

La acústica es la rama de la física que se ocupa de la producción y propagación del sonido, de la naturaleza del proceso de audición, de los instrumentos y aparatos para su medida, registro y producción del sonido, y que las salas de audición adquieran una acústica favorable entre otras cosas.

Si pensamos en la música, esta es más antigua que la escritura y mucho más aún que la física como actividad humana, puesto que las leyes que rigen esta última existe desde el comienzo del Universo.

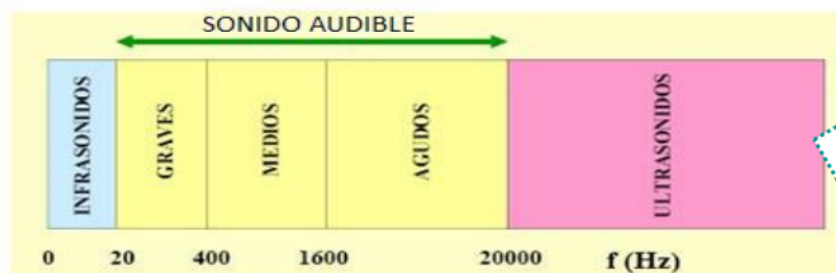
Fue Helmholtz (alemán, 1821 – 1894) quien estableció las bases teóricas y matemáticas de la acústica, y Lord Rayleigh (Reino Unido, 1842 – 1919) quien continuó con su trabajo. Algunos físicos han estudiado por qué algunos instrumentos han llegado a adoptar la forma que tienen actualmente, y dentro de ellos algunos contemporáneos como Carleen M. Hutchins en instrumentos de cuerdas o Arthur H. Benade en vientos.



Pero... ¿Qué es el sonido?

Todos tenemos una noción de lo que es el sonido, y desde que comenzamos el curso hemos hecho referencia a él. Hasta ahora, por el bagaje de conocimiento que tenemos, podemos asegurar que es un fenómeno físico que percibimos a través del oído. Es tiempo de profundizar y formalizar este fenómeno.

Desde el punto de vista sensitivo, el sonido es considerado como aquellas vibraciones que al llegar al oído humano dan origen a la sensación. Estas ondas están comprendidas en un intervalo de frecuencias que va de 20 a 20000Hz⁵. Desde el punto de vista de la física, es cualquier fenómeno que involucre la propagación de ondas mecánicas longitudinales (sean audibles o no) a través de un medio elástico⁶.



¿Conoces aplicaciones de los infra y ultrasonidos?

Las vibraciones sonoras producidas en el aire lo perturban, produciendo regiones comprimidas de mayor densidad (condensación), alternadas con regiones de densidad menor (rarefacciones). Esta onda se genera por la compresión y depresión de la masa de moléculas elásticas (variaciones de presión). Para ser percibido es necesario que exista un medio elástico en el que se genere, un medio elástico en el que se conduzca (en general aire) y un aparato auditivo que lo capte.



Analicemos lo anterior con un ejemplo. Sabemos que, al golpear una campana, esta produce sonido y somos capaces de identificar de donde proviene. El golpe hace vibrar la masa metálica, lo que podemos comprobar al acercar un dedo y tocar suavemente, sintiendo un pequeño cosquilleo que indica una rápida vibración. En cambio, si apoyamos nuestra mano fuertemente sobre la campana, impedimos que siga vibrando, y el sonido se apaga rápidamente.

¡Realiza esta experiencia en casa golpeando un bowl de aluminio!

⁵ Algunos perciben más rango que otros, pero estos valores corresponden a los extremos de una persona joven con buen oído.

⁶ Recuerda que se considera medio elástico a un medio que tiene la capacidad de experimentar deformaciones cuando se aplica una fuerza para luego volver a su forma original una vez acabado el estímulo.

Como hemos estudiado con anterioridad, el sonido se puede propagar por medios líquidos, gaseosos o sólidos. Pese a esto, hay algunos materiales que no lo son, puesto que no todas las sustancias propagan el sonido con la misma facilidad, dando origen a los buenos y malos transmisores del sonido. La mayoría de los sólidos y líquidos, por ser poco compresibles, son buenos transmisores, pero los gases y las sustancias porosas y sueltas como el algodón y la lana no lo son. Estos últimos, por ser malos conductores del sonido, son utilizados como aislantes acústicos.



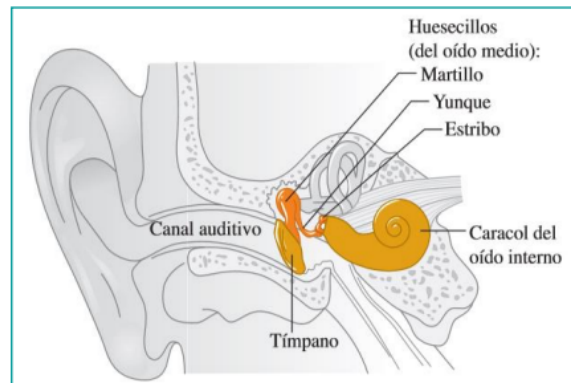
Un experimento fácil de realizar y que ilustra la buena transmisión del sonido a través de un sólido, es colocar un reloj sobre un trozo de algodón, y encima de él una varilla de madera con una moneda en el extremo. Al colocar la oreja sobre la moneda se escucha nítidamente el tic-tac del reloj, mucho mejor que a través del aire.

Para pensar...

debe colocar algodón debajo del reloj y no solo apoyarlo en la mesa?

¿Cómo es el proceso de audición?

Las ondas sonoras penetran el oído por el canal auditivo que mide unos 25mm y al llegar al extremo inciden en el tímpano, que es una membrana delgada de aproximadamente 0,1mm sujeta muy tensamente por los huesos del cráneo. Al incidir la onda sonora, el tímpano vibra, propagándose dicha vibración hacia adentro mediante los huesecillos del oído. Al otro lado del tímpano el martillo, el yunque y el estribo son las estructuras óseas encargadas de transportar las vibraciones al oído interno, donde son captadas por el nervio auditivo e interpretado posteriormente por nuestro cerebro.



¿Cuál es la diferencia física entre el sonido musical y el ruido?

Cuando estudiamos los instrumentos musicales, más específicamente los idiófonos y membranófonos, distinguimos entre aquellos instrumentos que tienen nota definida y por ende producen sonidos de tono preciso, y aquellos que no tienen nota definida y aportan al ritmo y no a la melodía, puesto que producen ruidos.

A la mayoría de la gente le agrada escuchar música, pero a pocas les gusta escuchar ruido. Tanto los sonidos musicales como el ruido consisten en una combinación de ondas sonoras senoidales. La diferencia es que todas las frecuencias de las ondas senoidales de un sonido musical son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental; en tanto que en el ruido están presentes todas las frecuencias. Seguro estás recordando que esto lo trabajamos anteriormente.

Los músicos distinguen entre tono, sonido, ruido y estampido. Veamos ahora más en profundidad esto, y comprendamos diferencias entre estos conceptos.

- ❖ **Tono:** es vibración sinusoidal regular, periódica, como el sonido de un diapasón.
- ❖ **Sonido:** es la suma de tonos sinusoidales, como lo es la voz o el sonido de un instrumento musical.
- ❖ **Ruido:** es un conjunto de vibraciones aperiódicas, provoca una sensación molesta.
- ❖ **Estampido:** son vibraciones aperiódicas y breves (explosión)

Las cualidades del sonido

En la revisión sobre ondas, ya hemos estudiado la velocidad del sonido como un caso particular de la velocidad de propagación de ondas periódicas. Hemos trabajado también con la amplitud de onda, la frecuencia. También hemos analizado las ondas estacionarias y las frecuencias naturales de resonancia. Todo esto nos ha permitido comenzar a analizar los instrumentos musicales, pero, sin embargo, falta incorporar las cualidades del sonido a este análisis.

Los músicos encuentran en el sonido audible algunas características como el timbre, el tono y la intensidad, que se asocian **directamente** a características físicas de las ondas ya trabajadas. Por otro lado, distinguen la altura, que, si bien se asocia a la frecuencia, no depende exclusivamente de ella. Comencemos con un cuadro asociativo de estas características en la física y en la música.

<i>Física</i>	<i>Música</i>
Frecuencia	Altura
Frecuencia fundamental	Tono (nota)
Forma de la onda	Timbre
Intensidad	Intensidad

Altura

Un sonido puede percibirse como grave o agudo según su altura, o bien, según la amplitud de la onda sonora. Esto está estrechamente asociado a la frecuencia, pero no depende específicamente de ella. En música, se habla de notas altas o agudas (que son de alta frecuencia) y de bajas o graves (de baja frecuencia).

Existe una relación muy simple entre una nota de la escala musical y la misma nota un tono más arriba. Por ejemplo, el LA 440 que se utiliza como patrón para unificar las escalas de hoy en día, tiene una frecuencia

$f_1 = 440$ Hz. Esto es una convención, en otras épocas, se utilizaba un patrón diferente, y esto se puede hacer porque en música importan más las relaciones o cocientes entre las frecuencias que la frecuencia absoluta. La escala musical -DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI- es en cierta forma cíclica, y si la vamos recorriendo, después de SI, encontramos otra vez DO, RE... hasta llegar a encontrar otro LA de frecuencia $f_2 = 880$ Hz. Este sonido es más agudo, y tiene exactamente el doble de frecuencia, y si subimos otra escala hasta el siguiente LA encontramos que su frecuencia es $f_3 = 1760$ Hz y como puede verse es otra vez el doble que la anterior.

En síntesis, cada vez que subimos una octava -intervalo entre un LA y el LA consecutivo- estamos duplicando la frecuencia, dando lugar a la existencia de algunos LA más agudos que el de 440 como quedó evidenciado. Si la dividimos a la mitad, encontramos otros más graves en octavas más abajo. La relación de frecuencias es en un factor dos entre notas separadas por una escala.

Es un hecho curioso el que nuestro cerebro perciba como muy semejantes los sonidos que tienen el doble o la mitad de las vibraciones por segundo -frecuencia- y es todavía motivo de estudio para fisiólogos y físicos, aunque parte de las razones son físicas y corresponden a las escalas musicales y timbres de sonido. Este es el motivo de que en música se hable de misma nota, pero en otra octava, cuando las frecuencias de las vibraciones que oímos están divididas o multiplicadas en factores de dos, cuatro, ocho, etc., si hablamos de bajar o subir una, dos o tres octavas respectivamente.

Para pensar...

Observando la imagen adjunta, explica por qué los sonidos más graves tienen mayor longitud de onda, mientras que la de los agudos es menor.



Las notas musicales se caracterizan por su altura o frecuencia; es decir, cuando un instrumento musical emite notas diferentes, está emitiendo sonidos de distinta frecuencia. En un piano, por ejemplo, a cada tecla, le corresponde un sonido de diferente frecuencia.

Como vimos en ondas estacionarias, el armónico fundamental es el tono fundamental del instrumento, sea de viento o de cuerda. Además, algunos músicos llaman a f_2 , f_3 -y f_n generalizando-, **sobretonos**, donde f_2 es el segundo armónico o el primer sobretono, f_3 es el tercer armónico o el segundo sobretono, y así sucesivamente.

En siguiente cuadro puedes encontrar según la escala musical, la correspondencia entre nota y frecuencia.

OCTAVA -2			OCTAVA -1			OCTAVA 0		
NOTA	N°	HZ	NOTA	N°	HZ	NOTA	N°	HZ
DO	0	8.18	DO	12	16.35	DO	24	32.70
DO#	1	8.66	DO#	13	17.32	DO#	25	34.65
RE	2	9.18	RE	14	18.35	RE	26	36.71
RE#	3	9.72	RE#	15	19.45	RE#	27	38.89
MI	4	10.30	MI	16	20.60	MI	28	41.20
FA	5	10.91	FA	17	21.83	FA	29	43.65
FA#	6	11.56	FA#	18	23.12	FA#	30	46.25
SOL	7	12.25	SOL	19	24.50	SOL	31	49.00
SOL#	8	12.98	SOL#	20	25.96	SOL#	32	51.91
LA	9	13.75	LA	21	27.50	LA	33	55.00
LA#	10	14.57	LA#	22	29.14	LA#	34	58.27
SI	11	15.43	SI	23	30.87	SI	35	61.74

OCTAVA 1			OCTAVA 2			OCTAVA 3		
NOTA	N°	HZ	NOTA	N°	HZ	NOTA	N°	HZ
DO	36	65.41	DO	48	130.81	DO	60	261.63
DO#	37	69.30	DO#	49	138.59	DO#	61	277.18
RE	38	73.42	RE	50	146.83	RE	62	293.66
RE#	39	77.78	RE#	51	155.56	RE#	63	311.13
MI	40	82.41	MI	52	164.81	MI	64	329.63
FA	41	87.31	FA	53	174.61	FA	65	349.23
FA#	42	92.50	FA#	54	185.00	FA#	66	369.99
SOL	43	98.00	SOL	55	196.00	SOL	67	392.00
SOL#	44	103.83	SOL#	56	207.65	SOL#	68	415.30
LA	45	110.00	LA	57	220.00	LA	69	440.00
LA#	46	116.54	LA#	58	233.08	LA#	70	466.16
SI	47	123.47	SI	59	246.94	SI	71	493.88



Intensidad

Al propagarse una onda, existe una propagación de energía. Se define la intensidad (I) como la cantidad media de energía (E) transportada por unidad de tiempo (Δt) a través de una superficie (S) perpendicular a la dirección de propagación. Podemos expresar lo anterior a través de una ecuación:

$$I = \frac{E / \Delta t}{S}$$

Como la potencia (P) se define como la energía transportada por unidad de tiempo (es decir que $P = E / \Delta t$), podemos afirmar que la intensidad puede escribirse como:

$$I = \frac{P}{S}$$

¿Sabías que...

...la potencia producida por una persona en una conversación es

$10^{-5} W$, mientras que el gritar es $3 \times 10^{-2} W$.

Ten en cuenta que si se considera una onda sonora emitida por una fuente puntual en el espacio, el frente de onda que genera es esférico, en similitud a lo que sucedía con los frentes de onda circulares generados por una fuente puntual en la superficie en la cubeta de ondas. Así, cuando el

sonido se emite por una fuente puntual, la superficie S corresponde al área de una esfera, por lo cual $S = 4\pi r^2$, de donde, la intensidad es:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

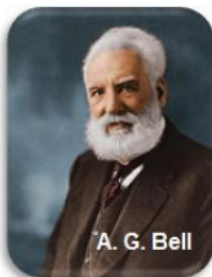
Obsérvese que la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente, es decir al aumentar al doble la distancia, la intensidad decrece a la cuarta parte.



La intensidad es percibida por el oído como lo que habitualmente la llamamos *volumen*, haciendo referencia a subir o bajar el volumen del sonido cuando queremos variar la intensidad. Esa denominación sería técnicamente incorrecta, ya que el volumen hace referencia a una unidad de medida de capacidad. Como el sonido no se puede ver, en muchos casos se utilizan referencias visuales para ejemplificarlo. Al pensar en más volumen, pensamos visualmente en algo grande, y eso lo relacionamos con un sonido de intensidad fuerte y en forma contraria, si pensamos en algo de volumen pequeño, lo podemos relacionar con un sonido débil. Desde la aparición de los primeros artefactos de reproducción de sonido, se utilizó la palabra volumen para determinar las variaciones de intensidad, y desde allí se le reconoce de esa manera internacionalmente.

En particular el oído humano es capaz de percibir sonidos de frecuencia 1000Hz con una intensidad tan baja como $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, lo cual se conoce como **umbral de audición**. Es decir, para oír, es necesario que la frecuencia sea audible, y que la misma tenga cierta intensidad. A una intensidad de $1,0 \text{ W/m}^2$, el sonido es demasiado fuerte y puede ser incluso doloroso, a este valor se lo conoce como **umbral de dolor**.

Nivel de Intensidad



Debido al gran intervalo de intensidad a la que es sensible el oído, resulta más cómodo y necesario utilizar una nueva escala, la escala de decibelios -llamada así en honor a Alexander Graham Bell- la cual es logarítmica⁷.

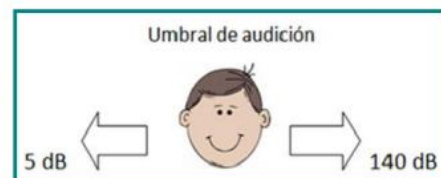
Se define nivel de intensidad sonora β como:

$$\beta = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ cuya unidad de medida son los decibels (dB)}^8$$

Siendo -como se mencionó anteriormente- $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Niveles de intensidad y contaminación sonora

Realizando los cálculos apropiados, podrás llegar a deducir que el umbral de audición posible para los humanos en la escala decibélica se encuentra entre los 5dB y los 140dB.



A continuación se puede apreciar una escala comparativa de niveles de intensidades en dB y algunos ruidos cotidianos a los cuales estamos sometidos.



La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que el ruido es "todo sonido desagradable que causa efectos nocivos en la salud de las personas". Una definición emparentada con el concepto de "contaminación acústica o sonora". La Dra. Elizabeth González Fernández de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), especialista en contaminación sonora, la define como "la presencia de ruido cuando éste se considera contaminante", y agrega, "el ruido es todo aquel sonido que interfiere, de alguna forma, en la actividad habitual o en el descanso".

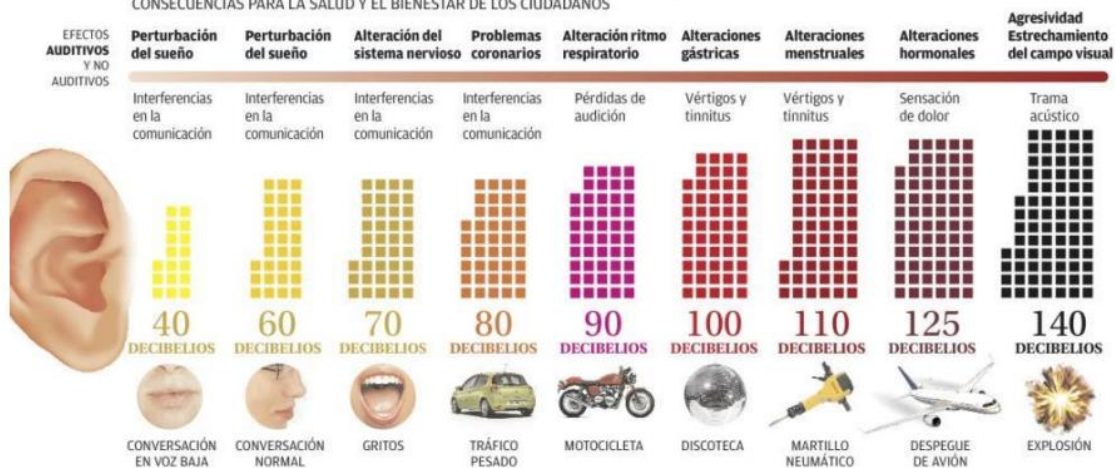
El ser humano no está capacitado para escuchar todos los decibeles que se presentan en su entorno sonoro. Es más, pasando ciertas cifras, la intensidad del sonido puede causar daños auditivos irreparables, daños en la salud en general, y hasta la muerte.

La OMS estableció que todo ruido cuya intensidad no supere los 65-70 decibeles es aceptable. Por encima de ese límite empiezan a manifestarse molestias y riesgos para la salud.

A continuación, se exponen algunas de las consecuencias para la salud según el nivel de intensidad.

El impacto de la contaminación acústica en la población

CONSECUENCIAS PARA LA SALUD Y EL BIENESTAR DE LOS CIUDADANOS



En Montevideo se consideran ruidos molestos los que superan los 45 dB (decibelios) entre las 7.00 y las 22.00 horas, y 39 dB entre las 22.00 y las 7.00, medidos dentro de tu casa. El Servicio de Instalaciones Mecánicas y Eléctricas de la IM controla los niveles de ruido en la ciudad.

(10/12/2014)

En nuestro país, existen normas para garantizar la salud que se relacionan con los niveles de intensidad.

A nivel personal, nadie puede "controlarte", pero... Ahora ya sabes... No debes escuchar música a un "volumen" muy alto, pues las consecuencias pueden ser graves verdaderamente.



Sonoridad



La sonoridad es una medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano. Es decir, la sonoridad es el atributo que permite ordenar sonidos en una escala del más fuerte al más débil. Describiremos sonoridad, por ejemplo, cuando al ir aumentando la intensidad sonora va aumentando la sensación auditiva. Por lo tanto, la sonoridad no se puede medir con aparatos físicos, sin embargo, cabe establecer una escala numérica para evaluarla.

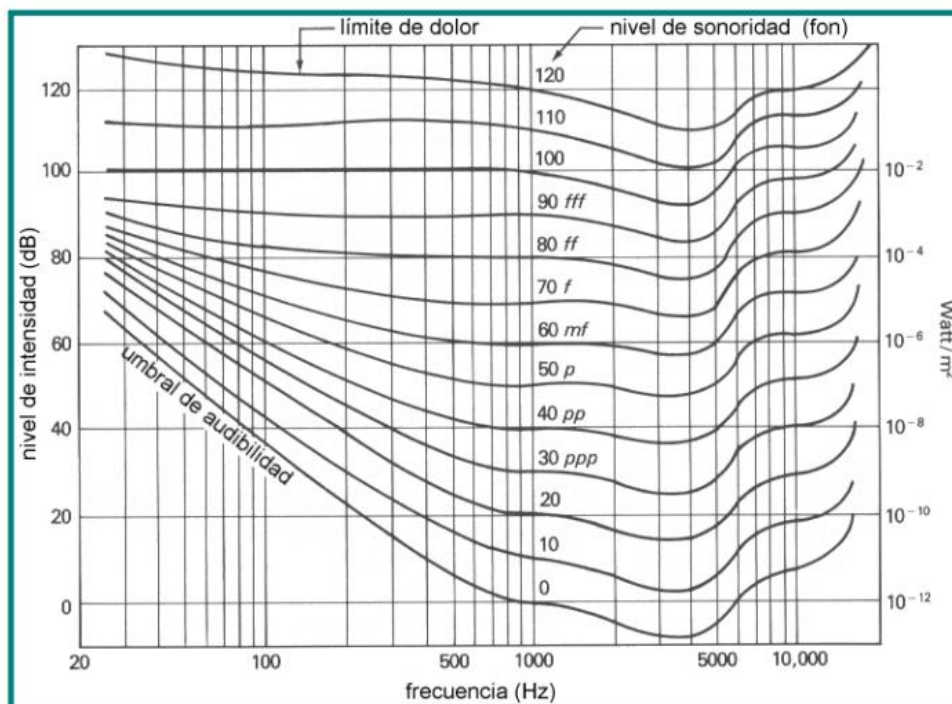
Es la capacidad de un sonido para producir una sensación sonora en nuestro cerebro. La sonoridad depende de la intensidad de un sonido, pero también de su frecuencia, amplitud y otras variables, como

pueden ser la sensibilidad del oído de quien escucha y de la duración del sonido. Si bien un aumento de intensidad origina un incremento en la sonoridad, esta no es proporcional a la intensidad.

Además, se pueden lograr ondas de diferentes frecuencias e intensidades que se perciban con la misma sonoridad (100Hz a 60dB y 600Hz a 40dB).

De la misma forma se pueden lograr dos tonos de diferente frecuencia pero igual intensidad pueden ser percibidos con distinta sonoridad (40Hz a 60dB y 500Hz a 60dB).

Las curvas de sonoridad de Fletcher unen al conjunto de frecuencias e intensidades que son percibidos por el oído humano con la misma sonoridad.



Las curvas isofónicas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad (en decibelios) 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. Dos tonos de frecuencia diferente y con igual intensidad sonora, se dice que cualitativamente son diferentes, pero son de la misma "línea isofónica", es decir, tienen igual sonoridad. Todos los puntos de una curva determinada representan los niveles de presión sonora que han sido juzgados como igualmente sonoros.

Las curvas inferior y superior delimitan la audición humana. Sólo el 1% de la población alcanza el umbral de audición.

Timbre

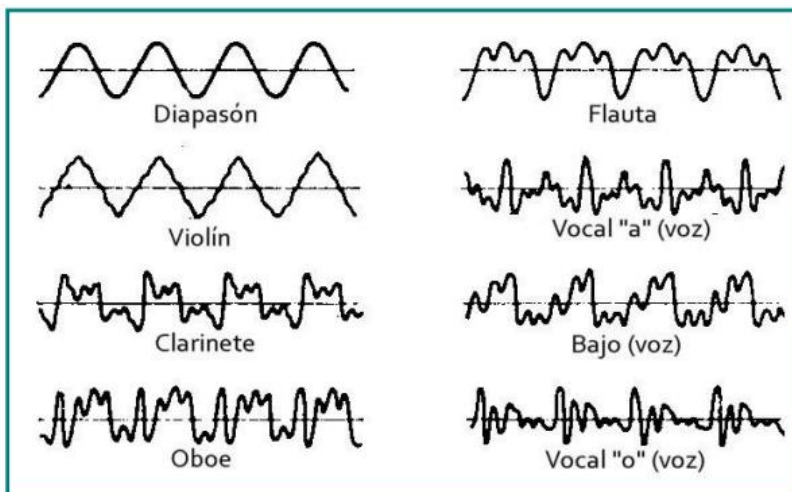
La diferencia de timbre entre dos instrumentos es lo que hace que percibamos como distinto el sonido de dichos instrumentos o bien la voz de diferentes personas, aunque estén diciendo la misma cosa o tocando la misma melodía.

Si se ejecuta un instrumento musical, este producirá vibraciones de muchas frecuencias simultáneas: una que denominamos fundamental que se corresponde a la nota ejecutada **-tono-**, y otros sobretonos o armónicos que nos permiten identificar el instrumento, debido al timbre. Sucede que se puede ejecutar la nota LA **-tono-** en dos instrumentos distintos, generando en ellos sonidos de frecuencia fundamental 440Hz, pero sin embargo los sobretonos o armónicos que lo componen se distribuyen de diferente forma y con diferentes intensidades, lo que da lugar a que estos tengan diferentes timbres y por lo tanto el oído pueda reconocer de qué instrumento se trata. En síntesis, el timbre depende del espectro de frecuencias,

al que denominamos espectro de Fourier, que acompañan a la nota principal.

El timbre se asocia a la forma de la onda como anticipamos en el cuadro asociativo. Para una onda de forma cualquiera, existe una ecuación matemática, con la que no trabajaremos, que nos permite encontrar las amplitudes que la producen. Esto lo podemos trabajar al hacer el **análisis del espectro** con el software Audacity. El timbre lo percibimos porque el oído tiene una especie de analizador de Fourier, que permite analizar una onda complicada en sus componentes más simples. El sistema que usa el oído es muy complejo, y por ello todavía es objeto de investigación. Lo que hace el oído cuando reconoce el timbre de un sonido es analizar las amplitudes relativas de cada uno de los componentes simples o sinusoidales (los componentes armónicos) y comparar mentalmente cada sonido. No somos conscientes del detalle, es decir, que no decimos "acá la primera armónica vale tanto, la segunda tanto, por lo que entonces es un violín", sino que existe un proceso mental no consciente que integra toda la información y pensamos "ese es un violín".

Para interiorizar lo detallado hasta el momento, te invitamos a visualizar y analizar las siguientes imágenes, que representan las formas de la interpretación ondulatoria para sonidos de mismo tono y diferente timbre.



Para pensar...

Luego de observar con atención la imagen:

¿Cómo son las relaciones entre los períodos? ¿A qué crees que se debe? Discutiremos esto en clase.