

## CAPITULO 2

### FISICA DEL SONIDO

#### Definición del sonido:

Un murciélago es capaz de detectar, capturar y tragar decenas de insectos en un minuto en pleno vuelo, y todo ello en una oscuridad total. Esto es posible gracias a que éste emite ondas y cuyo eco, al rebotar con el insecto, es detectado y reconocido por el propio murciélago. Estas ondas son de altísima frecuencia y son imperceptibles para el oído humano. Pero esto no quiere decir que podamos oír. Nuestro oído es capaz de percibir sonidos de frecuencias comprendidas entre los 16 Hz y los 16.000 Hz y a las ondas con dicho espectro de frecuencias se le denomina ondas sonoras.

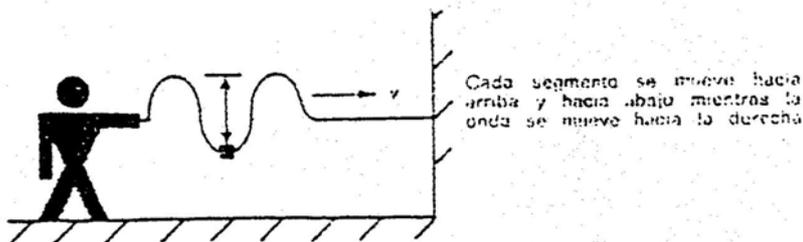
Pero ¿Qué es exactamente el sonido? Una cosa es la definición física del sonido, y otra la sensación fisiológica del mismo. El sonido en sí es cierta forma de onda. En cualquier disturbio vibratorio que, propagado a través de un medio elástico, causa una alteración en la presión del medio capaz de producir una sensación auditiva en una persona con audición normal, o de poder ser detectada por un instrumento de captación dentro del rango de frecuencias e intensidades de percepción del oído. Origina en dicho medio una serie de compresiones y enrarecimientos, desplazándose a través de esta a una velocidad que depende de la naturaleza del mismo medio. El sonido se propaga a través de medios gaseosos (Por ejemplo el aire), pero también lo hace en medios líquidos y gaseosos.

A continuación pasaremos a estudiar cuales son los parámetros fundamentales que determinan una onda sonora, así como la forma de onda y sus características básicas.

#### Parámetros fundamentales. Onda Senoidal

En principio, estudiaremos a través del ejemplo sencillo como se forma una onda típica senoidal, que es la que caracteriza a los sonidos, para posteriormente adentrarnos en su estudio y características.

Supongamos que tenemos una soga muy larga y que fijamos uno de sus extremos a una pared. Si después tomamos el extremo libre y movemos la cuerda hacia arriba y hacia abajo hasta una distancia desde su posición horizontal o de equilibrio  $+A$  y  $-A$ , observamos que suceden fundamentalmente dos cosas.



1. Hay una onda que se propaga desde la soga a la pared.

Advertimos que, si bien la soga se mueve hacia la pared, cada segmento de la soga se mueve únicamente hacia arriba y hacia abajo. Es decir, el desplazamiento medio de cada segmento de la soga es cero, pero la onda formada por todos los segmentos de la soga se mueve hacia la pared, transmitiendo cierta cantidad de energía a esta.

2. Cada segmento de la soga realiza un movimiento periódico.

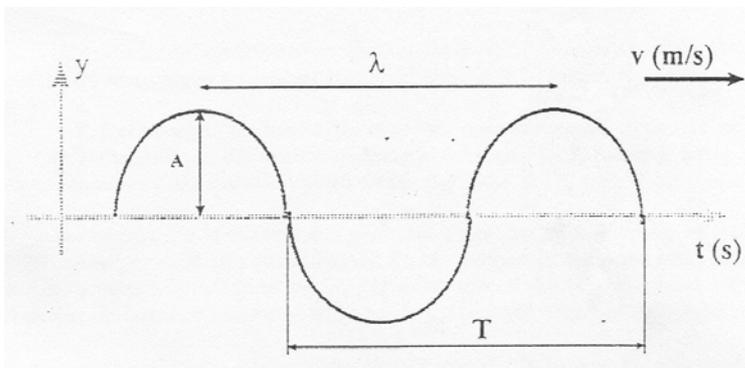
EL tiempo empleado en un ciclo completo se llama período (T) medido en segundos y el número de ciclos por segundo se llama frecuencia (f) y se mide en ciclos por segundo o Hertzios. La frecuencia es inversa al período  $f = 1/T$ . Por otra parte cada segmento de la soga tiene cierta amplitud (A). La amplitud se define como el máximo desplazamiento desde la posición de equilibrio.

La frecuencia está determinada por la fuente, de forma que si la soga se agita rápidamente, la frecuencia será mayor (alta frecuencia) que si la agito lentamente (baja frecuencia) que si la agito lentamente (baja frecuencia) La amplitud igualmente está determinada por la fuente, de modo que si el extremo de la soga se eleva mucho desde la posición horizontal o de equilibrio la amplitud será grande y viceversa.

Por tanto, ya hemos visto que tanto la frecuencia como la amplitud están determinadas por la fuente. Pero la onda tiene una velocidad de desplazamiento, ¿quién determina dicha velocidad?

La velocidad de una onda esta determinada por el medio donde esta se propaga (es nuestro ejemplo de la soga) La masa y la tensión de esta será las que nos determine la velocidad de onda.

A poco de haber empezado a moverse la soga, la onda tendrá el aspecto que se observa en la figura. La distancia entre dos puntos máximos de la onda se llama longitud de onda  $\lambda$  y esta determinada por la frecuencia y por la velocidad.



La relación entre estas tres características es

$$\lambda * f = v$$

donde:

$\lambda$  = Longitud de onda (m)

f = frecuencia (Hz)

v = velocidad (m/seg.)

A este tipo de onda generada se la denomina la onda sinusoidal. La fórmula que rige una onda de estas características es la siguiente:

$$y = A \sin wt$$

Donde A es la máxima amplitud, sen es la función trigonométrica seno, w es la pulsación y es igual al producto  $2\pi \times f$ , t es el tiempo en segundo e y es la posición de un punto de la soga para un tiempo determinado.

Todo lo visto hasta ahora referente a una onda sinoidal, pero es trasladable a una onda sonora, en donde el foco emisor será un foco sonoro, la soga el medio donde se propaga el sonido y la onda formada será la onda sonora en sí.

En este caso estamos hablando de un sonido puro, que es la emisión de un sonido de una sola frecuencia con una intensidad determinada. Pero en nuestro ambiente cotidiano es muy difícil encontrarnos con sonidos así. La mayoría son superposiciones de sonidos de diferentes frecuencias y amplitudes que originan lo que denominan sonidos complejos.

### ***Características objetivas y subjetivas:***

Lo visto hasta ahora corresponde a magnitudes físicas de los sonidos, pero como ya comentamos anteriormente, una de ellas es la descripción física del sonido y otra la sensación fisiológica de éste. Las características del sonido podrían entonces clasificarse en objetivas y subjetivas.

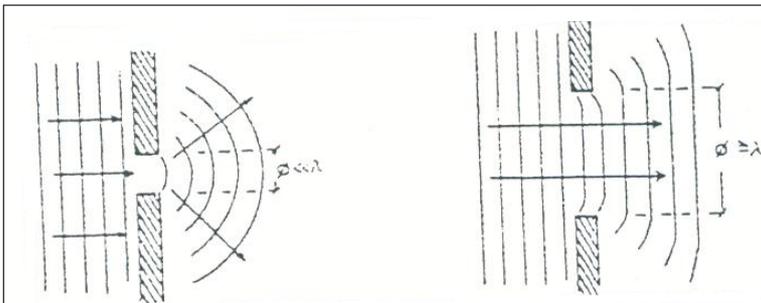
A continuación describiremos algunas de las características objetivas de los sonidos para adentrarnos posteriormente en el estudio de las subjetivas.

- Refracción: en un medio homogéneo el sonido tiende alejarse de la fuente de forma esférica a una superficie plana. (onda plana).

Sin embargo, si la elasticidad o densidad del medio no es la misma en todas las direcciones, por ejemplo por diferencia de temperatura, el frente de onda puede desviarse y cambiar la dirección de propagación. Este fenómeno se conoce como refracción. En tales circunstancias, las líneas de propagación del sonido se flexionan.

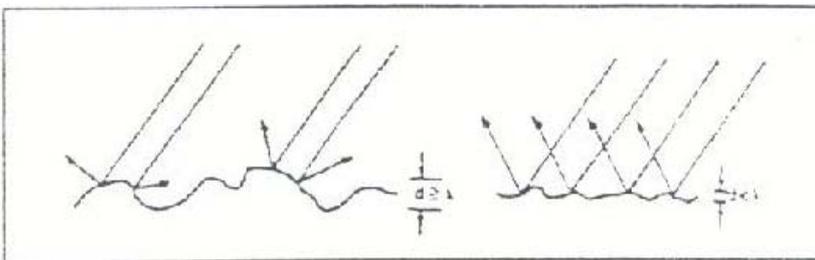
- Difracción: es la distorsión de un campo de sonido causada por la presencia de un obstáculo.

Cuando un disturbio vibratorio (onda sonora) incide en la abertura de una pared, algo de su energía pasa a través de la abertura. Si la abertura es pequeña comparada con la longitud de onda, el disturbio sufrirá una acentuada dispersión en la región posterior a la pared. En tal caso, la abertura actúa en cierto aspecto, como una fuente de energía para la región posterior. Tal situación se muestra de forma aproximada en la figura 3.



El mismo fenómeno se produce en los bordes de cualquier barrera que impida la propagación libre del sonido. El sonido tiende a rodear el obstáculo a bajas frecuencias.

- Reflexión: en el límite de dos medios capaces de conducir, ocurre tanto la absorción como la reflexión de energía. Esta última no es más que una especie de rebote de la onda que incide sobre la superficie, de forma que la onda reflejada o rebotada es de igual característica que la incidente y formando ahora un ángulo simétrico con la perpendicular a la superficie. Hay dos tipos de reflexiones: difusa y regular. Si las irregularidades de la superficie son comparables en dimensiones con la longitud de onda involucrada, tendrá lugar la reflexión difusa. En este caso el frente de onda experimentará un reflejo no uniforme con distintas direcciones. En caso de que la superficie sea relativamente uniforme, ocurrirá una reflexión regular. Estos fenómenos se pueden observar en la figura 4.



- Absorción y atenuación: algunas veces es deseable reducir la reflexión dentro de un recinto. Con este objeto, el plafón o los muros pueden ser cubiertos con un material que sea de naturaleza tal y construcción que absorba un gran porcentaje de la energía incidente. La efectividad de un material para absorber el sonido se denomina coeficiente de absorción y en general varía con la frecuencia, representa la fracción de la energía absorbida comparada con la energía total incidente.

Otro fenómeno independiente del anterior que también origina pérdida de energía de las ondas es la absorción en el propio medio de la propagación que origina una atenuación progresiva de la onda. En un medio fluido, tales pérdidas se originan por viscosidad, conducción de calor e intercambio de energía.

- Ecos: la reflexión del sonido da lugar al familiar fenómeno del eco. Este se origina principalmente cuando la superficie reflectante se encuentra perpendicular a la dirección del sonido. Este efecto es muy útil en los sondeos para estudios geofísicos o de petróleo, donde unos transductores reconocen e interpretan los ecos producidos por los distintos estratos terrestres tras una explosión, calculando de esta forma la profundidad de las formaciones.
- Resonancia: es uno de los fenómenos más importantes en el estudio del sonido. Muchas fuentes de sonido, tales como las cuerdas vocales o un violín, pueden producir, vibrando libremente en el aire, solo sonidos de muy baja intensidad, ya que no logran agitar energicamente el aire.

Por lo tanto, es necesario contar con un medio por el cual aumentar la intensidad de los débiles sonidos emitidos por dichos cuerpos. Para esto se aprovecha el fenómeno de la resonancia.

Cualquier cuerpo capaz de oscilar libremente puede también oscilar bajo la acción de una fuerza que puede tener una frecuencia igual o distinta a su frecuencia natural. Si los impulsos de excitación se sincronizan, incrementos de energía extremadamente pequeños

harán que el cuerpo describa oscilaciones de, relativamente gran amplitud. Este será mayor si se alcanza la frecuencia de resonancia, que es propia de cada cuerpo oscilante.

Hay muchos casos comunes en que las ondas libres actúan como fuentes de energía estableciendo efectos de resonancia. Si se canta una nota cerca de un instrumento de cuerda, se notará que una o más cuerdas vibrarán perceptiblemente según su frecuencia de resonancia.

La resonancia ocurre a una frecuencia específica. Sin embargo, cuando la diferencia de la frecuencia natural del cuerpo y la de la fuente es muy pequeña, existe una fuerte reacción del cuerpo, muy semejante a la resonancia perfecta. Algunos cuerpos o sistemas responden a un amplio rango de frecuencias. Los pianos y los violines son un ejemplo de instrumentos con una curva ancha de resonancia.

### *Pasamos a continuación a describir las características subjetivas:*

Cuando se escucha aisladamente un sonido sostenido, es posible distinguírle tres atributos subjetivos básicos: intensidad, tono y timbre. Cuando se escucha una secuencia de sonidos en un recinto cerrado es posible distinguir muchos otros atributos resultantes de la comparación de los distintos sonidos y del a interacción con el recinto, atributos que no trataremos aquí.

- Intensidad: al vibrar un foco sonoro producirá ondas de una determinada amplitud, siendo la intensidad proporcional al cuadrado de la misma, teniendo así sonidos fuertes o débiles. EL atributo subjetivo de la intensidad tiene relación con la magnitud de la presión de una onda de sonido. De acuerdo con esta magnitud los sonidos pueden ser fuertes o intensos en un extremo y débiles en el otro. Actualmente se ha podido establecer una escala numérica para indicar los valores aparentes de esta propiedad en función de la presión y la frecuencia de los sonidos. Podría confundirse esta características con la intensidad, digamos objetiva, que se define como el flujo neto de energía que pasa a través de una unidad de área en una dirección determinada. Para distinguirlas llamaremos a la primera intensidad subjetiva y sólo intensidad a esta última variable. El cálculo, representación e interpretación de las misma requieren un análisis y estudio detenido por lo que serán tratadas en un capítulo diferente.
- Tono: permite distinguir los sonidos agudos de los graves, siendo los agudos los producidos por focos que vibran a frecuencias elevadas y los graves los que vibran a frecuencias bajas. El tono representa la posición del sonido en la escala musical y es en función de la frecuencia.

Como la mayoría de los sonidos son complejos, surge la cuestión del tono en estos sonidos. En general, el tono de un sonido complejo es el de su onda fundamental, sin embargo, si el sonido esta formado por un grupo de componentes que difieren en un número igual de Hetzios, el tono aparente puede ser precisamente el de esa diferencia de frecuencia.

La frecuencia mas prominente producida por un cuerpo vibrante se denomina frecuencia fundamental, la cual producirá un tono determinado. Cualquier frecuencia que produzca una sensación de tono dos veces mayor que la fundamental, se denomina un octavo u octava por encima de esta. Las octavas representan pliegues de la frecuencias y una banda de octava será el espacio de frecuencias comprendidas entre

dos octavas consecutivas. Una progresión de octavas típicas puede ser 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, ...Hz.

Otro aspecto en la percepción del tono es el tiempo mínimo necesario para identificar un tono determinado. Aparentemente el tiempo de percepción de un tono es más o menos independiente de la frecuencia y es del orden de un vigésimo de segundo.

- Timbre: esta cualidad nos permite distinguir dos sonidos de igual intensidad y tono producidos por dos focos diferentes. Dos violines, por ejemplo, de diferente fabricación producen diferente timbre aún tocando la misma nota. El timbre se relaciona con el hecho de que un sonido casi nunca es puro, o sea, casi nunca corresponde a una onda sonora dada la expresión “ $A \sin \omega t$ ”, sino que suele haber una frecuencia fundamental a la que pertenece la mayor parte de energía de ese sonido y otras frecuencias que llevan su cantidad de energía y responden a otra expresión similar “ $A' \sin \omega' t$ ”. Estas se llaman armónicos y se superponen a la onda correspondiente a la frecuencia fundamental.

### *La medida del sonido.*

La mayor parte de los sonidos están formados por series irregulares de perturbaciones de presión en el medio positivas (compresiones) y negativas (rarefacciones) con respecto a la presión atmosférica de equilibrio. Si medimos el valor medio de la perturbación de presión sonora, podríamos encontrar que es cero, debido a que existen tantas perturbaciones positivas como negativas. Así el valor medio no es una medida útil. Debemos emplear una medida que permita sumar los efectos de las compresiones y rarefacciones. Una de ellas es la Presión Sonora raíz Cuadrática Media (RMS). La PRMS se obtiene elevando al cuadrado el valor de la perturbación de presión sonora en cada momento. Estos valores cuadráticos son así sumados y promediados en el tiempo. La presión sonora RMS es la raíz cuadrada de esta media temporal. El valor RMS es llamado también valor efectivo. En adelante, al referirnos a la presión media de un punto lo haremos a su valor RMS. Matemáticamente se expresa como:

Determinemos ahora como calcular la intensidad de sonido. Conviene aclarar la distinción entre intensidad real o física de un sonido, de la intensidad subjetiva que produce este sonido a un agente determinado. Físicamente, la intensidad se define como la cantidad de energía que atraviesa por segundo la unidad de superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda sonora.

La intensidad de sonido se representa como la  $L$  y matemáticamente se deduce de la fórmula.

$$L = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo} \cdot \text{Superficie}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Y según el sistema de medida Internacional (MKS) se medirá en:

$$MKS \rightarrow \frac{\text{julio}}{\text{seg} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{watio}}{\text{m}^2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$L = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

De donde se deduce que:

$$\text{Potencia} = L \cdot 4\pi r^2 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Si el foco emite en un medio homogéneo o isotrópico, podemos saber la potencia en todos los puntos de una esfera de radio R, cuyo centro es dicho foco y conociendo la potencia de dicho foco emisor.

La intensidad para una onda plana que progresa libremente, también viene

$$L = \frac{P^2}{10 \cdot \rho \cdot c} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Dado por la expresión:

donde:

P: Presión sonora que crea la onda, medida de microbares.

$\rho$ : Densidad del medio donde se propaga la onda.

c: Velocidad del sonido en el medio.

Otra forma de medir el sonido sería mediante la Potencia Sonora. Se define como la energía emitida en la unidad de tiempo por una fuente determinada.

Partiendo de la definición de intensidad sonora:

$$L_{\text{media}} = \frac{\text{Energía}}{\text{tiempo} \cdot \text{superficie}} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} = \frac{W}{S} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Suponiendo una fuente sonora no direccional en el centro de una esfera de

$$S = 4\pi R^2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

radio R:

con lo que:

$$L_{\text{media}} = \frac{W}{4\pi R^2} \Rightarrow W = L_{\text{media}} \cdot 4\pi R^2 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

dado el radio R en cm.

Como ejemplos, se puede indicar que una conversación normal tiene 20 mw, un martillo neumático 1 w, y un avión a reacción 10 kw.

$$W = \frac{P^2}{10 \cdot \rho \cdot c} \cdot 4\pi R^2 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

La presión sonora que provoca una fuente de ruido puede oscilar en un margen muy amplio, desde los 20µPa que se considera el mínimo audible por una

y sustituyendo

y sustituyendo:

$$W = 0'0309 \cdot R^2 P^2 (\mu W) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Persona, hasta los 100 x 10<sup>6</sup> µPa que puede provocar un avión a reacción, e incluso más. Estos valores son pocos manejables, junto con la respuesta del oído humano a los sonidos, que es de tipo logarítmico en cuanto a supresión, hace que los niveles de sonido se manejen en la escala de decibelios. (dB).

Así, se define el **Nivel de Presión Sonora (SPL)**, como:

$$L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad (dB) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

P= presión sonora existente en un punto.

P<sub>0</sub> = presión de referencia (mínimo audible) = 2 x 10<sup>-5</sup> pascales = 2 x 10 microbares.

El umbral de dolor para el oído humano se encuentra en 120 dB, que equivalen a 20 pascales o 200 mbares. Debido a la naturaleza logarítmica de la escala, los niveles de presión sonora no se pueden sumar directamente. Para sumarlos se procede como sigue:

$$L_p = 10 \cdot \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{P_1}{P_0} = 20 \cdot \log P_1 - 20 \log P_0 = 20 \cdot \log P_1 - 94 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_1 = \text{antilog} \frac{L_p - 94}{20} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$L_{pT} = 10 \cdot \log \frac{\sum (P_i)^2}{P_0^2} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Si hay varios niveles, L<sub>p1</sub>, L<sub>p2</sub>, L<sub>p3</sub>, se calculan las presiones sonoras decada uno como se indica y se sustituyen en la expresión general, quedando:

Cuando dos niveles son iguales para sumarlos basta aumentar su valor en 3 dB. Así y podemos sumar estos niveles de presión.

Igualmente se puede definir el Nivel de Potencia Sonora, como:

donde:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{w}{w_0}$$

*Ecuación 2.15*

$w$  = potencia sonora, en vatios  
 $w_0$  = potencia sonora referencia, en vatios =  $10^{-12}$  w.  
 y el nivel de intensidad sonora como:

donde:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}} \text{ (dB)} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$I$  = intensidad sonora, en w/m<sup>2</sup>.

$I_{ref}$  = intensidad de referencia =  $10^{-12}$  w/ m<sup>2</sup>.

A la hora de combinar varios niveles de potencia o intensidad sonora, se hace siguiendo el mismo esquema que en el caso de niveles de presión sonora.

Hasta ahora hemos visto sólo la interpretación del decibelio absoluto, que es una magnitud física que relaciona dos intensidades sonoras o dos presiones acústicas. A este decibelio se le llama dB SPL, del inglés ( sound pressure level) que sirve para medir el nivel de presión sonora absoluto de un foco emisor.

Pero si lo que queremos es medir la sensación sonora del oído humano, necesitaremos una presión sonora distinta en cada frecuencia, ya que el oído necesita un estímulo diferente para cada frecuencia para obtener en cada una de ellas la misma sensación de intensidad.

Así, un sonido puro de un nivel de presión sonora determinado hacemos que varíe su frecuencia, la sensación que experimenta el oído, aparte claro está de la diferencia de tono es que existe una sensación de diferente intensidad en dicho sonido, aún cuando este mantenga constante el nivel de presión sonora (dB SPL).

Ya hemos comentado que el oído humano es capaz de detectar sonidos de frecuencias comprendidas entre los 16 Hz y los 16.000 Hz, permaneciendo sordo para frecuencias inferiores a 16 Hz (infrasonidos) y superiores a 16.000 Hz situado entre estos límites se denomina campo acústico. Pero necesitamos medir la mínima audible como la máxima soportable, lo que se denomina umbral de audición y umbral de dolor que estudiaremos a continuación.

### ***Umbrales de audición. El decibelio HL***

Ciñendonos a las frecuencias que producen sensación sonora, disminuyendo y aumentando las intensidades en cada una de ellas se determinarán las zonas donde el oído capta con mínima intensidad y aquella donde es la máxima intensidad que el oído puede soportar. Estas zonas se llaman Umbral de audición y Umbral de dolor, respectivamente. Estadísticamente se toma el umbral de audición en torno al valor de  $10 - 12$  W/m<sup>2</sup>, mientras que el umbral doloroso se haya alrededor de  $10^{-0}$  W/m<sup>2</sup>, para una frecuencia de 1.000 Hz.

Existe una zona de máxima sensibilidad del oído, (con menos presión acústica se produce sensación auditiva), localizada en torno a los 4.00 Hz, aunque para simplificación de operaciones se toma como referencia la de  $10-12$  W/m<sup>2</sup>.

También es conveniente tener en cuenta que para que se produzca sensación auditiva es necesario un tiempo para que los receptores acústicos puedan entrar en resonancia y transmitir la información procedente de la cóclea al cerebro. Este tiempo mínimo de respuesta que se conoce con el nombre de constante de tiempo fisiológico es de alrededor de 5 ms.

Por tanto para que un oído sano pueda percibir un sonido es necesario que la onda sonora:

- Sea de una frecuencia comprendida entre los 16 Hz y los 16.000 Hz.
- Tenga una intensidad sonora de entre  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> y  $10^{-0}$  W/m<sup>2</sup>
- Dure en el tiempo al menos 5 ms.

Ya comentamos anteriormente que la respuesta del oído a la excitación no es lineal, sino que sigue una proporción logarítmica. La principal característica de este tipo de respuesta es que para pequeñas variaciones en intensidades bajas de excitación, la variación de la respuesta es bastante considerable, mientras que para variaciones grandes en intensidades altas de excitación, la variación de la respuesta es pequeña. Esto depende de la fórmula del cálculo del nivel de intensidad sonora que como recordaremos era:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}} \text{ (dB)} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Y que nos dice que la unidad de intensidad umbral  $I_{ref}$  se corresponde con una intensidad física de orden 10 veces superior.

Tomando el valor del nivel de presión sonora necesario en cada frecuencia para que una persona otológicamente sana empiece a oír, nos encontraremos que para cada frecuencia este valor es distinto. Si todos estos valores los trasladamos a una gráfica y los uniésemos mediante una línea, veríamos que ésta no es ni recta ni uniforme sino que crece con las frecuencias hasta un máximo en torno a 4.000 Hz y de nuevo decrece. Se puede decir que todos los puntos de esa curva son el valor 0, valor donde empieza a oír el hombre y por tanto son valores de referencia para la escala de medición de la capacidad auditiva. A partir de esta gráfica se puede construir otra donde la línea que antes era curva la hagamos ser completamente plana para todas las frecuencias y la escala de medición será ahora la denominada de decibelios HL (de inglés hearing level). Siendo el valor de esta línea el de 0 dB HL.

Con ellos obtenemos una gráfica que nos sirve para medir directamente la pérdida auditiva de una persona respecto a los umbrales de audición de una persona con oído sano, lo cual es mucho más práctico que si lo medimos en parámetros físicos de pérdida absoluta.

Pero, como está, 0 dB HL no significa que no exista presión acústica, ya que el valor de 0 dB HL se ha obtenido estadísticamente y con diferentes presiones sonoras para las distintas frecuencias. Se pueden dar valores de -5 ó -10 dB HL que indican que esa persona empieza a oír niveles de presión sonora inferiores a los de la media estadística. La siguiente tabla muestra la relación entre dB SPL y dB HL para algunas frecuencias típicas.

Frecuencia (Hz)	Decibelios HL	Decibelios SPL
125	0	45,5
250	0	24,5
500	0	11
1.000	0	6,5
2.000	0	8,5
4.000	0	9

Ya hemos visto, por tanto, que la intensidad de una onda sonora es una magnitud puramente física objetiva y que puede medirse mediante aparatos acústicos. Pero si se escucha una onda sonora cuya intensidad aumenta gradualmente, la sensación también aumenta. Esta sensación se concibe como sonoridad y es una condición subjetiva que no puede medirse con aparatos físicos, aunque sí puede establecerse una escala numérica que nos permite evaluarla.

Weber y Fechner, en 1833 y Robinson y Dadson, en 1956, estudiaron esta cualidad, llegando a la conclusión como ya vimos anteriormente que la respuesta del oído al aumento de la intensidad no era lineal sino proporcional al logaritmo de dicha intensidad. Para realizar la evaluación enviaron un sonido por un oído, el cual produce una sensación de intensidad sonora determinada y a continuación se envía por el otro oído diferentes sonidos de frecuencia 1.000 HZ y de intensidad creciente, hasta que según el paciente, las sensaciones por ambos oídos estén igualadas.

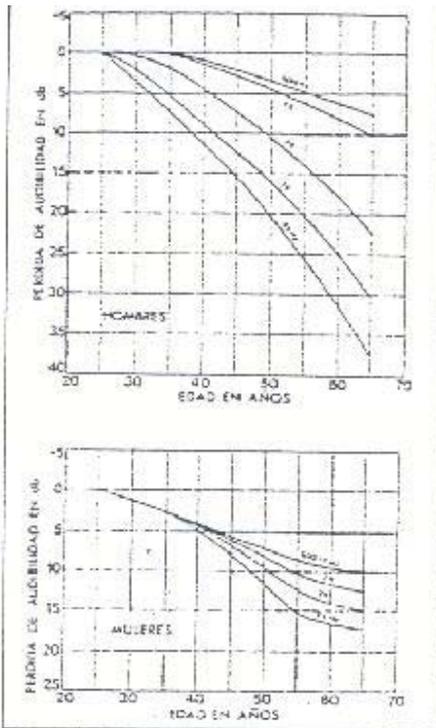
Insertar figura

Repitiendo este experimento para todas las frecuencias se obtienen las llamadas líneas isofónicas, a lo largo de las cuales existe la misma sonoridad, pero que no corresponden a la misma intensidad física.

La unidad de sensación sonora se llama fon, aunque ésta está en desuso y en audiometría se utiliza la medida en dB HL.

Las curvas de igual nivel de intensidad subjetivas también se denominan curvas isófonas o isofónicas y se puede observar que no son paralelas, estando más próximas entre sí las bajas frecuencias que en otros rangos. Por lo tanto, a bajas frecuencias se requiere una variación menor de niveles de presión para producir la misma variación aparente de intensidad en fonos que a otras frecuencias. Por ejemplo, a 30 Hz y bajos niveles se requiere una variación de sólo 5 dB para producir una variación de 10 fonos. Esta característica es importante y se considera en el diseño de amplificadores, ya que si la música se reproduce a un nivel más bajo que la original, se perciben más atenuados los graves, a menos que exista una atenuación adecuada.

Además de los efectos de variación de nivel, se puede observar que a niveles bajos y medios, los sonidos graves requieren tener un nivel de presión mucho mayor para que su nivel intensidad subjetiva sea igual al de los sonidos de frecuencias medias. Un tono de 30 Hz necesita casi 75 dB para tener la misma intensidad aparente de 40 fonos que un tono de 250 Hz o uno de 1.000 Hz a 40 dB. Esto significa que si se están escuchando simultáneamente diversos tonos puros de nivel similar, al reducir en la misma proporción su nivel, eventualmente se perderá la percepción de los sonidos graves.



Efecto de presbiacusis promedio en el hombre y la mujer. La gráfica superior corresponde a la pérdida de agudeza auditiva del hombre en función de la edad, para diversas frecuencias. La gráfica inferior corresponde a la pérdida de agudeza auditiva en la mujer promedio.