

# Características del sonido

## **Descripción**

Llamamos sonido a la sensación auditiva que produce en nosotros el fenómeno físico originado por las vibraciones de los cuerpos y que se propagan en un medio elástico. Para que se produzca sonido se requiere la existencia de un cuerpo vibrante, denominado *foco* o *fuentes* (por ejemplo, una cuerda tensa, una varilla, una lengüeta, etc.) y de un medio elástico que transmita esas vibraciones, propagándose por él constituyendo lo que se denomina *onda sonora*. Sin la existencia de ese medio elástico el sonido no podría propagarse. Como ya hemos visto, las ondas que necesitan de un medio elástico para su propagación se denominan *ondas mecánicas* y las ondas de sonido pertenecen a este grupo.

El concepto resulta más claro si se analiza el ejemplo de un resorte largo (Figura 1). En el estado inicial (a), el resorte se encuentra en equilibrio. La distancia entre las espiras es constante en toda la extensión del resorte. En (b) se empuja la primera espira bruscamente, *perturbando* el estado de equilibrio: la distancia entre las primeras espiras disminuye, produciendo un aumento de presión entre las espiras debido a que no es posible mover instantáneamente todo el resorte a la vez. Las espiras comprimidas tienden a descomprimirse ejerciendo mayor presión sobre las demás que las rodean a menor presión, a las que a su vez comprimen, resultando un desplazamiento de la perturbación (c). Este proceso se repite en forma continua, como se muestra en (d) - (f) y la perturbación se aleja, así, del extremo en que se realizó la ***perturbación***.

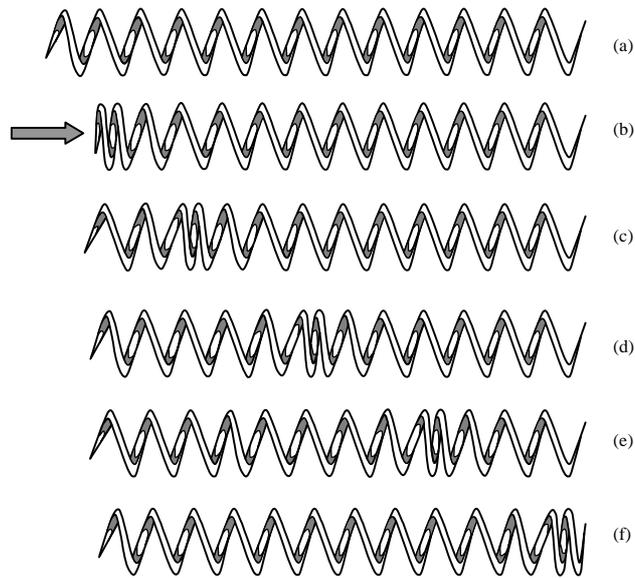


Figura 1: propagación de una perturbación a través de un resorte

En el caso de las ondas sonoras, el efecto es similar. La fuente de sonido provoca un tren de pulsos de presión que modifica el aire que la rodea. El aire comprimido tiende a descomprimirse ejerciendo mayor presión sobre el aire que lo rodea a menor presión, al que a su vez comprime resultando en un desplazamiento de la perturbación sonora. En la Figura 2 se ejemplifica la propagación de una onda de presión dentro de un tubo lleno de aire; la fuente de sonido será representada por el movimiento brusco de un pistón sobre la columna de aire. En el estado inicial (a), el aire se encuentra en equilibrio. En (b) un pistón comprime bruscamente el aire provocando un aumento de presión sobre su cara interna al tubo. La presión del aire dentro del tubo,  $P$ , se grafica en (a'), en donde  $x$  es la posición dentro del tubo. En (b) el pistón se coloca en una posición anterior a la posición inicial, y la presión del aire en la zona inmediata a su cara interna disminuye bruscamente, tal como se observa en (b'). Sin embargo, de acuerdo a lo que vimos en la Figura 1, la perturbación inicial se desplaza por el tubo provocando aumentos de presión en la medida que avanza. La zona de máxima presión en el tubo se corresponde con la máxima amplitud de la onda de presión en el gráfico  $P$  vs.  $x$ .

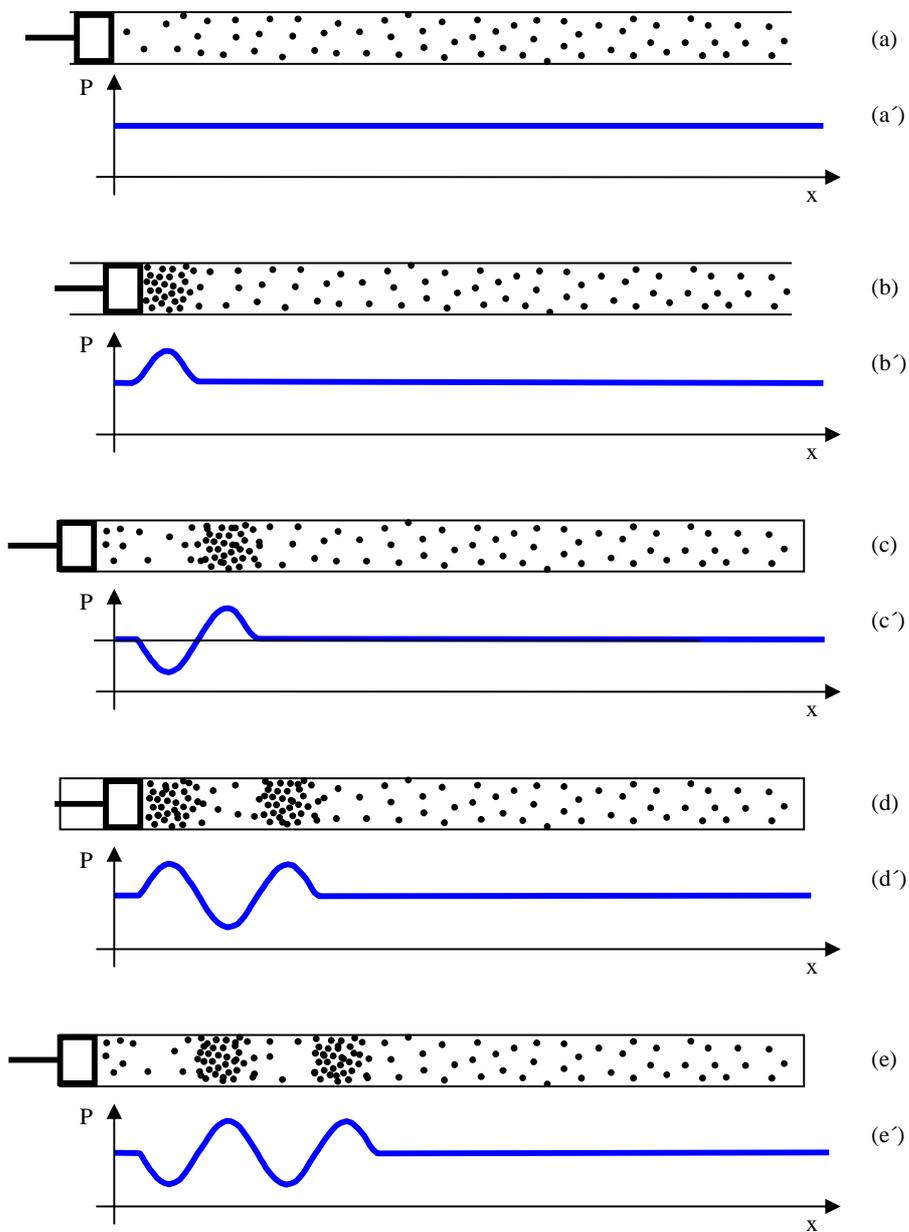
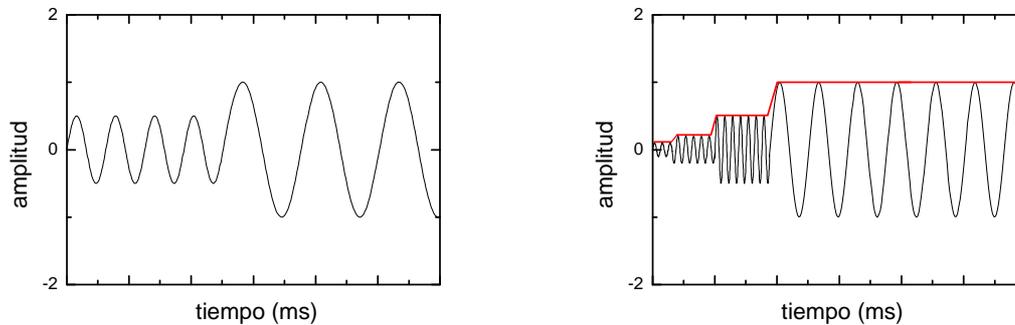


Figura 2. propagación de una perturbación a través de un tubo. (de Introducción a la acústica de Federico Miyara)

Se puede observar entonces que el sonido es una sucesión de compresiones y rarefacciones del aire. Si nos ubicamos en un punto en el espacio (una posición fija) por el cual se propaga una onda sonora, veremos como la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente.

La presión atmosférica se mide en pascales y es del orden de los 100.000 Pa (o como en los informes meteorológicos de 1000 hPa). Sin embargo, los cambios de presión producidos por una onda sonora son muy pequeños respecto al valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben implican un incremento de tan solo 20 Pa. Por esta razón es más razonable considerar únicamente la variación de presión provocada por el sonido, es decir distinguir la presión atmosférica en ausencia de sonido de la presión atmosférica en presencia de sonido. Al incremento de presión se lo denomina presión sonora, y consiste en la presión que se debe agregar a la presión atmosférica en ausencia de sonido para igualar la presión atmosférica en presencia de sonido. Las presiones sonoras audibles varían en términos aproximados entre los 20 Pa y los 0,00002 Pa (20  $\mu$ Pa, un  $\mu$ Pa - micropascal - es la millonésima parte de un Pa). Es importante señalar que es un rango muy importante de variación (de un millón de veces). Esta gran cantidad de cifras es incómoda de manejar y no resulta práctica.

Según la naturaleza del sonido que hemos analizado, en un punto fijo en el espacio la presión aumenta y disminuye por efecto de la onda sonora. La representación más usual del sonido se denominada oscilograma y muestra el cambio de presión con el tiempo. Construir un oscilograma consiste en graficar el valor de presión sonora en un punto fijo en el espacio, para cada instante de tiempo. En el eje horizontal (abscisas) se representa el tiempo, y en el eje vertical (ordenadas) la presión sonora (ver figura 3). Los valores positivos de este gráfico representan compresiones y los negativos descompresiones. El oscilograma permite interpretar rápidamente algunas características del sonido. En particular, muestra claramente la amplitud del sonido. La amplitud o valor de pico es el valor máximo que alcanza la oscilación en un período. Observando el patrón de repetición de la oscilación es posible determinar su período. El período es justamente el tiempo necesario para que el patrón oscilatorio se repita en el oscilograma. La amplitud de los sonidos reales cambia con el tiempo. Se denomina **envolvente** de amplitud a la línea que se obtiene uniendo los picos de amplitud de cada período. Esta es otra de las características del sonido que se pone claramente de manifiesto en el oscilograma (ver figura 3 (b)).



**Figura 3:** Oscilograma, evolución temporal de la presión sonora en un punto en el espacio. Abscisas = tiempo (en segundos o milisegundos, ms), Ordenadas = Amplitud (se suele representar en valores normalizados entre -1 y 1). El oscilograma muestra claramente algunas propiedades del sonido, como amplitud, envolvente de amplitud y período. En (b) se indica la envolvente de amplitud como una recta que une los picos de presión positivos.

Las ondas sonoras son longitudinales, esto es, ponen a oscilar partículas del medio en el cual se propagan en una dirección paralela a la del desplazamiento de la perturbación (ver unidad de conceptos generales de las ondas). Las ondas sonoras no se transmiten sólo en el aire, sino en cualquier otro medio material, sea gas, líquido o sólido. No se pueden propagar en el vacío. La velocidad de desplazamiento de las ondas sonora depende del medio de propagación siendo fuertemente dependiente de las características elásticas del mismo y ligeramente dependiente de la temperatura. En la Tabla 1 se dan algunos datos de la velocidad del sonido en diferentes medios.

medio	temperatura [°C]	rapidez [m/s]
aire	0	331.3
aire	20	≈ 340
agua	15	1450
hierro	20	5130

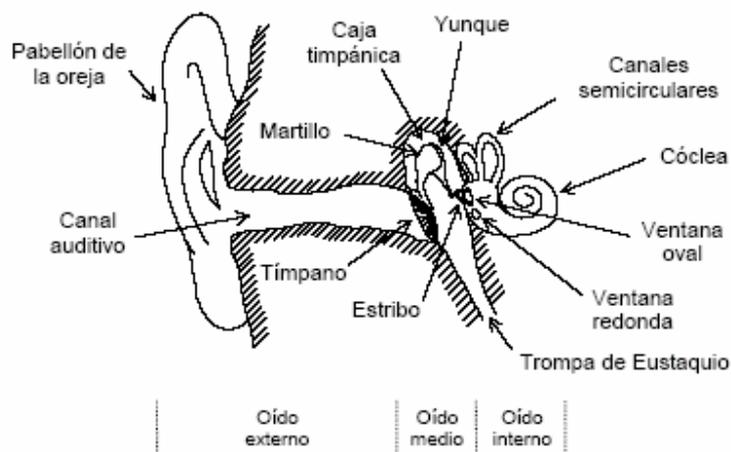
Tabla 1: la velocidad del sonido en distintos medios

Las vibraciones de la fuente son transmitidas al aire que la rodea el que a su vez, las transmite hasta la membrana timpánica o tímpano. El descrito, por supuesto, se trata de un proceso ideal; el mecanismo real consiste de un conjunto fuente-medio material vibrando con un movimiento armónico amortiguado y, de acuerdo a la distancia, es posible que la onda sonora alcance al observador con una energía tal que no pueda ser percibida por el mismo.

En la siguiente sección se estudia el proceso de audición con más detalle, para lo cual se realiza una breve introducción acerca de la anatomía y fisiología del oído humano. Luego de considerar el proceso de audición, se continuará con el análisis de algunos fenómenos auditivos.

## ***El oído humano y la audición***

El oído está formado por el oído externo, el oído medio y el oído interno (Figura 4).



**Figura 4.** Corte transversal del oído derecho, en el cual se muestran las partes anatómicas más representativas del aparato auditivo.

El rasgo más sobresaliente del **oído externo** es el pabellón u oreja el que recoge las ondas sonoras y las conduce hacia el canal auditivo mediante reflexiones y difracciones varias. Está ubicado lateralmente en la cabeza y, si bien es direccional, debido a sus irregularidades es menos

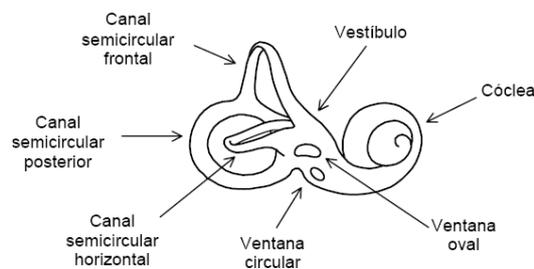
direccional que la oreja de otros animales. Por ejemplo, tanto el gato o el perro poseen control muscular voluntario de la orientación de sus orejas de forma tal que pueden moverlas haciendo que el extremo libre quede apuntando hacia la fuente sonora, y la cantidad de sonido que llega al tímpano es mayor comparada con la que reciben otros animales. El canal auditivo externo, con dimensiones de aproximadamente 27 mm de largo por 7 mm de diámetro, también forma parte del oído externo y es el encargado de conducir el sonido hacia el tímpano. La parte más externa del canal está recubierta por pequeños pelos y por glándulas sebáceas que mediante la segregación de cerumen cumplen principalmente una acción higiénica, fijando y arrastrando lentamente hacia el exterior las partículas de polvo que de otra forma se depositarían en el tímpano. La secreción sebácea, además, aumenta en presencia de sonidos muy intensos y prolongados con lo que se protege al oído de este tipo de ruidos, cerrando parcialmente el conducto. Entre otras funciones del canal auditivo externo se pueden mencionar la de proteger al oído medio, principalmente al tímpano, y proporcionar condiciones de humedad y temperaturas constantes a la membrana timpánica.

Se puede comprobar que en un tubo cilíndrico de longitud  $L$ , con un extremo cerrado se produce una onda estacionaria cuya longitud de onda fundamental es 4 veces la longitud del tubo,  $\lambda = 4L$ . De acuerdo a sus dimensiones, si se supone que el canal auditivo en vez de su forma real, aproximadamente conoidal, tiene forma cilíndrica con un extremo cerrado por el tímpano, la onda estacionaria que se produce tiene una frecuencia fundamental ( $f = V_s/4L$ ), siendo  $V_s$  la velocidad del sonido a temperatura cercana a la del cuerpo humano. Debido a la forma y las dimensiones físicas el oído externo posee una resonancia cuya frecuencia está en las proximidades de los 3000 Hz. Esta resonancia incide en la respuesta del oído.

El **oído medio** está integrado por el tímpano, los huesecillos u osículos y la trompa de Eustaquio, y se ubica en la caja timpánica. El tímpano es una membrana elástica, semitransparente y algo cónica, que comunica el canal auditivo externo con la caja timpánica. Es visible desde el exterior por medio del otoscopio (instrumento óptico que permite iluminar la zona a observar y está dotado a su vez de una lente de aumento). El tímpano recibe las vibraciones del aire y las comunica a los huesecillos. A causa de ruidos muy intensos (por ejemplo una potente explosión cerca

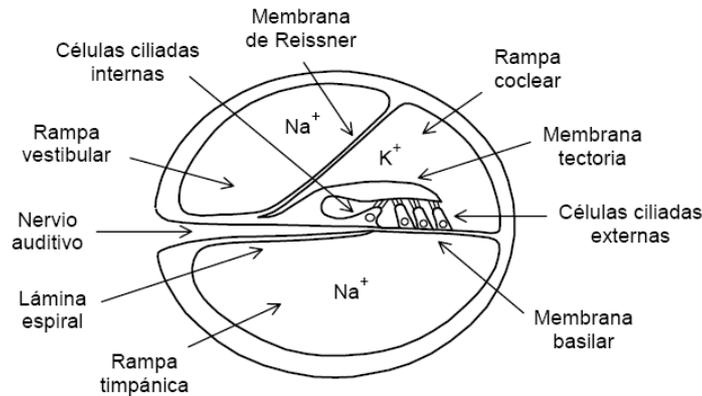
del oído) o por determinadas infecciones, esta membrana puede perforarse, lo cual no es irreversible, ya que se cicatriza. Los huesecillos son una cadena de tres pequeños huesos: el *martillo*, el *yunque* y el *estribo* (Figura 4) que comunican al oído interno las vibraciones sonoras que capta el tímpano. Están sostenidos en su lugar por una serie de pequeños ligamentos y músculos. La finalidad de esta cadena es convertir vibraciones de gran amplitud y poca presión, como las hay en el tímpano, en vibraciones de pequeña amplitud y mayor presión, requeridas en el líquido que llena el oído interno. Esta función es asimilable, por consiguiente, a una palanca mecánica: a causa del efecto palanca las vibraciones del estribo son de menor amplitud pero mayor fuerza.

El **oído interno** está constituido por el *laberinto*, cavidad ósea que contiene a los canales semicirculares, el *vestíbulo*, y el *caracol*. Los canales semicirculares son el órgano sensor del sistema de equilibrio. Son tres pequeños conductos curvados en semicírculo, con ejes aproximadamente en cuadratura. Interiormente están recubiertos por terminaciones nerviosas y contienen líquido endolinfático. Al rotar la cabeza en alguna dirección, por inercia el líquido tiende a permanecer inmóvil. Se crea un movimiento relativo entre el líquido y los conductos que es detectado y comunicado al cerebro por las células nerviosas, lo cual permite desencadenar los mecanismos de control de la estabilidad. Al haber tres canales en cuadratura se detectan movimientos rotatorios en cualquier dirección. El vestíbulo comunica los canales semicirculares con el caracol, y al mismo tiempo comunica el caracol con la caja timpánica a través de dos orificios denominados *ventana oval* y *ventana redonda* (también llamada tímpano secundario), cubiertos por sendas membranas de unos 3 mm y 2 mm respectivamente (figura 5). El estribo, última pieza de la cadena osicular, se encuentra adherido a la ventana oval

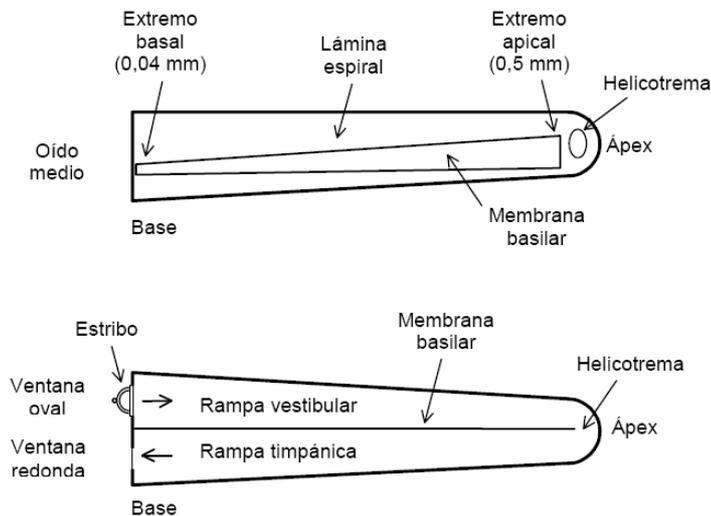


**Figura 5.** Aspecto idealizado del oído interno. En realidad el caracol y el laberinto son una cavidad en el hueso temporal.

El caracol contiene el órgano principal de la audición: la cóclea, que es un tubo arrollado dos vueltas y media en espiral. Tal como se muestra en la figura 6, está dividida en tres secciones. La sección inferior, denominada *rampa timpánica* y la superior, conocida como *rampa vestibular*, contienen líquido perilinfático, rico en sodio (Na) y se conectan a través de un pequeño orificio, el *helicotrema*, ubicado hacia el vértice (ápex) del caracol. La cavidad central es la partición coclear o rampa coclear y contiene líquido endolinfático, rico en potasio (K). La rampa vestibular se comunica con el oído medio a través de la ventana oval, y la rampa timpánica lo hace a través de la ventana redonda. La partición coclear contiene la membrana basilar, una membrana elástica sobre la que se encuentra el órgano de Corti, una estructura que contiene las células ciliadas o pilosas (figura 6). Las células ciliadas se comportan como diminutos micrófonos, generando pulsos eléctricos (denominados potenciales de acción) de unos 90 mV como respuesta a la vibración. Estos pulsos son enviados al cerebro a través de una serie de células nerviosas (neuronas) reunidas en el nervio auditivo. El potencial de acción de una célula individual no es fácil de medir, pero es posible medir la suma de ellos, aplicando unos electrodos transtimpánicos entre las ventanas oval y redonda. Estas tensiones se denominan microfónicos cocleares, y fueron observadas por primera vez por Wever y Bray, en 1930 en gatos. La membrana basilar mide alrededor de 35 mm de longitud y tiene unos 0,04 mm de ancho en su zona basal (la más próxima a la base del caracol) y unos 0,5 mm en la zona apical (próxima al vértice o ápex). Además, la zona más angosta es también más rígida, lo cual será importante para la capacidad discriminatoria de frecuencias del oído interno. En la figura 7 se muestran dos vistas de la membrana con la cóclea hipotéticamente estirada desde su forma helicoidal hasta una forma rectilínea.



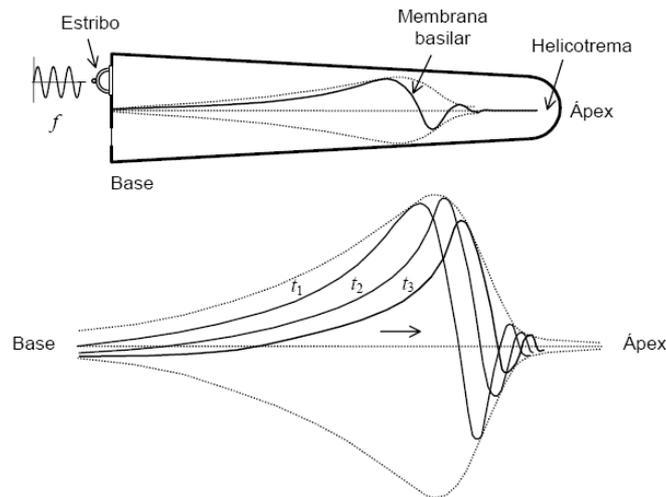
**Figura 6:** corte transversal del conducto coclear



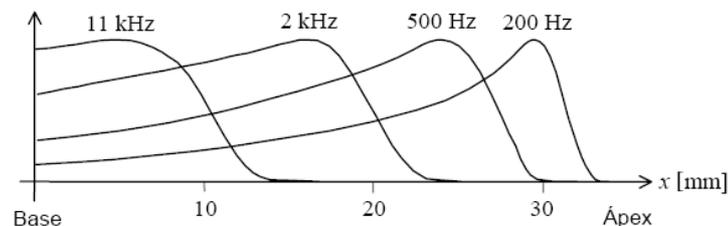
**Figura 7.** Dos vistas de la cóclea hipotéticamente rectificada. Arriba, vista superior. Abajo, vista lateral.

Cuando llega una perturbación a la ventana oval, el líquido de la sección superior se encuentra inicialmente a mayor presión que el de la sección inferior, lo cual provoca una deformación de la membrana basilar que se propaga en forma de onda (denominada onda viajera) desde la región basal hasta la región apical, tendiendo a aumentar la amplitud conforme la rigidez de la membrana va disminuyendo. Cuando la perturbación es periódica, tal como sucede con una vibración sonora, la membrana comienza a vibrar con una envolvente (figura 8) cuyo máximo se produce en cierta posición que depende de la frecuencia del sonido, como se muestra en la figura 8. Resulta, así, que existe una localización del pico de

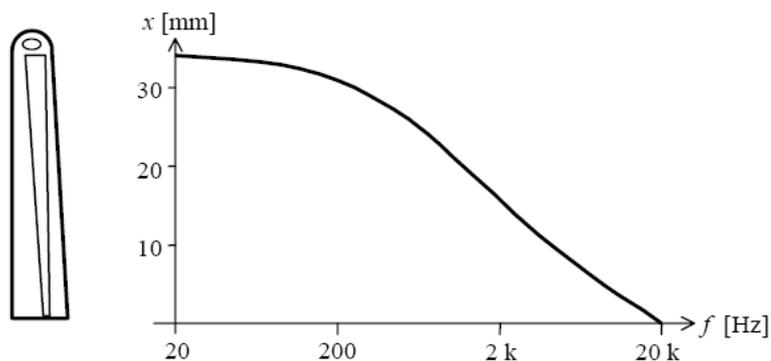
resonancia de la membrana basilar en función de la frecuencia, que se ha representado gráficamente en la figura 10. Esto confiere al oído interno una cualidad analítica que es de fundamental importancia en la discriminación tonal del sonido, especialmente para los sonidos de frecuencias superiores a los 1000 Hz. El descubrimiento de la mecánica de la membrana basilar se debe a Georg Békésy. Como ya se anticipó, el movimiento de la membrana basilar ocasiona que las células ciliadas emitan un pulso eléctrico. Debido a que las membranas basilar y tectoria tienen ejes diferentes, el movimiento relativo provoca un pandeo de los cilios que fuerza la apertura de unas diminutas compuertas iónicas. El intercambio iónico genera una diferencia de potencial electroquímico que se manifiesta como un pulso de unos 90 mV de amplitud o potencial de acción.



**Figura 8.** Arriba, onda viajera en la membrana basilar en un instante dado. Abajo, posición de la onda en tres instantes de tiempo diferentes  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ . Las líneas de trazos indican el lugar geométrico de los picos de la onda conforme ésta va avanzando a lo largo de la membrana.



**Figura 9.** Envolvente espacial de las ondas viajeras sobre la membrana basilar para cuatro frecuencias diferentes.



**Figura 10.** Ubicación de la resonancia a lo largo de la membrana basilar en función de la frecuencia.

El potencial de acción generado por cada célula ciliada debe ser comunicado al cerebro. Ello se realiza a través de las neuronas. En primera aproximación podría imaginarse las neuronas como simples conductores eléctricos. Un análisis más detallado revela que son en realidad complejos sistemas con varias entradas y varias salidas, capaces de realizar operaciones de ponderación, de comparación y de generación de nuevos potenciales de acción.

Es interesante destacar que las curvas de resonancia de la figura 9 son demasiado anchas para explicar la gran discriminación de frecuencias del oído humano. Este problema desconcertó durante años a los investigadores, hasta que se descubrió que la resonancia de la membrana basilar no obedece solamente a sus características elásticas pasivas, sino a un mecanismo de control en el cual intervienen las células ciliadas externas (figura 6) como elementos contráctiles. Estas células realimentan el sistema agudizando la resonancia.

### ***Cualidades del sonido***

Generalmente se utilizan cuatro cualidades subjetivas para describir un sonido: tono o altura, intensidad sonora, timbre y duración. Cada uno de estos atributos depende de uno o más parámetros físicos que pueden ser determinados a partir de una serie de experiencias sencillas consistentes en provocar un determinado estímulo sobre una persona o un animal y medir la respuesta. Esto implica que no existirá una única respuesta ante un estímulo determinado, sino que se hablará de patrones de comportamiento generalizados. Para poder establecer un patrón de comportamiento

específico ante una señal, se deben realizar un alto número de experiencias sobre distintos sujetos y luego determinar una "respuesta promedio" de todas las obtenidas.

## Umbral psicológicos

Dado un tipo de estímulo (como por ejemplo un sonido, una presión sobre la piel o una sustancia agresiva que llega a la sangre), el organismo reacciona con una intensidad que depende, a menudo en forma compleja, de la intensidad del estímulo. En el caso en que el estímulo origina una sensación, es posible medir ésta a través del informe del sujeto, aunque existe el efecto perturbador de la subjetividad, que puede estar influida por diversas circunstancias: hábitos, entrenamiento, asociaciones, cultura, etc. En general, el tratamiento de estas reacciones se realiza estadísticamente, sometiendo las variables involucradas a un estricto control. Los resultados suelen ser válidos sólo en determinado contexto sociogeográfico. Un caso relativamente fácil de medir es el de los *umbrales psicológicos*. Estos corresponden al mínimo nivel de un determinado estímulo para provocar una reacción observable.

Existen dos tipos:

a) Umbrales absolutos y b) Umbrales diferenciales

a) Umbral absoluto: Es la mínima intensidad de un estímulo para la cual en un 50% de los intentos el sujeto considera que el estímulo está presente. Siempre se deben especificar cuidadosamente las condiciones en las cuales se determina el umbral. Por ejemplo, para el umbral absoluto de frecuencia, debe indicarse la intensidad del sonido, si el sujeto se encuentra en un recinto acústicamente aislado, si está descansado auditivamente, etc. Hay dos métodos para determinar el umbral absoluto:

1) El de *mínimos cambios*, que consiste en aproximarse gradualmente desde abajo hasta que el sujeto declara que el estímulo está presente, y luego desde arriba, bajando hasta que indica que el estímulo desaparece. Se promedian ambos valores.

2) El de los *estímulos constantes*, consistente en exponer al sujeto a estímulos de intensidades fijas alrededor del probable umbral, los cuales se repiten ordenados aleatoriamente. El umbral corresponde al valor que el sujeto declare como presente un 50% de las veces.

b) Umbral diferencial: Es la mínima intensidad con que un estímulo debe exceder a otro para que el sujeto los reconozca como diferentes en un 50% de las pruebas. Al igual que en el caso anterior, son importantes las condiciones de ensayo, entre las cuales debe especificarse la intensidad del estímulo más débil. Para la determinación del umbral diferencial pueden utilizarse los dos métodos anteriores, o bien el método del *error promedio*. En éste, el sujeto controla la intensidad del estímulo variable y lo ajusta hasta hacerla "igual" a la de un estímulo fijo. El error promedio cometido es el umbral diferencial.

Es interesante hacer notar que los umbrales no son valores perfectamente determinados. No sólo los diversos métodos pueden arrojar valores diferentes, sino que además un mismo método puede variar de un momento a otro, ya que el sujeto puede cansarse, o bien agudizar su percepción al realizar más intentos.

## **La percepción de la altura de un sonido**

El tono o altura es la cualidad que nos permite distinguir entre un sonido agudo o alto y otro grave o bajo. La altura es uno de los parámetros perceptivos fundamentales del sonido. Está íntimamente vinculada a la frecuencia, aunque la afectan un poco la intensidad, la complejidad espectral (cantidad e intensidad relativa de los sonidos parciales), la envolvente y la duración. Por ello es que al realizar experimentos con la altura es preciso definir cuidadosamente las condiciones en que éstos se efectúan. Existen varias formas posibles de cuantificar la altura.

## **Escala de altura a partir del umbral diferencial**

La medición más básica de la altura en función de la frecuencia puede realizarse por medio del umbral diferencial. El parámetro físico que varía es la frecuencia de un tono puro (senoidal), permaneciendo fija la intensidad. Resulta que hasta los 1000 Hz, la diferencia apenas perceptible (DAP) es aproximadamente constante y es del orden de 3 Hz, en tanto que para frecuencias mayores, la DAP es alrededor de un 0,3 % de la frecuencia. Esto implica que la percepción medida de la altura será lineal para  $f \leq 1000$  Hz y logarítmica para  $f > 1000$  Hz.

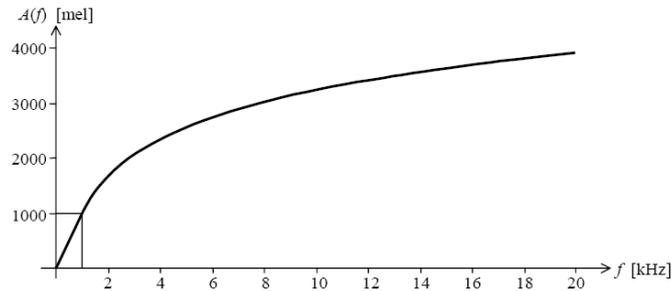


Figura 11: relación entre la altura A y la frecuencia f. Entre 0 y 1 kHz es lineal y por encima de 1 kHz es logarítmica.

Lo más habitual es tomar como unidad de medida de la altura el mel, que se define de modo que para  $f = 1000 \text{ Hz}$  se tenga  $A(f) = 1000 \text{ mel}$ . La relación gráfica entre la altura de una determinada frecuencia  $f$ ,  $A(f)$ , y la frecuencia del sonido que la produce se presenta en la Figura 11. La función matemática que representa a la altura en función de la frecuencia será:

$$A(f) \begin{cases} \left(1 \frac{\text{mel}}{\text{Hz}}\right) * f & f \leq 1000 \text{ Hz} \\ 1000 * \ln\left(\frac{f}{370 \text{ Hz}}\right) & f > 1000 \text{ Hz} \end{cases}$$

**Ejemplo:** ¿Cuál es la altura en mel de un tono de 8000 Hz?

Dado que  $8000 \text{ Hz} > 1000 \text{ Hz}$ , se aplica la expresión logarítmica:

$$A(8000 \text{ Hz}) = 1000 \ln(8000 / 370) = 3074 \text{ mel}.$$

**NOTA 1:** El proceso de construcción de la escala en mel corresponde, conceptualmente, a determinar la DAP para diversas frecuencias y representar en el eje de alturas una cantidad proporcional a la cantidad de DAP's, eligiendo la constante de proporcionalidad de modo de tener que a 1000 Hz la altura sea de 1000 mel.

**NOTA 2:** Los umbrales diferenciales indicados corresponden a promedios extendidos a un número considerable de sujetos. La variabilidad entre sujetos puede ser grande.

## La percepción de la intensidad sonora o sonoridad

La sonoridad es el otro parámetro perceptivo fundamental del sonido. Está vinculada a la intensidad, parámetro físico que describe la energía transmitida por la onda sonora. La sonoridad se ve notablemente afectada por la frecuencia, la duración, etc., de manera que al igual que con otras magnitudes psicológicas, se debe prestar especial atención a las condiciones en que se la determina o especifica.

Antes de proseguir, recordemos que la intensidad sonora se define como la potencia que atraviesa la unidad de área normal a la dirección de propagación de la onda. Para el caso de ondas planas o aproximadamente planas puede expresarse en términos de la presión sonora eficaz de la onda,  $P_{ef}$ , como sigue:

$$I = \frac{(\textit{amplitud de presión})^2}{2 \rho v_{son}} = \frac{P_{ef}^2}{2 \rho v_{son}}$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $v_{son}$ , la velocidad de propagación del sonido en el mismo.

Otra forma de medir la intensidad sonora, en este caso sólo considerando ondas esféricas, es a partir entre la potencia promedio de la fuente y la distancia ( $r$ ) a la cual se encuentra el observador:

$$I = \frac{\textit{potencia promedio fuente}}{4 \pi r^2} = \frac{W_{prom}}{4 \pi r^2}$$

Como ya ha sido mencionado, el rango de presiones que es capaz de manejar el oído varía entre 20  $\mu\text{Pa}$  para el umbral de audición y 20 Pa para el límite de dolor. Este rango de  $10^6:1$  se convierte en  $10^{12}:1$  para las intensidades. Es habitual encontrar valores cercanos a ambos extremos en un mismo contexto. Por ejemplo, en un estudio de grabación el ruido de fondo puede estar en el orden de 0,0003 Pa y en el momento de grabar una sección de percusión puede medirse fácilmente 10 Pa. Ello hace conveniente aplicar una escala de tipo logarítmico que comprima

considerablemente este rango dinámico. Ello se logra con el nivel de presión sonora, definido como:

$$L_p = 20 \log \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)$$

donde  $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ , valor adoptado por ser aproximadamente el umbral absoluto de audición a 1000 Hz. En términos de la intensidad sonora:

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_{ref}} \right)$$

donde  $I_{ref} = P_{ref} / (2 \rho v_{son}) = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  es decir, la intensidad correspondiente a una onda apenas audible. En la tabla 2 se muestran, con fines ilustrativos, los niveles de presión sonora correspondientes a algunos ambientes y situaciones típicas.

Fuente o ambiente	$P_{ef}$ [Pa]	$L_p$ [dB]
Umbral de dolor	20	120
Discoteca a todo volumen	6,3	110
Martillo neumático a 2 m	3,6	105
Ambiente industrial ruidoso	0,63	90
Piano a 1 m con fuerza media	0,20	80
Automóvil silencioso a 2 m	0,063	70
Conversación normal	0,020	60
Ruido urbano de noche	0,0063	50
Habitación interior (día)	0,0020	40
Habitación interior (noche)	0,00063	30
Estudio de grabación	0,00020	20
Cámara sonoamortiguada	0,000063	10
Umbral de audición a 1 kHz	0,000020	0

Tabla 2: Presión sonora eficaz y nivel de presión sonora para algunas fuentes de sonido, ambientes y situaciones acústicas típicas.

### Curvas de igual sonoridad y nivel de sonoridad

En 1933, Fletcher y Munson realizaron otro tipo de determinación psicoacústica basada en la comparación entre dos tonos puros: un tono de 1 kHz e intensidad fija, utilizado como referencia, y un tono de otra frecuencia e intensidad variable, que el sujeto debía ajustar hasta que

fuera igualmente sonoro (o intenso) que el de 1 kHz. Graficando los resultados en función de la frecuencia, obtuvieron para cada intensidad de referencia una curva o contorno de igual sonoridad. Las curvas, denominadas contornos de Fletcher-Munson, se reproducen en la figura 12.

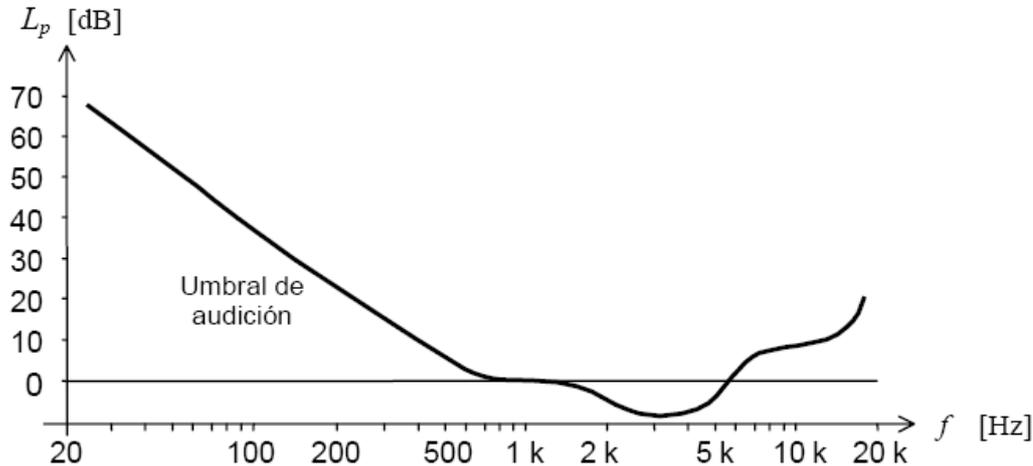


Figura 12: Umbral absoluto de audición. en 1kHz el umbral es 0 dB pues la presión de referencia fue seleccionada como la presión correspondiente al umbral de audición a 1 kHz.

Se han representado allí las curvas de igual nivel de sonoridad cada 10 dB. Según se puede apreciar, las curvas son similares a la de umbral, aunque para intensidades elevadas las curvas se van haciendo más planas. Estas curvas permiten comparar la intensidad subjetiva de dos tonos puros de diferentes frecuencias e intensidades. Así, un tono puro de 100 Hz y 50 dB parece menos sonoro que uno de 2 kHz y tan sólo 30 dB. Los menores valores de  $L_p$  requeridos en las proximidades de 3 kHz para evocar una misma sensación de sonoridad se deben a la resonancia del canal auditivo en esa frecuencia.

Debe advertirse que estas curvas reflejan en realidad los promedios de un número considerable de personas jóvenes y con el oído en buenas condiciones, pudiendo haber, por consiguiente, variaciones individuales importantes.

Los contornos de igual sonoridad pueden utilizarse para asignar una valoración numérica a la sonoridad. Así, se define el nivel de sonoridad, NS (loudness level, LL), como el nivel de presión sonora del tono de 1 kHz que se encuentra sobre el mismo contorno. Como unidad simbólica se utiliza el fon. Por ejemplo, un tono de 200 Hz y 60 dB está sobre el

contorno que contiene al tono de 1 kHz y 51 dB (interpolando), de modo que su NS es de 51 fon.

Sería interesante poder calcular de manera simple el NS de un sonido compuesto a partir de los NS de sus componentes (por ejemplo sumándolos). Lamentablemente, ello no es simple debido a dos causas: el fenómeno de enmascaramiento de un sonido por otro, que hace que el aporte del sonido enmascarado sea insignificante, y el hecho de que el NS, tal como ha sido definido, no provee una escala absoluta que permita determinar cuánto más sonoro es un sonido que otro. Sólo permite dilucidar si es más o menos sonoro.

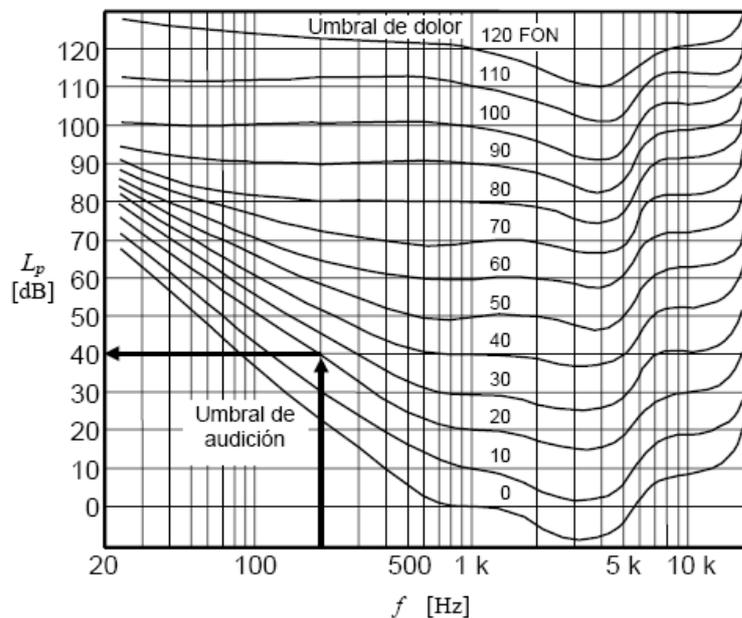


Figura 13. Curvas de Fletcher y Munson (1933). Un tono de 200 Hz y  $L_p = 40$  dB provocará la misma sensación de sonoridad que uno de 1000 Hz y  $L_p = 20$  dB. Se dice entonces que tiene un nivel de sonoridad de 20 fon. Obsérvese que a igual  $L_p$  los sonidos muy graves (baja frecuencia) y los muy agudos (alta frecuencia) tienen menor nivel de sonoridad que los sonidos medios. Además, en la zona de los 3 kHz se tiene la mayor sensibilidad del oído. La curva de 0 fon es el *umbral de audición*, y la de 120 fon, el *umbral de dolor*.

## Timbre y duración

Como ha sido descrito antes, un sonido se debe a la vibración de algún objeto con una frecuencia dentro del rango de las percibidas por el oído

humano. Un sonido musical, por ejemplo, se origina mediante la vibración de alguna parte de un instrumento musical: una cuerda, una columna de aire, una varilla un parche, los labios, etc.. Cuando se producen sonidos del mismo tono y la misma intensidad por un violín, piano, trompeta, oboe, fagot, diapasón, etc., el oído reconoce instantáneamente la diferencia entre los instrumentos. Esta diferencia se llama *calidad, timbre o color tonal*.

Si se analiza convenientemente el oscilograma obtenido de la grabación del sonido de un instrumento musical, se encuentra que el mismo es una combinación de muchos tonos parciales (para más detalle de la superposición de armónicos, ver la figura 18 del apunte de cátedra "oscilaciones y ondas"). En muchos casos, estas partes son múltiplos enteros de los tonos más bajos o *tonos fundamentales*, en cuyo caso se los llama *armónicos*. El término genérico para las componentes superiores es *sobretono*, tono más alto que acompaña un tono fundamental del cual el armónico es un caso especial, esto es, un múltiplo entero del fundamental. Sólo en algunos pocos instrumentos las partes superiores no son armónicas; sin embargo, se las denomina aún como sobretonos.

Mientras el tono de un sonido complejo está determinado principalmente por su fundamental, son los sonidos superiores o sobretonos los que prácticamente determinan la característica del sonido. Esto puede ser demostrado por medio de una grabación del sonido producido por un clarinete y una flauta. Si se escucha ambas grabaciones sin ninguna alteración se distinguen claramente los sonidos de un instrumento y del otro. Sin embargo si se los escucha luego de filtrar todos los armónicos por encima de los 2 kHz se hace muy difícil distinguirlos. Las grabaciones fonográficas mecánicas (preeléctricas 1900-1929) raramente contenían sonidos con frecuencias por encima de los 2 kHz lo que explica la pobreza de las calidad de sonido de estos discos.

Junto con esto, mientras la relación de fase entre las partes (o defasajes) contribuye sólo ligeramente a la calidad del sonido, ésta se modifica perceptiblemente por un cambio considerable en la intensidad. En general se observa que cuando la intensidad del sonido aumenta, el timbre percibido comienza a cambiar cuando la intensidad es muy alta. Una precaución, a menudo descuidada por la gente que escucha música grabada, es escuchar al mismo nivel de intensidad que debía tener durante la

grabación. Cuando se vuelve a escuchar al mismo nivel de intensidad el sonido es semejante al original; pero cuando se escucha a diferente nivel de intensidad no sólo cambiará el equilibrio tonal sino que también varían el timbre o la calidad de los instrumentos orquestales. Un medio práctico para determinar aproximadamente la intensidad original de una grabación es escuchar parte de la grabación de un solo instrumento. El volumen se eleva o se baja hasta juzgar que este instrumento posee la misma intensidad que un instrumento real tocando las mismas notas. Por supuesto, esto debería ser realizado con equipos de gran calidad de reproducción, libres de distorsión electrónica.

A modo de síntesis, el timbre de un sonido es la cualidad en virtud de la que podemos distinguir dos sonidos de igual frecuencia e intensidad emitidos por dos focos sonoros diferentes. Todo sonido puede obtenerse por la adición de sonidos de frecuencias parciales y de esta manera, una onda sonora se puede descomponer en un gráfico espectral. En este tipo de gráficos se representan las amplitudes relativas de cada componente sonoro en función de su frecuencia. De esta manera, el timbre se debe a que generalmente un sonido no es puro y depende principalmente del **espectro** de frecuencias que lo componen.

La duración física de un sonido y la percibida están muy relacionadas aunque no son exactamente lo mismo. La duración percibida es aquel intervalo temporal en el que el sonido persiste sin discontinuidad.

## **Cuadro resumen de las cuatro cualidades del sonido**

Las cuatro cualidades están relacionadas con diversas magnitudes físicas. Esta relación es diferente para cada una de ellas, y puede resumirse en el siguiente cuadro:

Parámetro musical	Parámetro físico				
	presión	Frecuencia	Espectro	Envolvente	duración
Intensidad	ddd	d	d	d	d
Tono	d	ddd	d	d	d
Timbre	d	dd	ddd	dd	d
duración	d	d	d	d	ddd

ddd = fuertemente dependiente

dd = dependiente

d = débilmente dependiente

## ***Sonidos y ruidos***

Tenemos costumbre de distinguir entre sonidos y ruidos. En ese contexto, a los primeros se los asocia con aquellos que nos producen sensación agradable, bien porque son sonidos musicales o porque son como las sílabas que forman las palabras, sonidos armónicos, que encierran cierto significado al tener el oído educado para ellos. Sin embargo, desde el punto de vista de la física, no existe diferencia entre ambos conceptos: en ambos casos se trata de ondas sonoras. En muchos casos la diferencia es cultural: lo que quizá para nosotros pueda tratarse de un ruido, para otros sea un bonito poema recitado en algún idioma que no conocemos.

Si se obtiene el registro gráfico de las vibraciones de sus ondas sonoras se observa que, en general, los sonidos musicales poseen ondas casi sinusoidales, alteradas a veces

apreciablemente por la presencia de sus armónicos. Los restantes sonidos armónicos conservan todavía una total periodicidad aunque su gráfica se aleje notablemente de una senoide, por estar compuestos de varios grupos de ondas de frecuencias fundamentales distintas, acompañadas de algunos de sus armónicos. Los ruidos presentan, de ordinario, gráficos carentes de periodicidad y es precisamente esta peculiaridad lo que produce que la sensación cerebral resulte desagradable o molesta.

### ***Bibliografía consultada***

- *Física conceptual*, P. Hewitt
- CNICE. Ministerio de Educación y Ciencia de España, Coordinador del Proyecto Newton: Carlos Palacios Gómez, Coordinación desde el CNICE: Agustín Muñoz Núñez. <http://newton.cnice.mecd.es/>
- *Apuntes de acústica musical*, Leonardo Fiorelli, Luis Jure, Martín Rocamora. eMe - estudio de Música electroacústica (Abril de 2006) Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Artes, Escuela Universitaria de Música
- *Física Preuniversitaria* (Tomo I y II); Paul A. Tipler. Editorial Reverté S.A..
- *Física en perspectiva*; Eugene Hecht. Addison - Wesley Iberoamérica.
- *Física* (Tomo I y II); Paul A. Tipler. Editorial Reverté S.A..
- *La física del sonido musical*, Jess J. Josephs. Van Nostrand Momentum Books. Editorial Reverté. 1969.
- *Introducción a la psicoacústica*, apunte extraído de "Acústica y Sistemas de Sonido". Federico Miyara. UNR Editora. Rosario, Argentina, 1999.
- *Neuroscience*; Dale Purves, George J. Augustine, David Fitzpatrick, Lawrence C. Katz, Anthony-Samuel Lamantia, James O. Mcnamara, Y S. Mark Williams. SECOND EDITION; 2001 by Sinauer Associates, Inc.