud de onda** es la distancia existente entre la cresta o el valle de la onda y el eje. Hace referencia a la fuerza o cantidad de energía que transporta la onda de sonido. Cuanto mayor es la amplitud de onda mayor es el volumen al que suena. En los momentos de silencio al no existir movimiento de la membrana la aguja impresora dibujaría una línea recta sobre la línea de tiempo.



La **longitud de onda** se define como la distancia entre dos puntos que están en el mismo estado de vibración. Se expande a lo largo de la línea de tiempo realizando un movimiento ondulatorio completo hasta volver a la posición de origen. La longitud de onda se repite rítmicamente manteniendo en bucle el mismo patrón.

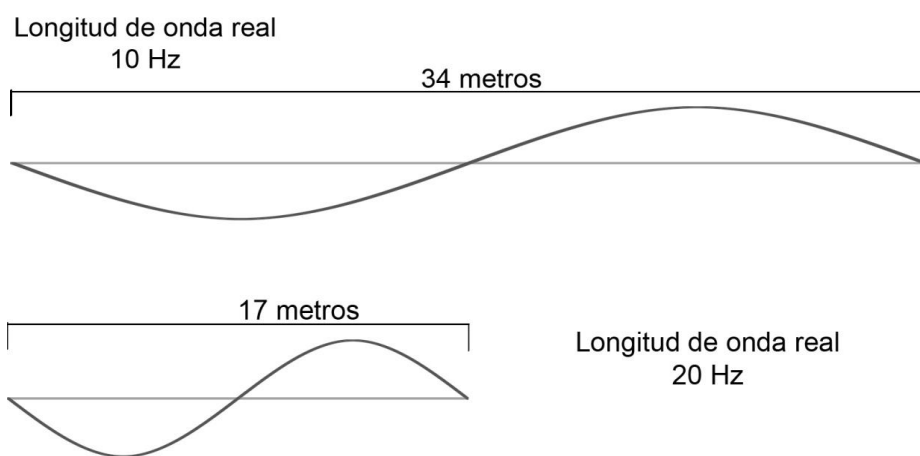
Se denomina **periodo** al tiempo que transcurre hasta que se completa la longitud de onda al completo. El número de ciclos completos que realiza una onda en una determinada unidad de tiempo es la **frecuencia**.

La unidad de medida para medir la frecuencia de una onda es el **Hertzio** (Hz). ¹ Los hertzios miden el número de ciclos que realiza una onda en un segundo.



En el gráfico anterior están representadas las frecuencias 10 y 20 hertzios. En el transcurso de un segundo la onda completa se repite diez veces en el primer caso y veinte veces en el segundo. Para que esto suceda la longitud de onda ha de ser la mitad en el caso de los 20 Hz. Dos periodos de 20 Hz tienen la misma duración que un periodo de 10 Hz.

Es necesario aclarar que la longitud de onda tiene una dimensión espacial real. En el fonógrafo queda representado gráficamente el tiempo que la onda emplea en completar su periodo, pero para calcular la **longitud de onda real** es necesario establecer la relación que existe entre la velocidad de propagación del sonido y el tiempo que la onda ha empleado en realizar un ciclo completo para saber cuánto espacio ha recorrido. Por ejemplo, en el aire con una frecuencia de 10 Hz la "longitud de onda real" mide 34 metros. Si la frecuencia es de 20 Hz la longitud de onda real será justamente la mitad, es decir 17 metros.



El oído humano tiene la capacidad de percibir sonidos comprendidos entre los 20 y los 20.000 Hz. Las frecuencias altas se corresponden con los sonidos agudos, mientras que las frecuencias bajas se corresponden con los graves. Las vibraciones con frecuencias inferiores a los 20 Hz se denominan infrasonidos, mientras que las vibraciones que se sitúan por encima de los 20.000 Hz son ultrasonidos.



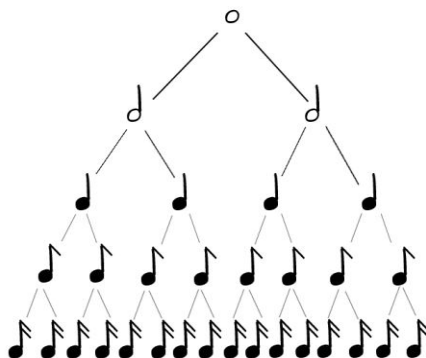
¹ En honor a los estudios ondulatorios del físico Rudolf Hertz.

CUALIDADES BÁSICAS DEL SONIDO

Para describir la naturaleza de un sonido o para establecer una comparativa con otros sonidos manejamos en todo momento conceptos que giran en torno a las cuatro cualidades básicas del sonido. Estas son **duración, intensidad, altura y timbre**.

1. DURACIÓN

La duración hace referencia al tiempo que dura un sonido. En términos musicales utilizamos una comparativa proporcional para establecer la duración de los sonidos con las **figuras rítmicas**.



En una partitura la **duración de los silencios** también se indica con figuras rítmicas con proporciones equivalentes a las anteriores.



2. INTENSIDAD

La intensidad hace referencia al volumen al que suena un sonido. Está relacionada con la **amplitud de onda**. Como vimos anteriormente los sonidos fuertes tienen una amplitud de onda grande mientras que los sonidos suaves tienen amplitud de onda pequeña.

En acústica para comparar el volumen de los sonidos se suele utilizar el **decibelio (dB)** como unidad de medida. Un decibelio es la décima parte de un belio. Recibe este nombre en honor al científico Graham Bell. El decibelio expresa la relación existente entre dos valores. Es una expresión logarítmica relativa, porque indica cuantas veces más suena un sonido con respecto a otro.

Es necesario establecer un valor de referencia en primer lugar, habitualmente el umbral mínimo de percepción humana del sonido (20 micropascales). El valor de referencia se sitúa en los 0 dB. Un sonido con 10 dB es 10 veces más potente que el sonido de referencia, un sonido con 20 dB es 100 veces más potente, con 30 dB 1000 veces más, y así sucesivamente...

Se establece el modelo logarítmico relativo debido a que la sensibilidad auditiva sigue un patrón similar para comparar el volumen de los sonidos. Los conceptos de sonido fuerte o débil son relativos, varían en función de una referencia. La acústica fisiológica ha demostrado que una persona al escuchar un sonido aislado no es capaz de dar una indicación fiable sobre su intensidad. Cuando escucha dos sonidos es capaz de establecer una comparativa entre ambos.

El umbral del dolor se sitúa en torno a los 130 dB, a partir de este volumen el oído puede sufrir daños y pérdida de audición. Como es lógico tanto el umbral mínimo de percepción como

el umbral del dolor no es el mismo en todas las personas, varía en función de la edad y también depende de la frecuencia del sonido.

Medición de ruidos en decibelios

200 dB	Bomba atómica 18 kilotones
140 dB	Motor fórmula uno
130 dB	Umbral del dolor
90 dB	Carretera
70 dB	Aspiradora
40 dB	Conversación normal
10 dB	Respiración
0 dB	Umbral auditivo

En términos musicales se utilizan los **matices dinámicos** para indicar en una partitura si es necesario interpretar la pieza con más fuerza o suavidad. La dinámica hace referencia a las graduaciones de intensidad. Se basa en conceptos subjetivos que dejan en manos de la interpretación personal y emocional del intérprete la manera de llevarlos a cabo. Los símbolos empleados se diferencian en "*dinámica de grados*" y "*dinámica de transición*".

Dinámica de grados.

Los símbolos de la dinámica de grados establece diferentes grados de intensidad para la ejecución de una partitura atendiendo a la diferencia entre sonido fuerte y sonido débil. Se utiliza para ello la terminología italiana. "*Piano*" significa suave y "*forte*" quiere decir fuerte.

<i>ppp</i>	pianíssísimo
<i>pp</i>	pianísimo
<i>p</i>	piano
<i>mp</i>	mezzopiano
<i>mf</i>	mezzoforte
<i>f</i>	forte
<i>ff</i>	fortísimo
<i>fff</i>	fortíssísimo

Dinámica de transición.

Los símbolos de dinámica de transición establecen la transición progresiva entre diferentes grados de intensidad. Al igual que con los símbolos de la dinámica de grados empleamos la terminología italiana.

Para indicar el aumento paulatino de intensidad se utilizan los siguientes:

<i>cresc.</i>	crescendo
<i>aum.</i>	aumentando

Para la disminución de intensidad:

<i>decresc.</i>	decrescendo
<i>dim.</i>	diminuendo
<i>mor.</i>	morendo
<i>Perd.</i>	perdendosi
<i>sting.</i>	stinguendo

Los "reguladores de intensidad" son también símbolos utilizados para indicar la dinámica de transición. Consisten en dos líneas formando un ángulo agudo dibujadas encima de las líneas del pentagrama que nos indican la dinámica que debemos de utilizar en la interpretación de la partitura.



3. ALTURA

La altura hace referencia a la frecuencia a la que vibra un sonido. Como vimos anteriormente las frecuencias bajas se corresponden con los sonidos graves y las frecuencias altas con los sonidos agudos.

Es preciso aclarar la diferencia existente entre los denominados **sonidos determinados** y los **sonidos indeterminados**.

Los **sonidos determinados** se caracterizan por vibrar con una frecuencia rítmica clara y constante, generalmente ocasionadas por la vibración de una onda estacionaria. En los **sonidos indeterminados** no es posible identificar un patrón vibratorio claro y constante porque se mezclan diferentes frecuencias sin ningún tipo de orden ni proporcionalidad aparente.

Los sonidos determinados dan lugar al fenómeno de las **notas musicales**. Nuestro oído es capaz de reconocer la vibración cíclica de un sonido determinado. Es más, con cierto entrenamiento es incluso capaz de comparar la proporción existente entre dos sonidos con diferente frecuencia de vibración. A cada nota musical le corresponde una frecuencia concreta. Si subimos por orden ascendente en la **escala diatónica** cada nota tiene una frecuencia de vibración superior a la anterior, es decir, es más aguda.

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO´
130,80Hz	146,83Hz	164,81Hz	174,61Hz	195,99	220,00	246,94	261,62
1	2	3	4	5	6	7	8

De **Do** a **Do'** hay ocho notas en la escala diatónica, por eso decimos que existe un intervalo de octava entre estas dos notas. La frecuencia de **Do'** es justo el doble con respecto a **Do**.

$$f(\text{do}) \times 2 = f(\text{do}')$$

Cuando nuestro oído escucha una nota al doble de frecuencia con respecto a otra percibe la sensación de estar escuchando la misma nota en una octava superior. Por esa razón desplegamos la escala diatónica de forma repetida a lo largo de las diferentes octavas en nuestro rango auditivo.

DO	130,80 Hz	x2	DO'	261,62 Hz	x2	DO''	523,25 Hz
RE	146,83 Hz		RE'	293,66 Hz		RE''	587,32 Hz
MI	164,81 Hz		MI'	329,62 Hz		MI''	659,25 Hz
FA	174,61 Hz		FA'	349,22 Hz		FA''	698,45 Hz
SOL	195,99 Hz		SOL'	391,99 Hz		SOL''	783,99 Hz
LA	220,00 Hz		LA'	440,00 Hz		LA''	880,00 HZ
SI	246,94 Hz		SI'	493,88 Hz		SI''	987,76 Hz

4. TIMBRE

El timbre es la cualidad acústica que nos permite diferenciar los diferentes instrumentos musicales y también las voces de las personas por su sonido característico. Se define como la **identidad acústica** de cada instrumento o voz.

Cuando dos instrumentos distintos, por ejemplo la guitarra y la flauta, ejecutan una misma nota el sonido es aun así diferente. A pesar de emitir exactamente la misma frecuencia fundamental el resultado no es igual como consecuencia de la diferencia tímbrica que existe entre los dos instrumentos.

Esto es debido al espectro armónico que define la naturaleza tímbrica de cada sonido. Cuando se produce el fenómeno de las ondas estacionarias se genera una serie de frecuencias proporcionales entre sí conocida como **serie armónica**. La primera frecuencia de la serie es la **frecuencia fundamental** y es la que nuestro oído reconoce habitualmente como nota musical. Las demás frecuencias acompañan a la fundamental generando la sensación tímbrica. El timbre de un instrumento o voz se define por la intensidad a la que vibra cada armónico de la serie.

La **formación de armónicos en ondas estacionarias** es un fenómeno complejo fruto de la interacción entre las diferentes fuerzas vectoriales que interfieren entre sí cuando se produce un movimiento vibratorio en un cuerpo con un determinado periodo de vibración. En el siguiente capítulo estudiaremos con más detalle cómo se forman las ondas estacionarias y cómo se ordena el espectro armónico. Las proporciones de la serie armónica constituyen la base para el desarrollo de los modelos teóricos en la armonía musical.