

INTRODUCCIÓN A LA PSICOACÚSTICA

Federico Miyara

1. El oído humano

El oído (figura 1) está formado por tres secciones: el oído externo, el oído medio y el oído interno, que pasaremos a describir desde los puntos de vista anatómico y funcional.

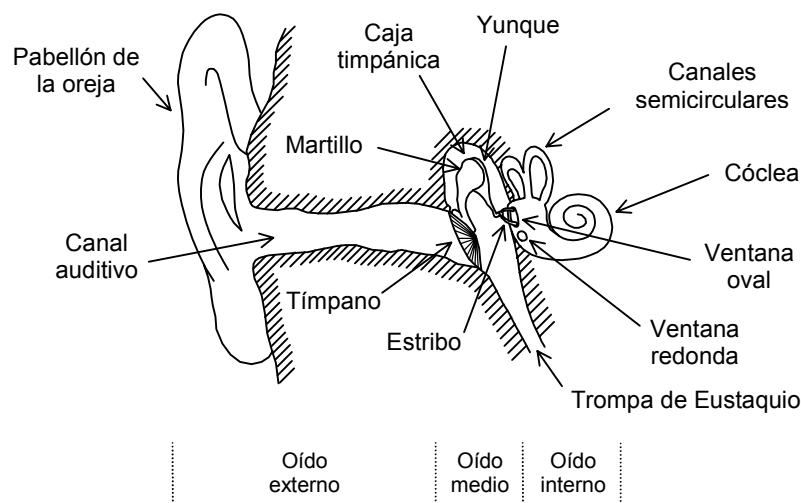


Figura 1. Corte transversal del oído derecho, en el cual se muestran las partes anatómicas más representativas del aparato auditivo.

1.1. Oído externo

Consta del *pabellón* u oreja, y el *canal auditivo externo*. El pabellón recoge las ondas sonoras y las conduce hacia el canal auditivo mediante reflexiones y difracciones. Si bien es direccional, debido a sus irregularidades es menos direccional que la oreja de otros animales, como el gato o el perro, que además poseen control muscular voluntario de su orientación. El canal auditivo, que mide unos 25 mm, conduce el sonido al tímpano. La parte más externa está recubierta por pilosidad y por glándulas sebáceas que segregan *cerumen*. Ejercen una acción higiénica, al fijar y arrastrar lentamente hacia el exterior las partículas de polvo que de otra forma se depositarían en el tímpano. Una segunda función es proteger al oído de ruidos muy intensos y prolongados, ya que la secreción aumenta en presencia de tales ruidos, cerrando parcialmente el conducto. 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, que luego estudiaremos.

1.2. Oído medio

Está ubicado en la caja timpánica, y lo integran el *tímpano*, los *huesecillos* u *osículos*, y la *trompa de Eustaquio*. 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 2) 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 y se ilustra en la figura 2. A causa del efecto palanca las vibraciones del estribo son de menor amplitud pero mayor fuerza. La ganancia mecánica de esta palanca es de 1,3, lo que significa que la fuerza que el estribo ejerce sobre la ventana oval es 1,3 veces mayor que ejerce el tímpano sobre el martillo. A este efecto de palanca se agrega la gran diferencia de áreas entre el tímpano ($0,6 \text{ cm}^2$) y la ventana oval ($0,04 \text{ cm}^2$), lo cual implica que la relación entre las presiones en el tímpano y en la ventana oval es del orden de

$$\frac{P_{\text{ventana oval}}}{P_{\text{tímpano}}} = \frac{1,3 \cdot 0,6}{0,04} \cong 20. \quad (1)$$

Esta diferencia de presiones es necesaria ya que en el tímpano existe una impedancia acústica mucho menor que en el oído interno, ya que éste último contiene agua. El conjunto actúa, por consiguiente, como un ingenioso adaptador de impedancias acústicas.

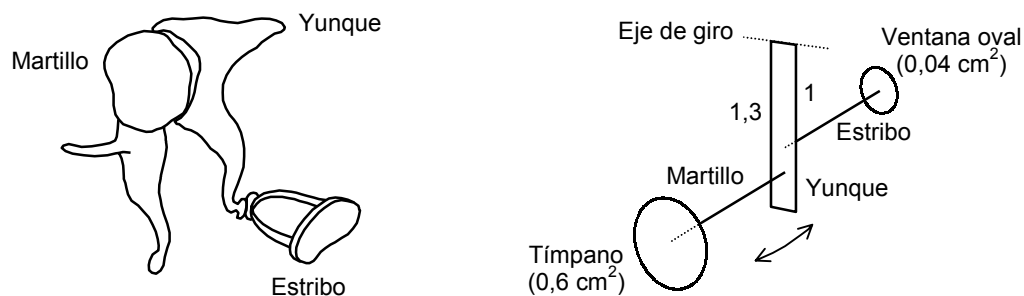


Figura 2. Izquierda, los tres huesecillos del oído medio. Derecha, su mecánica.

Los músculos, además de la función de sostén de la cadena osicular, sirven de protección del oído interno frente a sonidos intensos. Cuando penetra en el oído un ruido muy intenso, se produce la contracción refleja de estos músculos, rigidizando la cadena, que pierde entonces su eficiencia mecánica, y la energía es disipada antes de alcanzar el oído interno. Esta protección sólo es efectiva, sin embargo, para sonidos de más de 500 ms de duración. En caso de lesión o esclerosamiento (endurecimiento) de la cadena osicular sobreviene un tipo de hipoacusia (sordera) caracterizado por una audi-

ción aérea disminuida y ósea normal.¹ En la actualidad es posible reemplazar quirúrgicamente algunas partes por prótesis plásticas.

La trompa de Eustaquio es un pequeño conducto que comunica la caja timpánica con la laringe. Su función es la de igualar la presión del oído medio con la presión atmosférica. Normalmente, permanece cerrada, abriéndose en forma refleja durante la acción de tragar o de bostezar. Si permaneciera siempre abierta, el tímpano vibraría con una amplitud muy pequeña, ya que el movimiento del tímpano es el resultado de una diferencia de presión a uno y otro lado de éste. Por consiguiente, para vibrar en concordancia con las variaciones de presión sonora es preciso que la presión dentro de la caja timpánica se mantenga constante. Si, en cambio, la trompa de Eustaquio estuviera cerrada permanentemente (o no existiera), al variar la presión atmosférica se produciría una diferencia de presiones medias que curvaría el tímpano hacia afuera o hacia adentro, como se indica en la figura 3, reduciendo notablemente la respuesta auditiva, particularmente para los sonidos agudos (altas frecuencias). Esto es lo que sucede en los cambios bruscos de presión que se dan, por ejemplo, al ascender una montaña o al sumergirse varios metros debajo del agua, y el efecto es una sensación de embotamiento. La Naturaleza ha provisto la trompa de Eustaquio, que se abre al tragar, acción que se realiza periódicamente, ya sea en forma voluntaria o involuntaria, debido a la secreción permanente de saliva. La apertura de la trompa de Eustaquio provoca un ruido similar a un pequeño crujido, que el cerebro generalmente no tiene en cuenta, salvo que se preste especialmente atención.

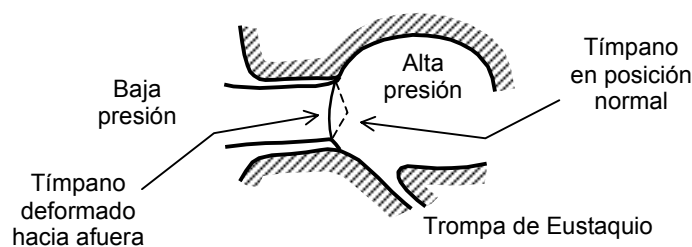


Figura 3. Deformación de la membrana timpánica ante una disminución relativamente rápida de la presión atmosférica.

1.3. 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

¹ La audición aérea corresponde a lo que se escucha a través de la oreja, por ejemplo mediante un auricular, y la audición ósea a lo que se escucha cuando se hace vibrar el cráneo.

ventana oval y *ventana redonda* (también llamada tímpano secundario), cubiertos por sendas membranas de unos 3 mm y 2 mm respectivamente (figura 4). El estribo, última pieza de la cadena osicular, se encuentra adherido a la ventana oval.

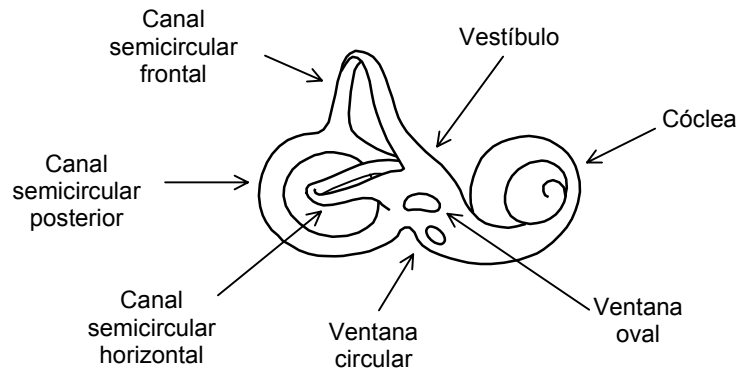


Figura 4. Aspecto idealizado del oído interno. En realidad el caracol y el laberinto son una cavidad en el hueso temporal

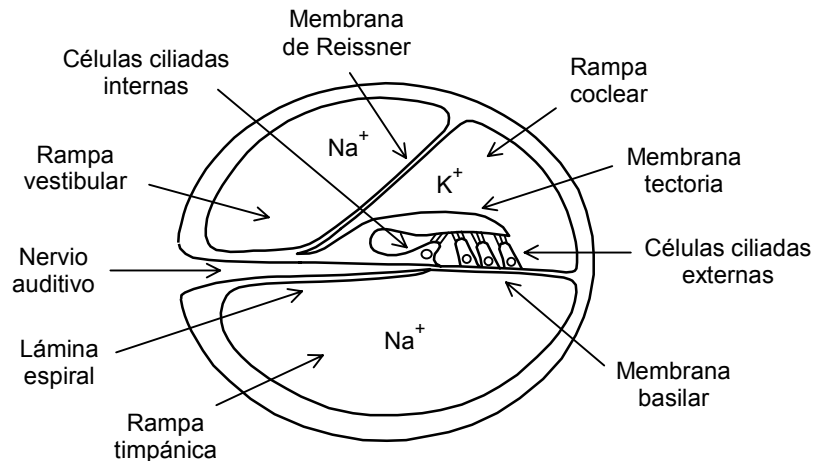


Figura 5. Corte transversal del conducto coclear en escala 25:1.

El caracol contiene el órgano principal de la audición: la *cóclea*, que es un tubo enrollado dos vueltas y media en espiral. Tal como se muestra en la figura 5, 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 5). 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, apli-

cando 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 discriminativa de frecuencias del oído interno. En la figura 6 se muestran dos vistas de la membrana con la cóclea hipotéticamente estirada desde su forma helicoidal hasta una forma rectilínea.

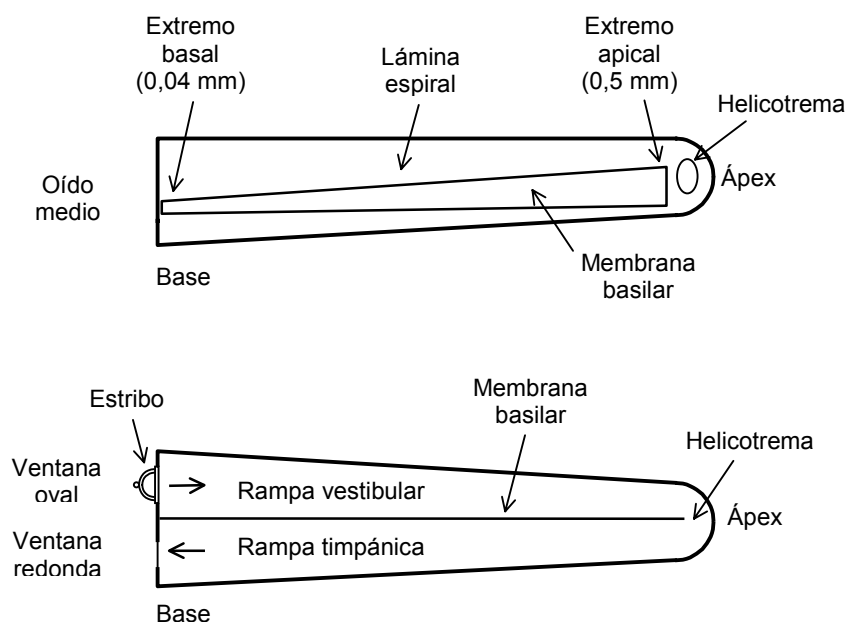


Figura 6. Dos vistas de la cóclea hipotéticamente rectificada. Arriba, vista superior. Abajo, vista lateral.

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 7) 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 9. 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. El mecanismo para ello se ilustra en la figura 10. 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*.

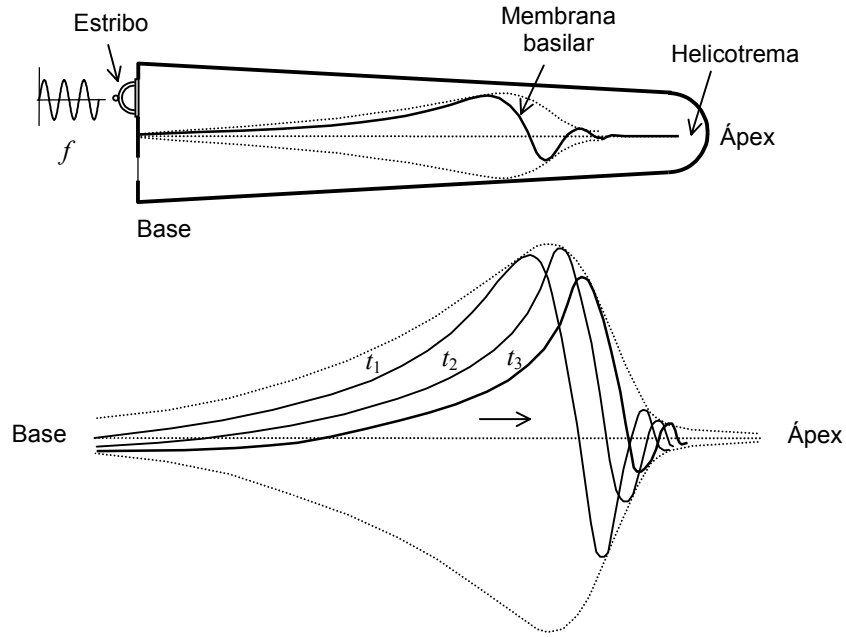


Figura 7. Arriba, onda viajera en la membrana basilar en un instante dado. Abajo, posición de la onda en tres instantes de tiempo t_1 , t_2 y t_3 . Las líneas de trazos indican el lugar geométrico de los picos de la onda conforme ésta va avanzando a lo largo de la membrana.

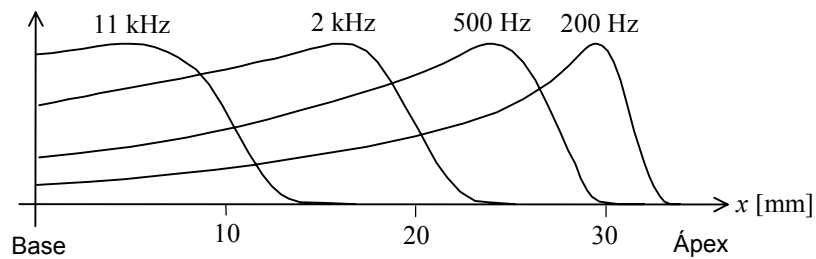


Figura 8. Envoltura espacial de las ondas viajeras sobre la membrana basilar para cuatro frecuencias diferentes.

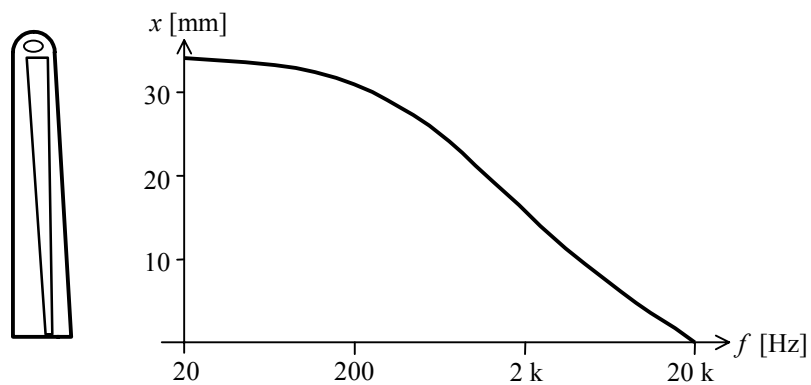


Figura 9. Ubicación de la resonancia a lo largo de la membrana basilar en función de la frecuencia

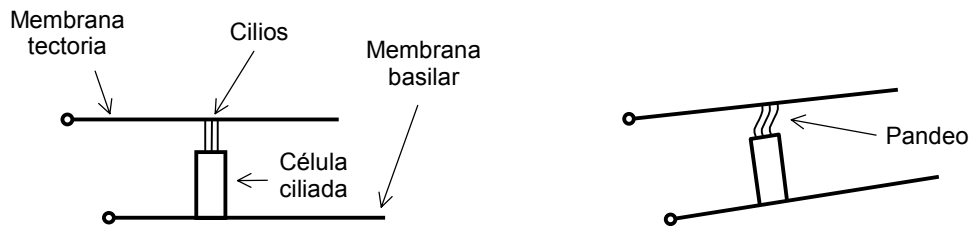


Figura 10. A la izquierda, una célula ciliada entre las membranas basilar y tectoria en estado de reposo. A la derecha, cuando se produce un movimiento de la membrana basilar a causa de una onda viajera, los cilios (pelos) de la célula ciliada experimentan un pandeo.

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. En la figura 11 se ilustra la estructura de una neurona típica, en la que se indican también los contactos con otras neuronas previas y ulteriores.

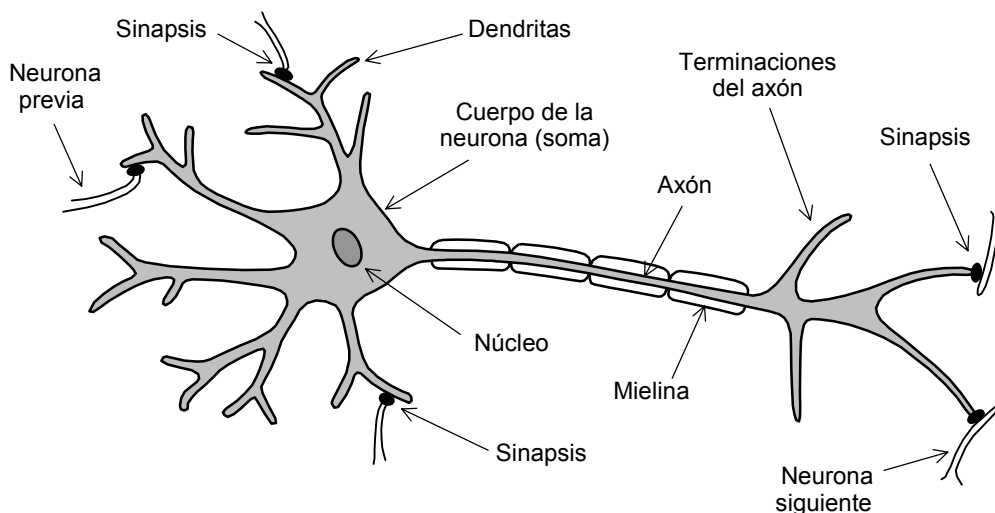


Figura 11. Una neurona típica, en la que se aprecian las dendritas que reciben potenciales de acción de las neuronas previas (o de las células sensorias, como las células ciliadas) a través de las sinapsis, el cuerpo o soma con su núcleo, el axón recubierto con mielina, y sus terminaciones que conectan con las dendritas de nuevas neuronas.

La neurona recibe potenciales de acción provenientes de neuronas anteriores o de células sensorias (como las células ciliadas) a través de las *dendritas*. Los puntos de contacto se denominan *sinapsis*. Las dendritas realizan una especie de suma ponderada de las señales recibidas, y si ésta excede cierto umbral, el propio cuerpo de la neurona descarga un nuevo potencial de acción de 90 mV y unos 2 ms de duración. Al terminar este pulso sobreviene un tiempo durante el cual no puede volver a emitir pulsos, denominado *período refractario*. El potencial de acción generado se propaga en forma de

onda a lo largo del *axón* hasta las siguientes neuronas. La velocidad de propagación depende de si el axón está o no recubierto por una sustancia aisladora llamada *mielina*. Para las neuronas no mielinizadas es de alrededor de 1 m/s, en tanto que para las neuronas recubiertas con mielina² puede superar los 100 m/s. Una vez alcanzadas las terminaciones del axón, el potencial de acción se transmite a las otras neuronas a través de los contactos sinápticos.

Cuando se aplica un potencial constante en las dendritas de una neurona, el potencial de la neurona tiende a acercarse, con cierta constante de tiempo, al potencial aplicado. Si el potencial aplicado es suficientemente alto, en algún momento se supera el umbral y se produce el disparo, volviendo la neurona a su estado inicial. Después de completarse el período refractario, el ciclo vuelve a empezar, lo cual lleva a que se genere un tren de potenciales de acción. La frecuencia de este tren de pulsos aumenta al aumentar el potencial constante aplicado. Resulta, así, que la neurona se comporta en forma similar a un modulador de frecuencia, codificando las señales recibidas a través de la frecuencia de los potenciales de acción.

La señal que reciben las neuronas que inervan el oído interno proviene de las células sensoriales conectadas a la membrana basilar (células ciliadas internas). Cuando la membrana se encuentra en reposo (no es excitada por ningún sonido), estas células producen suficiente señal como para estimular una emisión espontánea de potenciales de acción con determinada frecuencia promedio.³ Cuando aparece un sonido, los movimientos hacia arriba y hacia abajo de la membrana basilar aumentan y disminuyen respectivamente el nivel de señal de las células sensoriales, de tal manera que en un caso la frecuencia aumenta y en el otro disminuye. Sin embargo, dado que el período refractario de las neuronas es del orden de 2 ó 3 ms, para frecuencias mayores de unos 300 Hz, esta variación de frecuencia no puede manifestarse directamente, sino que lo hace en forma estadística. El resultado es una tendencia a alcanzar una suerte de “sincronismo” entre la onda mecánica en la membrana basilar (y, por consiguiente, el sonido que la excita) y las emisiones de potenciales de acción. Este sincronismo se refiere a que los intervalos entre potenciales de acción tienden a ser múltiplos aproximados del período de la señal sonora. La corteza cerebral utiliza esta codificación para asignar una altura a un tono.

Es interesante destacar que las curvas de resonancia de la figura 8 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 5) como elementos contráctiles. Estas células realimentan el sistema agudizando la resonancia.

2. Umbrales 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

² La mielina reduce la capacidad eléctrica entre el axón y el medio exterior, disminuyendo así el tiempo necesario para cargar esa capacidad. Esto acelera la propagación de los pulsos.

³ El nivel umbral, así como la salida de las células sensoriales, están en realidad contaminados por una considerable cantidad de ruido, lo cual hace que la frecuencia de emisión fluctúe aleatoriamente alrededor de un valor medio.

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
- 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.

3. La “ley” de Weber - Fechner

Esta es una ley empírica que en realidad no se cumple perfectamente, sobre todo fuera del rango central de intensidades de los estímulos. Sin embargo, es indicativa del fenómeno de *compresión* que caracteriza a la percepción sensorial. Denominando *diferencia apenas perceptible (DAP)* al umbral diferencial, Weber concluyó, en 1834, que la *DAP* es proporcional a la intensidad física del estímulo, *E*,

$$DAP = K \cdot E \quad (2)$$

o, lo que es lo mismo, que el incremento relativo de intensidad del estímulo correspondiente a una *DAP* es constante. Fechner fue aún más lejos, postulando en 1860 que la *DAP* corresponde subjetivamente a un incremento constante en la sensación provocada por el estímulo. Dicho de otro modo, el incremento en la sensación correspondiente a una *DAP* puede ser considerado como la *unidad de sensación*.

Si E es el estímulo y S a la medida de la sensación, buscamos una relación funcional $S = f(E)$ entre ambas que se desprenda de la ley de Weber y el postulado de Fechner. Sean E y E' dos estímulos que difieran en una *DAP*, es decir

$$E' - E = DAP.$$

Podemos escribir

$$S' - S = f(E') - f(E) \cong f'(E) \cdot DAP.$$

Por la ley de Weber,

$$S' - S = f'(E) \cdot K \cdot E,$$

Asimismo, adoptando como unidad de sensación la provocada por una *DAP* por el postulado de Fechner,

$$S' - S = 1.$$

Se llega así a la ecuación

$$f'(E) = \frac{1}{K \cdot E} \quad (3)$$

que, integrada, resulta en

$$f(E) = C \ln \left(\frac{E}{E_0} \right), \quad (4)$$

donde $C = 1/K$, y E_0 es un valor de referencia arbitrario (tomado habitualmente como el umbral absoluto). En términos de la sensación:

$$S = C \ln \left(\frac{E}{E_0} \right), \quad (5)$$

Esta relación logarítmica constituye la ley de Weber-Fechner, y como ya se señaló, en general sólo tiene validez en el rango medio de los estímulos.

4. La percepción de la altura

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), 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.

4.1. 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, aplicando el postulado de Fechner. El parámetro físico que varía es la frecuencia de un tono puro (senoidal), permaneciendo fija la intensidad. Resulta que hasta los 1000 Hz, la *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 ley de Weber sólo se cumple para las frecuencias mayores de 1000 Hz. Si admitimos el postulado de Fechner, la medida de la altura obtenida a partir de la *DAP* será lineal para $f \leq 1000$ Hz y logarítmica para $f > 1000$ Hz, es decir

$$A(f) = \begin{cases} K_1 & f \leq 1000 \text{ Hz} \\ K_2 \ln(f / f_0) & f > 1000 \text{ Hz} \end{cases} \quad (6)$$

Las constantes se determinan fácilmente si se adopta una escala para la altura. Lo más habitual es tomar como unidad el *mel*, que se define de modo que para $f = 1000$ Hz se tenga $A(f) = 1000$ mel. Resulta

$$\begin{aligned} K_1 &= 1 \text{ mel/Hz} \\ K_2 &= 1000 \text{ mel} \\ f_0 &= 370 \text{ Hz.} \end{aligned} \quad (7)$$

En la figura 12 se representa gráficamente esta función.

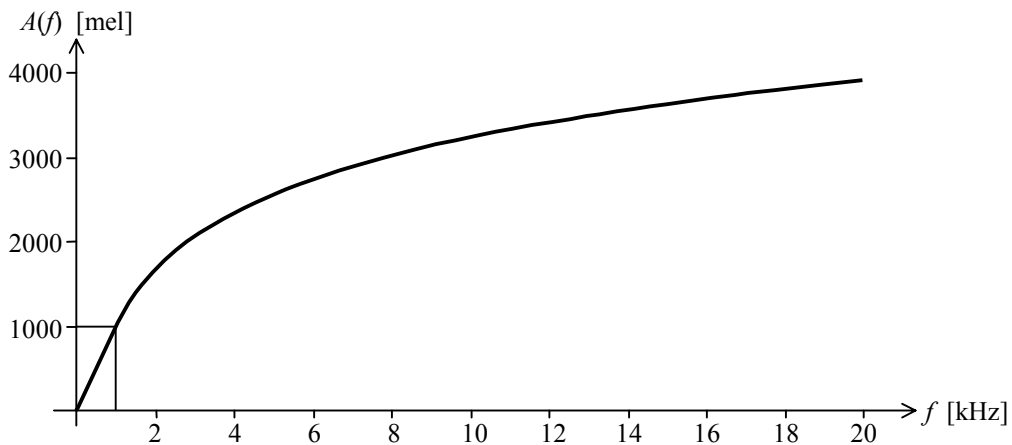


Figura 12. Relación entre la altura A y la frecuencia f tal como se obtiene aplicando el postulado de Fechner. Entre 0 y 1 kHz la relación es lineal y por encima de 1 kHz, logarítmica.

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.

4.2. Escala proporcional de altura

La construcción de una escala de altura a partir del umbral diferencial tiene el inconveniente de que, contrariamente a lo especulado por Fechner, la percepción humana le asigna diferente importancia al umbral diferencial según el valor del estímulo (en este caso, la frecuencia). Una clase completamente diferente de experimentos que permite elaborar otro tipo de escala consiste en tomar un tono de referencia, por ejemplo 1000 Hz , y ajustar la frecuencia de un segundo tono de manera tal que éste parezca el doble de agudo que el otro. Repitiendo el experimento con diversas frecuencias de referencia es posible elaborar una escala de tipo proporcional. La escala obtenida se muestra en la figura 13, en la que también se repite la relación anterior para comparación.

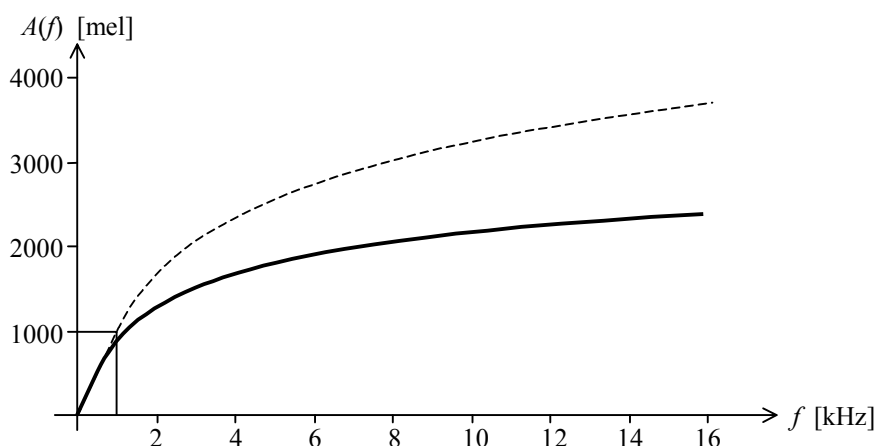


Figura 13. Relación entre la altura A y la frecuencia f obtenida a partir de experimentos de proporcionalidad entre sensaciones. En línea de trazos, la altura obtenida a partir de los umbrales diferenciales y el postulado de Fechner. Ambas escalas coinciden por debajo de 500 Hz .

Por debajo de 500 Hz ambas escalas coinciden ya que el crecimiento es lineal. Se observa que para alta frecuencia la escala proporcional ejerce una compresión mayor que la basada en el umbral diferencial, alcanzando un valor de apenas 2400 mel en 16 kHz .

Las dificultades para establecer esta escala experimentalmente son mucho mayores, ya que se requiere de los sujetos un juicio relacional para el que, por añadidura, no

disponen de referencias previas asimiladas. La determinación de umbrales diferenciales es más simple pues requiere sólo un juicio binario sobre si se percibe o no alguna diferencia entre dos estímulos.

4.3. La teoría “del lugar”

Si se dibuja la escala en mel en un diagrama semilogarítmico y si en la figura 9 (que indicaba la posición de la máxima amplitud de vibración de la membrana basilar en función de la frecuencia) se toma la distancia desde el ápex en lugar de la base, se obtienen dos curvas muy similares (figura 14). Esto sugiere que hay una relación lineal entre la escala en mel y las posiciones sobre la membrana. Es la denominada *teoría del lugar*, según la cual hay una correspondencia directa entre la representación espectral del sonido y su representación espacial en la cóclea. Esta teoría es parcialmente válida, especialmente para frecuencias superiores a los 1000 Hz. Para frecuencias inferiores existen otros mecanismos complementarios que luego veremos.

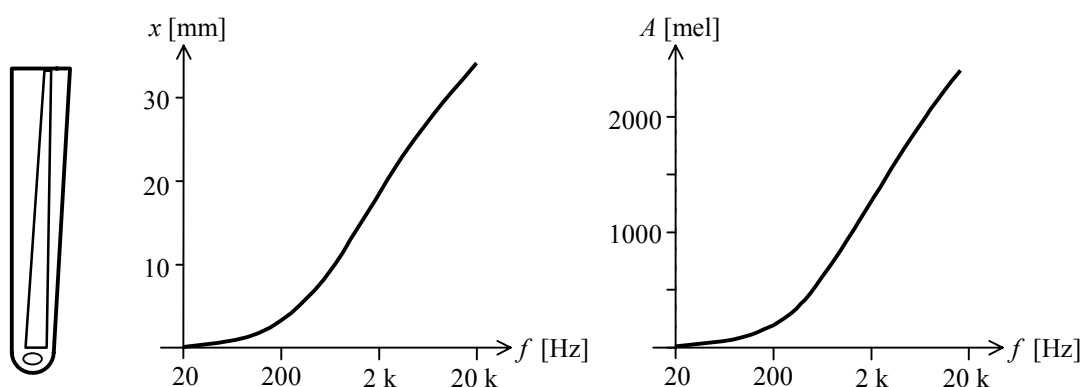


Figura 14. Posición del punto de máxima oscilación a lo largo de la membrana basilar y altura en la escala mel, las dos en función de la frecuencia. La similitud de ambas curvas sugiere una relación lineal entre la altura y la posición de la resonancia.

Esta teoría se inició con Hermann Helmholtz, en el siglo XIX. Helmholtz creía que las células ciliadas ubicadas sobre la membrana basilar (denominadas fibras de Corti) se comportaban como cuerdas, resonando selectivamente con la frecuencia de la misma manera en que lo haría el encordado de un piano sin sus apagadores (o con el pedal derecho oprimido). El mismo Helmholtz encontraba muy difícil de justificar la resonancia para el caso de las frecuencias más bajas, debido a las exiguas dimensiones de dichas fibras. Una comprensión más satisfactoria de la mecánica de la membrana basilar se logró en 1940, con los trabajos de Georg Békésy, quien realizando experimentos sobre cócleas recién extraídas de cadáveres pudo comprobar que era la propia membrana basilar la que se comportaba en forma selectiva, a través de la aparición de “ondas viajeras” como la indicada en la figura 7. No logró, no obstante, explicar la gran agudeza de la discriminación de frecuencias, fenómeno que recién se dilucidaría al descubrirse la contractibilidad de las células ciliadas externas.

4.4. La altura musical o armónica

Las escalas mencionadas anteriormente no tienen en cuenta la incidencia de los aspectos culturales en la valoración de la altura. Una de las principales manifestaciones culturales relacionadas con la altura es la música.

En el caso de la música occidental tradicional, la escala de alturas se rige en realidad por una ley perfectamente Weberiana, como lo es la *escala cromática*, cuyo mínimo intervalo semánticamente significativo es el *semitono*, que también se utiliza como unidad. Un *semitono* equivale a una relación de frecuencias de $2^{1/12} \cong 1,05946$. Así, la altura expresada en semitonos será

$$A_s(f) = K \cdot \ln(f/f_0) \quad (8)$$

Así, si f_2 y f_1 difieren en un semitono, entonces

$$A_s(f_2) - A_s(f_1) = 1. \quad (9)$$

Pero

$$A_s(f_2) - A_s(f_1) = K (\ln(f_2/f_0) - \ln(f_1/f_0)) = K \cdot \ln(f_2/f_1). \quad (10)$$

Combinando (9) y (10) resulta

$$K = \frac{1}{\ln(f_2/f_1)} = \frac{1}{\ln(2^{1/12})} = \frac{12}{\ln 2}, \quad (11)$$

de donde

$$A_s(f) = 12 \frac{\ln(f/f_0)}{\ln 2} \quad (12)$$

donde f_0 es la primera frecuencia de la escala. En el caso particular en que $f/f_0 = 2$, es decir una octava, resulta $A_s(f) = 12$ semitonos.

A pesar de que la escala cromática de la música occidental es Weberiana, no satisface el postulado de Fechner, ya que la cantidad de *DAP's* en cada semitono no es constante por debajo de 1000 Hz.

En la figura 15 se compara la escala proporcional de altura con la escala cromática de la música occidental tradicional. Con un pequeño círculo se ha identificado el LA 440 Hz utilizado como patrón internacional de afinación (Norma ISO 16).

En la tabla 1 se indican las frecuencias de los diversos sonidos de la escala cromática a lo largo de las 5 octavas más habituales. Con cierto entrenamiento auditivo es posible utilizar la tabla 1 para determinar aproximadamente la frecuencia de un ruido tonal, lo cual puede ser muy útil cuando no se dispone de un analizador de espectro. Para ello se requiere haber adquirido, por ejercitación, el *oído relativo* u *oído interválico*, por medio del cual se pueden reconocer los intervalos musicales⁴ con respecto al

⁴ Los intervalos musicales corresponden a la relación entre dos sonidos correspondientes a una escala musical. Musicalmente se denotan en términos de la cantidad de sonidos dentro de la escala entre ambos, incluidos ellos mismos. Por ejemplo, una *quinta* es el intervalo entre un *do* y un *sol* pues en la secuencia do-re-mi-fa-sol hay 5 notas. También pueden describirse en términos de la relación de frecuencias, lo cual es más útil para el acústico. Por ejemplo, la quinta corresponde a una relación de 3/2. La forma habitual de reconocer estos intervalos es por comparación con el comienzo de algunas canciones conocidas. Por ejemplo, "Fray Santiago" comienza con una segunda (relación de frecuencias 1,122); "Sobre el Puente de Avignon", comienza con una tercera (relación de frecuencias 5/4); "Mambrú se fue a la guerra", comienza con una cuarta (relación de frecuencias 4/3).

LA. Luego, por medio de un patrón de frecuencia, por ejemplo un diapasón de afinador de 440 Hz,⁵ se puede determinar la nota correspondiente al ruido tonal, y de allí su frecuencia.

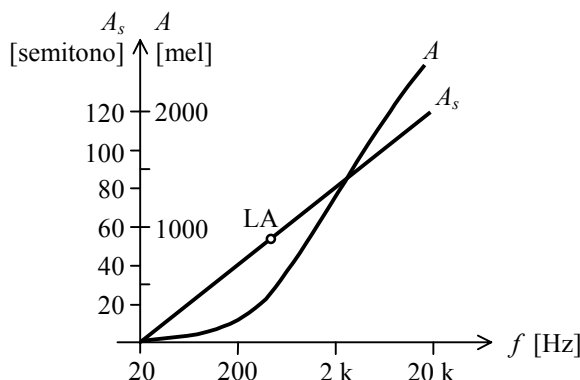


Figura 15. Comparación entre las escalas proporcional (escala mel) y musical (escala cromática).

TABLA 1. Frecuencias correspondientes a las notas de las octavas 2 a 7. Se ha remarcado la frecuencia normalizada del LA 440 Hz.

NOTA	Frecuencia [Hz]					
	Octava 2	Octava 3	Octava 4 (central)	Octava 5	Octava 6	Octava 7
DO	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00
DO#	69,30	138,59	277,18	554,36	1108,73	2217,46
RE	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32
RE#	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02
MI	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02
FA	87,31	174,61	349,23	698,45	1396,91	2793,83
FA#	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96
SOL	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96
SOL#	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44
LA	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00
LA#	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31
SI	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07

En la figura 16 se muestra el aspecto de un teclado de 5 octavas típico y la representación de las alturas correspondientes en la notación musical.

4.5. Superposición de tonos puros

Hasta ahora habíamos estudiado el caso de un único tono puro excitando el oído. A la sencillez del análisis de este caso se opone el hecho de que los tonos puros son extremadamente raros en la naturaleza, razón por la que será necesario analizar el caso de los sonidos compuestos.

⁵ Algunas personas poseen el don natural del oído absoluto, que les permite reconocer la altura absoluta de los sonidos sin necesidad de referenciarla a una altura conocida.

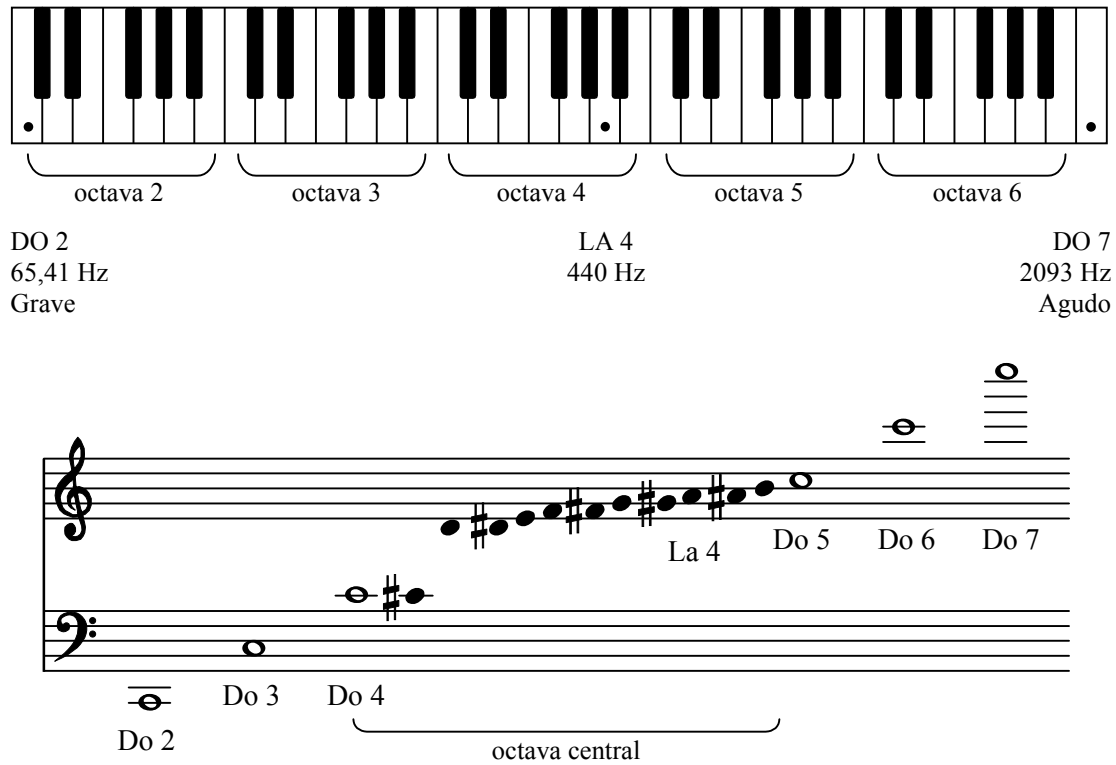


Figura 16. Relación entre la frecuencia y la altura musical en un teclado de 5 octavas. En el teclado se han marcado el LA central, cuya frecuencia se encuentra normalizada internacionalmente a 440 Hz, y los sonidos más grave (DO 2 de 65,41 Hz) y más agudo (DO 7, de 2093,00 Hz). En los pentagramas de abajo se muestran, en notación musical, los DO correspondientes a las diversas octavas y todas las notas de la octava central.

Supongamos que tenemos dos tonos puros de frecuencias angulares ω_1 y ω_2 y amplitudes A y B superpuestos. Luego de algunos cálculos, la superposición de ellos es⁶

$$A \sin \omega_1 t + B \sin \omega_2 t = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos \Delta\omega t} \sin [\omega t + \varphi(t)] \quad (13)$$

donde

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1, \quad (14a)$$

$$\omega = \frac{\omega_2 + \omega_1}{2}, \quad (14b)$$

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{A-B}{A+B} \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta\omega}{2} t \right) \right]. \quad (14c)$$

⁶ Para demostrar esta igualdad se toman las identidades $\omega_1 = \omega + \Delta\omega/2$, $\omega_2 = \omega - \Delta\omega/2$, donde ω y $\Delta\omega$ son los definidos en las ecuaciones (14), y luego se aplican las fórmulas trigonométricas del seno de una suma y una resta.

Aparece una modulación de amplitud (AM) y otra de fase (PM). Esta última carece de importancia, dado que el efecto de la modulación de amplitud es siempre mucho más notorio que el de modulación de fase. En el caso en que $A = B$ la superposición se reduce a

$$A \sin \omega_1 t + B \sin \omega_2 t = 2A (\cos \frac{1}{2} \Delta \omega t) \cdot \sin \omega t. \quad (15)$$

Sólo subsiste la modulación de amplitud. Ambos casos se ilustran en la figura 17.

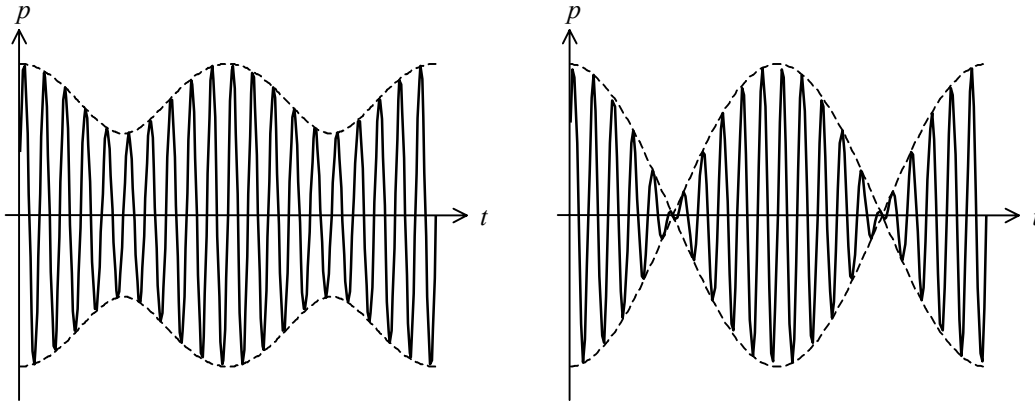


Figura 17. Superposición de dos tonos puros de frecuencias próximas. Izquierda: de diferente amplitud. Derecha: de igual amplitud.

Dado que para pequeñas amplitudes la membrana basilar se comporta linealmente, cuando dos tonos no muy intensos llegan a ella sus efectos pueden superponerse. Dependiendo de la diferencia relativa entre las dos frecuencias hay tres situaciones posibles.

1er CASO: $\Delta \omega \ll \omega_1, \omega_2$

Como ambos tonos son de frecuencias muy próximas, excitan prácticamente la misma zona de la membrana basilar, sumándose sus efectos. Aparece así un tono de frecuencia $\omega \cong \omega_1 \cong \omega_2$, modulado en amplitud por una baja frecuencia $\Delta \omega$, dando origen al fenómeno de *batido* o *pulsaciones*, que se percibe como un tono cuya intensidad fluctúa periódicamente entre un mínimo y un máximo. La membrana basilar es un resonador poco selectivo, y por lo tanto también poco persistente, lo cual implica que responde con rapidez a las variaciones de amplitud de las pulsaciones.⁷

Es importante señalar que ni el oído ni el cerebro son capaces de distinguir entre los dos sonidos, y esto se debe a que al estar los máximos de las vibraciones de la membrana basilar muy próximos, la suma de las respuestas tiene un solo máximo ubicado a mitad de camino entre los máximos que producirían los tonos individuales (figura 18).

⁷ Debe notarse que si bien la membrana basilar puede considerarse lineal para bajas amplitudes la transducción mecanoeléctrica que llevan a cabo las células ciliadas no lo es, de allí que pueda efectuarse un proceso análogo al de la detección de AM.

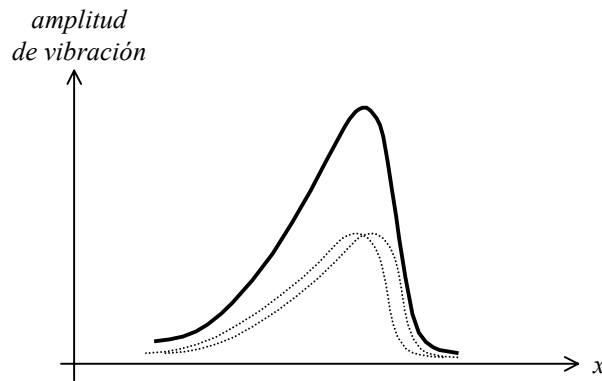


Figura 18. En líneas de trazos, las envolventes espaciales de la vibración de la membrana basilar para dos tonos de frecuencias próximas. En línea llena, la envolvente de la superposición de ambos tonos.

Este resultado tiene validez solamente cuando los tonos son puros, ya que al utilizar tonos compuestos el cerebro dispone de otras claves que permiten discriminar o separar los tonos. Es interesante señalar que aún superado ampliamente el umbral diferencial (*DAP*) de frecuencia para los sonidos en sucesión, cuando éstos son simultáneos no es posible discriminar las frecuencias individuales.

2do CASO: $\Delta\omega > \Delta\omega_d$

La frecuencia $\Delta\omega_d$ es el *límite de discriminación de frecuencias*, por encima del cual se pueden percibir las alturas individuales de ambos sonidos, aunque acompañados de una sensación de agitación o disonancia. Este límite, válido para tonos puros simultáneos, no debe confundirse con el umbral diferencial, que corresponde a una sucesión de sonidos. El límite de discriminación para tonos simultáneos es, normalmente, mucho mayor que el umbral para tonos consecutivos.

En este caso, al sumar las respuestas de la membrana basilar, dado que los máximos correspondientes a cada una de las frecuencias están suficientemente separados, se obtiene una respuesta con dos máximos, evocando cada uno de ellos una sensación de altura diferente (figura 19). Las alturas evocadas son cercanas a las que evocarían los sonidos presentados individualmente, aunque no necesariamente coinciden exactamente con éstas, ya que los máximos aparecen algo desplazados al sumarles una función creciente o decreciente. En la zona intermedia entre ambas frecuencias, la membrana basilar sigue vibrando con amplitud pulsante, aunque con una frecuencia de batido mucho más alta, dando origen a la sensación de agitación o aspereza.

Es interesante constatar que debido a la asimetría de la curva de resonancia espacial, a igual amplitud de vibración de la membrana basilar, en la posición correspondiente al tono más grave la amplitud resultante es mayor.

3er CASO: $\Delta\omega > \Delta\omega_c$

Si se sigue aumentando la diferencia de frecuencias entre ambos sonidos, se llega a la frecuencia $\Delta\omega_c$, o *banda crítica*, por encima de la cual desaparece toda sensación de rugosidad, aspereza o agitación, escuchándose los dos sonidos separadamente y sin que interactúen entre sí.

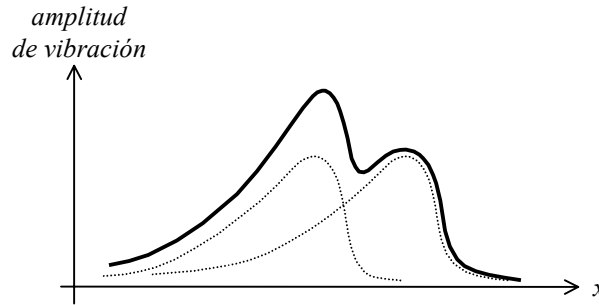


Figura 19. En líneas de trazos, las envolventes espaciales de la vibración de la membrana basilar para dos tonos de frecuencias cuya separación es mayor que el umbral de discriminación simultánea $\Delta\omega_d$. En línea llena, la envolvente de la superposición de ambos tonos, en la que se observa la presencia de máximos separados.

Desde el punto de vista de la membrana basilar, lo que sucede es que los picos están ahora lo suficientemente separados como para que el efecto de cada uno de los tonos sobre la zona de la membrana correspondiente al otro tono sea despreciable. Bajo estas condiciones la zona intermedia también se ve poco afectada, siendo las pequeñas pulsaciones que allí se generan enmascaradas por el efecto principal de los dos tonos. En la figura 20 se ilustra esta situación.

La banda crítica puede considerarse como una especie de ancho de banda que comprende todas aquellas frecuencias que tienen influencia significativa en un determinado punto de la membrana basilar.

La existencia de la banda crítica $\Delta\omega_c$ es una característica fundamental del oído, que tiene profundas consecuencias sobre su funcionamiento. En particular determina la capacidad de discriminar sonidos en presencia de otros sonidos, así como muchas propiedades psicoacústicas como, por ejemplo, de qué manera se percibe la intensidad de un conjunto de sonidos.

Tanto $\Delta\omega_d$ como $\Delta\omega_c$ dependen en general de la frecuencia, como se indica en la figura 21. La banda crítica es casi constante por debajo de 400 Hz. En la tabla 4 se dan los anchos de banda de un conjunto de bandas críticas que cubren casi todo el rango audible.

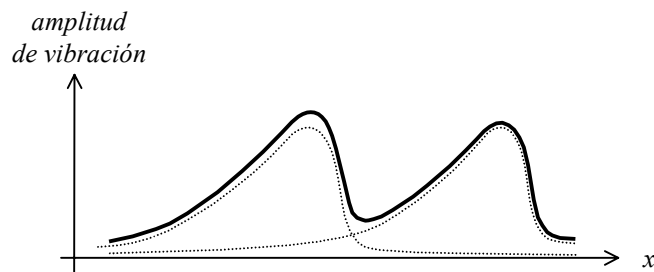


Figura 20. En líneas de trazos, las envolventes espaciales de la vibración de la membrana basilar para dos tonos de frecuencias cuya separación excede la banda crítica $\Delta\omega_c$. En línea llena, la envolvente de la superposición de ambos tonos.

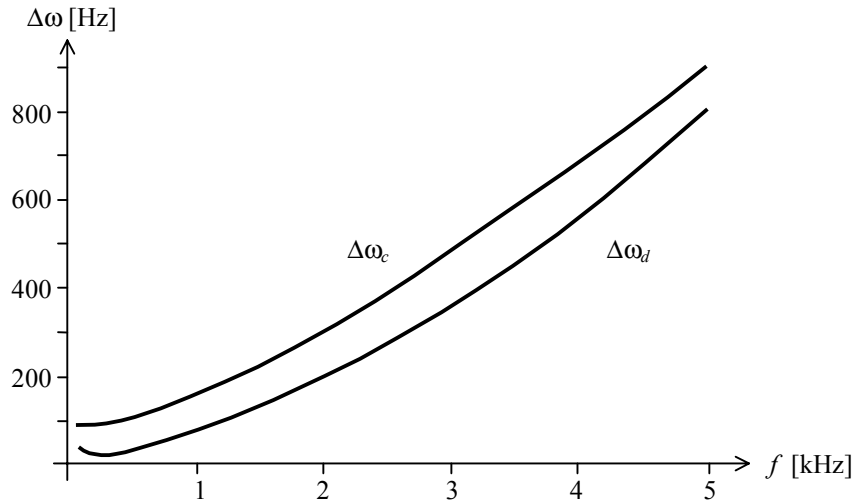


Figura 21. Límite de discriminación para tonos puros simultáneos, $\Delta\omega_d$, y banda crítica, $\Delta\omega_c$, ambos en función de la frecuencia.

4.6. Fenómenos no lineales en el oído

Hasta ahora habíamos supuesto que tanto en el tímpano como en la cadena de huesecillos, así como en la membrana basilar, valía el principio de superposición, hipótesis que tiene validez sólo para niveles de presión sonora pequeños. Para intensidades sonoras grandes, el sistema mecánico del oído deja de ser lineal y, por consiguiente, al recibir un tono puro (senoidal) de suficiente intensidad, se produce una distorsión caracterizada por la generación de una serie de armónicos. Estos armónicos son audibles, y de hecho existen realmente en la membrana basilar y excitan las correspondientes zonas. En efecto, si la transferencia no lineal entre la entrada x y la salida y es de la forma

$$y = f(x) \quad (16)$$

entonces para $x(t) = \sin \omega t$ se tiene

$$y(t) = f(\sin \omega t), \quad (17)$$

que es una función periódica de igual frecuencia que $x(t)$ que, según el teorema de Fourier, posee armónicos, 2ω , 3ω , etc. Éstos se denominan *armónicos aurales*, por estar generados en el propio oído. Un caso similar lo constituye la superposición de dos tonos puros e intensos. En este caso, si llegan al oído dos sonidos $A_1 \sin \omega_1 t$ y $A_2 \sin \omega_2 t$, resulta

$$y(t) = f(A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t). \quad (18)$$

Podemos reemplazar $f(x)$ por su desarrollo de Taylor:

$$f(x) = \sum_{h=0}^{\infty} b_h x^h \quad (19)$$

Cuando $x = x_1 + x_2$ resulta

$$f(x_1 + x_2) = \sum_{h=0}^{\infty} b_h (x_1 + x_2)^h = \sum_{h=0}^{\infty} b_h \sum_{n=0}^h \binom{h}{n} x_1^n x_2^{h-n} \quad (20)$$

Puede invertirse el orden de las sumatorias tomando la precaución de que $h \geq n$:

$$f(x_1 + x_2) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{h=n}^{\infty} b_h \binom{h}{n} x_1^n x_2^{h-n} = \sum_{m,n=0}^{\infty} b_{m+n} \binom{m+n}{n} x_1^n x_2^m \quad (21)$$

Sustituyendo, resulta

$$y(t) = \sum_{n,m=0}^{\infty} a_{nm} \sin^n \omega_1 t \sin^m \omega_2 t. \quad (22)$$

donde

$$a_{nm} = b_{m+n} \binom{m+n}{n} A_1^n B_1^m. \quad (23)$$

Las potencias de una senoide pueden expresarse como una serie de Fourier finita:

$$\sin^n a = \sum_{k=0}^n C_{nk} \sin(k \cdot a + \varphi_{nk}), \quad (24)$$

luego

$$\sin^n \omega_1 t \sin^m \omega_2 t = \sum_{k=0}^n \sum_{h=0}^m C_{nk} C_{mh} \sin(k\omega_1 t + \varphi_{nk}) \sin(h\omega_2 t + \varphi_{nh}) \quad (25)$$

Aplicando a cada producto de senos la identidad

$$\sin a \cdot \sin b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) - \cos(a + b)], \quad (26)$$

podemos concluir que todos los términos de (25) son senoides cuyas frecuencias angulares son de la forma

$$\omega = k\omega_1 \pm h\omega_2 \quad (27)$$

de donde se obtiene, reemplazando en (22) y agrupando términos de igual frecuencia,

$$y(t) = \sum_{n,m=0}^{\infty} b_{nm} [\cos((n\omega_1 - m\omega_2)t + \varphi_{nm}) - \cos((n\omega_1 + m\omega_2)t + \psi_{nm})]. \quad (28)$$

Resulta así que en el espectro de la salida aparecen tonos de frecuencias

$$f = n f_1 \pm m f_2, \quad (29)$$

con n, m enteros. Estos tonos se llaman *sonidos combinacionales*, de los cuales en general el más intenso es el denominado *sonido diferencial*, de frecuencia $|f_1 - f_2|$. Este sonido es perfectamente audible, y puede verificarse experimentalmente haciendo sonar dos tonos intensos, uno de frecuencia 1000 Hz y el otro de frecuencia variable,⁸ inicialmente de 1000 Hz. Al pasar por 1020 Hz, comienza a percibirse un tono de 20 Hz que va subiendo. Al llegar a 1100 Hz, por ejemplo, el tono escuchado tiene 100 Hz y se percibe con gran nitidez.

Los sonidos combinacionales fueron descubiertos por Sorge, organista alemán del siglo XVIII, en 1745, aunque son generalmente atribuidos al violinista italiano Giuseppe Tartini quien los redescubrió en el violín en 1754.

Una aplicación interesante es la reconstrucción de la fundamental perdida por insuficiente respuesta en los bajos a partir de los armónicos. Esto sucede, por ejemplo, en las radios portátiles de bajo precio, cuyos parlantes son incapaces de reproducir eficientemente los sonidos de frecuencia inferior a los 100 Hz. Ello implicaría que la voz masculina, por ejemplo, quedaría totalmente distorsionada al faltarle el primer armónico, que se encuentra en esa banda de frecuencia. Pero dado que los armónicos siguientes son reproducidos aceptablemente, están presentes las frecuencias $2f, 3f, 4f$, etc., que permiten generar en el oído el armónico fundamental como sonido diferencial entre cualquier par de armónicos consecutivos, por ejemplo

$$3f - 2f = f.$$

Por este motivo, los sonidos diferenciales se suelen denominar también *subarmónicos*, ya que corresponden a sonidos cuyos armónicos son los tonos que les dan origen. Es interesante mencionar que el compositor alemán Paul Hindemith (siglo XX), propugnaba un sistema armónico en el cual cualquier acorde de dos sonidos podía completarse con los sonidos diferenciales de éstos.

Veremos luego que la reconstrucción de la fundamental no se restringe al caso de una superposición de sonidos intensos, sino que el cerebro dispone de otros mecanismos que permiten identificar la fundamental a partir de los armónicos aún cuando la intensidad de éstos no sea suficiente como para originar sonidos diferenciales apreciables.

4.7. Fenómenos auditivos a nivel neuronal

Los fenómenos analizados anteriormente se caracterizaban por estimular en la membrana basilar la aparición de ciertas componentes sonoras (tales como los tonos combinacionales) que no estaban incluidas en el sonido original. Estas componentes sonoras, realmente tienen existencia física en el oído interno, pero para que esto suceda los sonidos que llegan deben ser suficientemente intensos como para que se exceda el rango de respuesta lineal. Existen, sin embargo, diversas situaciones que no pueden atribuirse al comportamiento alineal del oído, dado que la intensidad sonora es pequeña. En estos casos tiene importancia decisiva el procesamiento posterior del sonido a nivel neuronal. Analizaremos dos de esos casos: la aparición de “pulsaciones” entre sonidos separados casi una octava (es decir, uno tiene una frecuencia aproximadamente el doble del otro), y el caso general de reconstrucción de la fundamental.

⁸ La elección de 1000 Hz (o más) como frecuencia del tono fijo tiene como objeto que haya una diferencia sustancial entre los tonos reales y los creados por el propio oído, y así facilitar el reconocimiento de estos últimos.

Si se hacen sonar dos tonos puros de frecuencias f y $2f + \Delta f$, donde $\Delta f \ll f$, a pesar de que la separación es mucho mayor que una banda crítica y por consiguiente no debería haber ningún tipo de pulsaciones, se percibe una fluctuación semejante a un batido de frecuencia f que no es asimilable ni a una modulación de amplitud ni de frecuencia.

En la figura 22 se muestra el caso de dos tonos para los que $\Delta f = f/10$; en el primer caso de igual amplitud, y en el segundo el de mayor frecuencia con amplitud $1/10$ de la del de menor frecuencia.

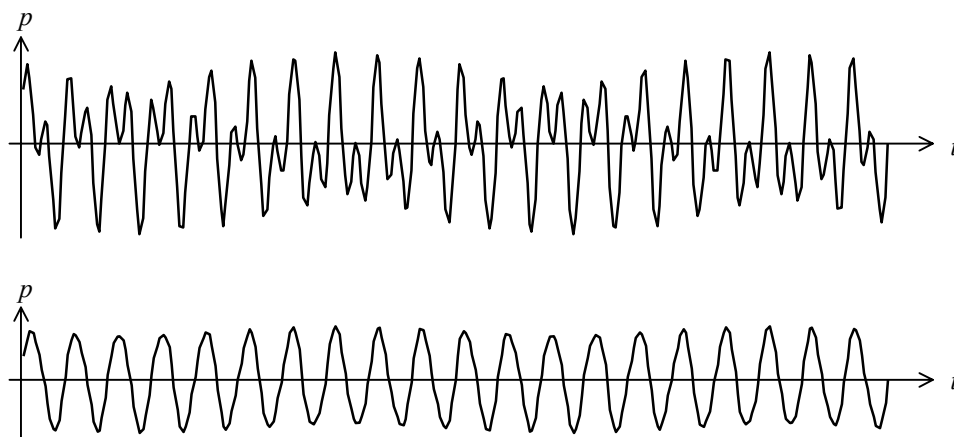


Figura 22. Superposición de dos tonos puros de frecuencias f y $2f + \Delta f$. Arriba, ambos tienen igual amplitud. Abajo, el de mayor frecuencia posee una amplitud $1/10$ de la del otro.

Como se puede apreciar, existe una variación periódica del valor pico a pico de la onda resultante, que no es otra cosa que una modulación de amplitud. Sin embargo, esta modulación es imperceptible por dos razones. En primer lugar, la máxima modulación se da en el caso en que el armónico 2 tiene la mitad de amplitud que el armónico 1, y aún así es de sólo un 15% de la amplitud media de la onda. Esta variación corresponde a alrededor de 1 dB, que según veremos más adelante, es el umbral diferencial de intensidad. El segundo motivo es que esta modulación en realidad no se manifiesta en ninguna parte de la membrana basilar, ya que la región correspondiente a f es poco sensible a $2f$ y viceversa. Por eso, aun suponiendo que la relación de intensidades de las dos componentes sonoras fuese óptima, en la zona correspondiente a f habría sólo un pequeño vestigio de $2f$, digamos, menos del 10%.⁹ En este caso, según puede comprobarse, la modulación en esa zona de la membrana basilar sería de un 2 %, es decir unos 0,2 dB. Esta variación resulta totalmente imperceptible. El efecto descrito no puede por lo tanto atribuirse a una modulación de amplitud.

Tampoco existe una modulación de frecuencia que pueda dar cuenta del fenómeno que estamos analizando, de manera que la teoría del lugar, basada exclusivamente en una representación espacial del espectro sonoro, no permite por sí sola una explicación aceptable del fenómeno.¹⁰

⁹ Esta cifra depende de la selectividad de la membrana basilar a esa frecuencia e intensidad.

¹⁰ Observemos que el efecto de las pulsaciones propiamente dichas entre sonidos de frecuencia muy próxima tampoco podría explicarse teniendo en cuenta solamente el espectro puro. El éxito de la teoría del lugar en este caso parte de que las terminales nerviosas de Corti se suponen sensibles a la amplitud de vibración de la membrana basilar en el punto correspondiente, es decir, presentan un funcionamiento no lineal.

Las investigaciones han conducido a aceptar que el cerebro pone en juego otros mecanismos para captar información basados en cierta capacidad de las terminaciones nerviosas sensoriales que inervan la membrana basilar para responder no sólo a la amplitud de vibración sino también a su *forma de onda temporal*

Volvamos a analizar el caso de las octavas desajustadas. Podemos visualizar lo que está ocurriendo si pensamos que los dos tonos difieren exactamente en una octava, pero se van defasando lentamente. Según se puede apreciar en la figura 23, las diferencias de fase implican una diferencia de forma de onda, de modo que podemos considerar que existe una especie de *modulación de la forma de onda*, que aunque pasa desapercibida desde el punto de vista del espectro, brinda al cerebro una información valiosa. Más precisamente, vemos que si están en fase (0°) la bajada dura mucho más que la subida, si están en cuadratura (90°) duran lo mismo, y si están en contrafase la bajada dura menos que la subida. Esto se traduce en una diferencia en la distribución estadística de los pulsos emitidos, lo que a su vez permite a la corteza cerebral discriminar las dos formas de onda, siempre que la transición se produzca a una velocidad conveniente (lo cual significa que las formas de onda no pueden distinguirse fácilmente si no hay una transición entre ellas).

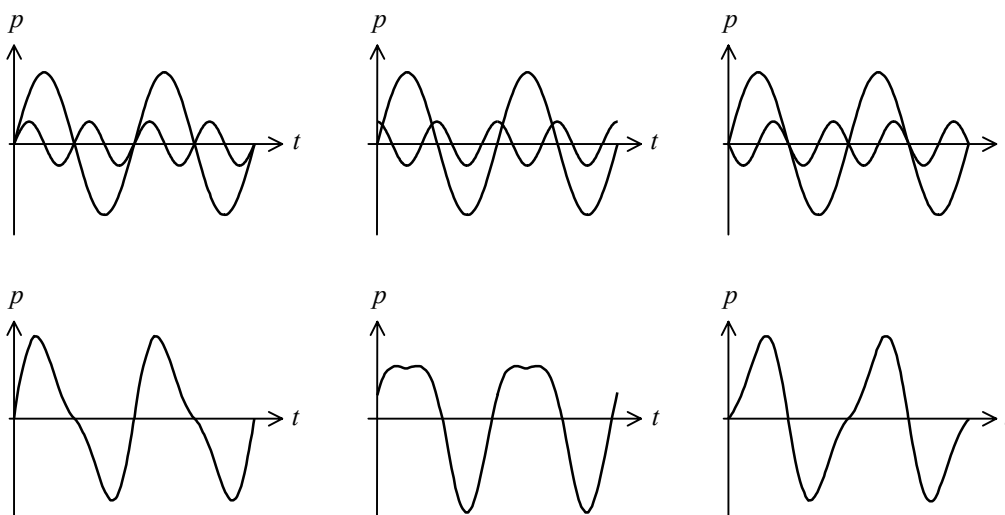


Figura 23. Efecto de la fase relativa entre la fundamental (f) y el segundo armónico ($2f$) sobre la forma de onda resultante. A la izquierda la fundamental y el armónico están en fase; en el centro, difieren en 90° ; a la derecha, están en contrafase.

El seguimiento o reconstrucción de la fundamental a partir de los armónicos (descrito anteriormente en conexión con las alinealidades del oído) es otro fenómeno cuya explicación completa requiere tener en cuenta los efectos neuronales. En efecto, se trata de una característica del oído que no se circunscribe al caso analizado de sonidos intensos. Un ejemplo de ello es el auricular del teléfono, que reproduce, por limitaciones en la banda de frecuencias del sistema telefónico, sólo las componentes armónicas superiores a los 300 Hz. Esto elimina casi por completo las fundamentales de todas las voces humanas (no se tienen en cuenta en esta afirmación los sonidos más agudos propios del canto). Sin embargo, normalmente las voces no pierden su identidad ni su carácter, aunque difícilmente se pueda considerar que el nivel del auricular telefónico lleve al oído fuera de su rango lineal.

Este fenómeno se apoya en dos mecanismos. El primero tiene que ver con la sensibilidad a la forma de onda dada por la resultante estadística mencionada. En efecto, la superposición de dos armónicos sucesivos produce una forma de onda periódica cuyo período corresponde al de la fundamental, independientemente de que la misma esté o no presente. El resultado es una serie de potenciales de acción que guardan un sincronismo del tipo comentado (pulsos espaciados según múltiplos del período de la onda), y que evocan por consiguiente la misma altura evocada por la fundamental.

El segundo mecanismo se relaciona con la capacidad de memorizar los patrones de vibración de la membrana basilar. Sucede que todo ser humano está expuesto desde su nacimiento a sonidos periódicos o quasi periódicos (por ejemplo la propia voz, o la de sus padres). Estos generan arquetipos o patrones de vibración definidos en la membrana basilar cuya audición reiterada induce su aprendizaje. Posteriormente, cada aparición parcial del patrón evoca por asociación el patrón completo.¹¹ Esto sucede porque la primera reacción del cerebro ante un estímulo nuevo es asociarlo a un patrón ya incorporado a la memoria que difiera poco del patrón correspondiente al nuevo estímulo. En otras palabras, el cerebro reconstruye la fundamental faltante porque el patrón “fundamental - conjunto de armónicos” difiere poco del patrón “conjunto de armónicos”.

5. La percepción de la 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:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c} \quad (30)$$

donde ρ_0 es la densidad del aire y c , la velocidad de propagación del sonido en el mismo. El rango de presiones que es capaz de manejar el oído es enorme, variando entre 20 μPa 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 como¹²

¹¹ Un ejemplo de una situación similar en el campo afín de las imágenes visuales lo constituyen las caricaturas. Cuando están bien hechas, rescatan con un mínimo de recursos las características salientes o más distintivas de una persona, que permiten a quien la conoce identificarla de inmediato.

¹² Existen tres notaciones para el nivel de presión sonora: *SPL*, siglas en inglés, *sound pressure level*, *NPS*, siglas en castellano, y L_p , simbología internacional utilizada en las normas IEC e ISO. En este texto se prefiere esta última.

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P_{ef}}{P_{ref}} \right), \quad (31)$$

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,¹³

$$L_p = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right), \quad (32)$$

donde $I_{ref} = P_{ref}^2 / \rho_0 c$, es decir, la intensidad correspondiente a una onda plana apenas audible. En la tabla 2 se muestran, con fines ilustrativos, los niveles de presión sonora correspondientes a algunos ambientes y situaciones típicas.¹⁴

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

Resulta interesante destacar que una razón frecuentemente aducida para la adopción de una escala logarítmica es el supuesto “comportamiento logarítmico del oído”. Según veremos, la sensación de sonoridad no cumple la ley logarítmica de Weber-Fechner, sino una ley potencial con exponente 3/5.

En primer lugar la ley de Weber no es enteramente válida en ningún rango suficientemente amplio de intensidad. Si la intensidad (o la presión sonora) fuera una magnitud Weberiana, la diferencia apenas perceptible sería proporcional a la presión sonora, por lo que el nivel de presión sonora luego de un incremento de una DAP resultaría

$$20 \log \frac{P + \Delta P}{P_{ref}} = 20 \log \frac{P + K \cdot P}{P_{ref}} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} + 20 \log (1 + K) \quad (33)$$

¹³ Esta igualdad es válida solamente para ondas planas.

¹⁴ Es necesario tener en cuenta que el nivel de presión sonora medido en una situación dada depende notablemente de las condiciones de medición, por ejemplo: la distancia a la fuente, el uso de filtros de ponderación, el tiempo de promediación, la proximidad de superficies reflectantes del sonido y la variabilidad de la fuente en cuanto a condiciones de operación. Por ese motivo sólo se pueden dar valores indicativos.

En otras palabras, la diferencia mínima perceptible expresada como nivel de presión sonora debería ser una cantidad constante de decibeles. En realidad la diferencia mínima perceptible se aproxima, para $f = 1$ kHz, a la curva indicada en la figura 24. Tampoco es válido el postulado de Fechner.

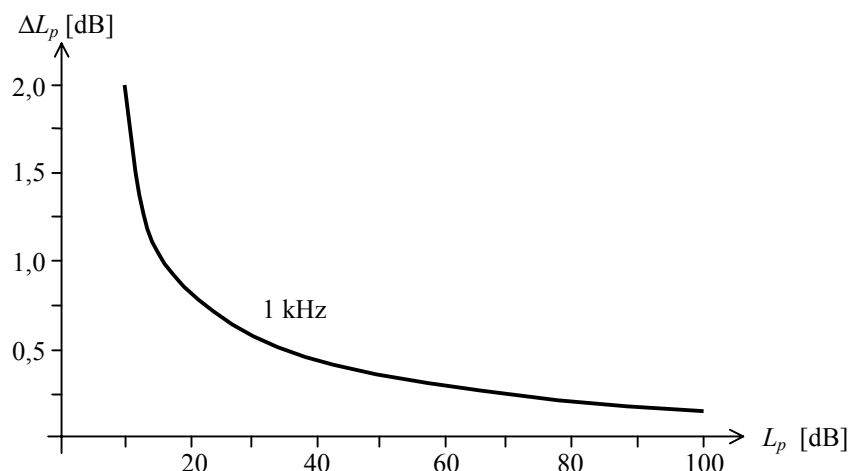


Figura 24. Diferencia mínima perceptible para el nivel de presión sonora en función del nivel de presión sonora, a 1 kHz.¹⁵

5.1. Umbral de audición

Es el nivel de presión sonora correspondiente al umbral de intensidad. Este umbral depende mucho de la frecuencia, debido a que las distintas partes del oído no son igualmente eficientes para conducir la energía sonora en todas las frecuencias. Así, la resonancia del canal auditivo externo cerca de los 3000 Hz hace que el umbral sea en esa banda de frecuencias mucho menor que a otras frecuencias. El umbral también depende de la persona, y de las condiciones en que se lo determina. Por ejemplo, lo afectan las enfermedades otorrinolaringológicas, la exposición reciente a ruidos y el cansancio. También es común un aumento irreversible del umbral por exposición prolongada (en general, durante varios años) a niveles de presión sonora muy altos, lo cual suele ocurrir en ambientes de trabajo. El aumento del umbral se denomina en general *hipoacusia*. Finalmente, se observa estadísticamente un aumento del umbral con la edad, conocido como *presbiacusia*. En la figura 25 se muestra el L_p que corresponde al umbral de audición en función de la frecuencia. La curva representa el valor promedio para personas jóvenes y con el oído en buen estado. Como se puede observar, para 1 kHz el umbral es de 0 dB. Ello se debe precisamente a la forma en que se ha elegido la referencia.

5.2. 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, uti-

¹⁵ En las personas que padecen de *rechutamiento*, afección auditiva en la cual se reduce el rango dinámico (diferencia entre los umbrales de audición y de dolor), la diferencia apenas perceptible puede ser menor que para las personas de audición normal.

lizado 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 26.

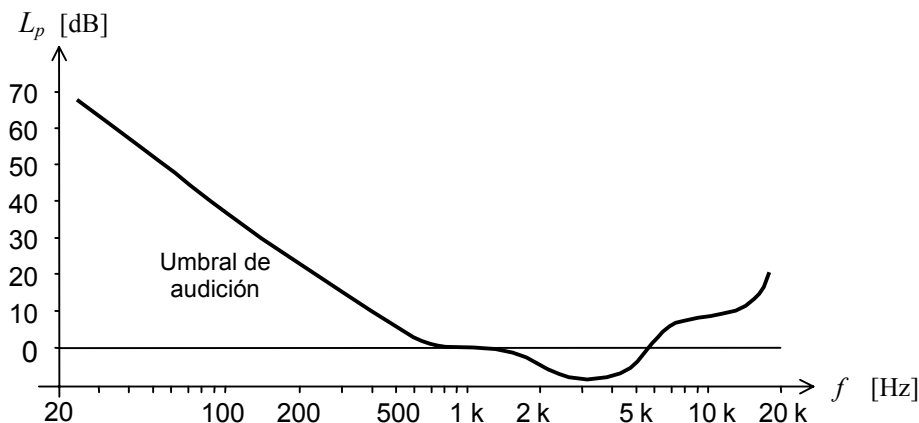


Figura 25. Umbral absoluto de audición. En 1 kHz el umbral es 0 dB pues la presión de referencia fue seleccionada como la presión correspondiente al umbral de audición a 1 kHz.

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,¹⁶ 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. Este problema se enfocará en las secciones que siguen.

¹⁶ De hecho, la curva de umbral coincide con el contorno de 0 dB.

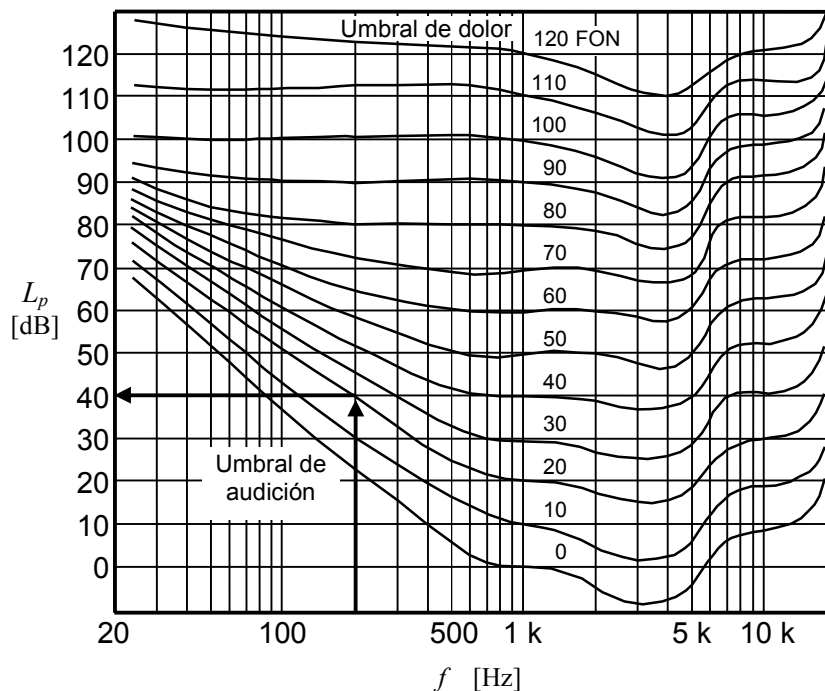


Figura 26. Curvas de Fletcher y Munson (1933). Un tono de 200 Hz y $L_p = 40$ dB provocará la misma sensación de sonoridad que uno de 1000 Hz y $L_p = 20$ dB. Se dice entonces que tiene un nivel de sonoridad de 20 fon. Obsérvese que a igual L_p los sonidos muy graves (baja frecuencia) y los muy agudos (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*.

NOTA: Los contornos de igual sonoridad han sido determinados nuevamente con mayor precisión por Robinson y Dadson en 1956, y posteriormente normalizados por la Organización Internacional de Normalización como Norma ISO 226. En la República Argentina la norma correspondiente es la IRAM 4066.

5.4. Filtros de ponderación para medidores de nivel sonoro

Cuando tras los trabajos de Fletcher y Munson se comprobó que la percepción de la sonoridad era un fenómeno más complejo que lo que se creía hasta entonces (ya que, por ejemplo, la sensibilidad del oído dependía fuertemente de la frecuencia), se intentó crear un instrumento de medición capaz de reflejar con una única cifra la sensación de sonoridad producida por un sonido cualquiera. Para lograr eso se propuso intercalar un filtro de ponderación de frecuencias con una curva de respuesta en frecuencia inversa de las curvas de Fletcher y Munson. Así, como para las bajas frecuencias las curvas de Fletcher y Munson suben (dado que el oído requiere mayor nivel de presión sonora por su menor sensibilidad), este filtro debía atenuar las componentes de baja frecuencia. Por ejemplo, si a 200 Hz una curva de Fletcher y Munson sube 20 dB por encima del valor correspondiente a 1 kHz (ver figura 26), el filtro a intercalar debía atenuar en 20 dB el valor de nivel de presión sonora medido a esa frecuencia. El filtro que se proponía inter-

calar debía, entonces, imitar la respuesta del oído humano, acentuando las frecuencias en las que el oído es más sensible y atenuando aquéllas en que es menos sensible.

Esta idea tropezó con varias dificultades. En primer lugar, no hay sólo *una* curva de Fletcher y Munson, sino que para cada nivel de sonoridad hay una diferente, resultando que para una misma frecuencia se requerirían diversas atenuaciones según el nivel de la señal. Esto llevó a que se propusieran *tres* curvas de ponderación diferentes: la curva A, válida para niveles de sonoridad próximos a los 40 fon (nivel de sonoridad igual al de un tono senoidal de 1 kHz y 40 dB de nivel de presión sonora), la curva B, válida para niveles de sonoridad del orden de 70 fon, y la curva C, destinada a los niveles de sonoridad cercanos a 100 fon.¹⁷ En la figura 27 se muestran las tres curvas de ponderación.

La segunda dificultad, más seria que la anterior, fue que las curvas de igual nivel de sonoridad de Fletcher y Munson sólo son válidas para tonos senoidales, por lo cual el propósito original de obtener un valor único que se correlacionara con la sensación de sonoridad no pudo cumplirse. En efecto, dos sonidos de igual nivel con ponderación A, por ejemplo, pero de diferente composición espectral, podían resultar de sonoridad subjetiva muy desigual¹⁸.

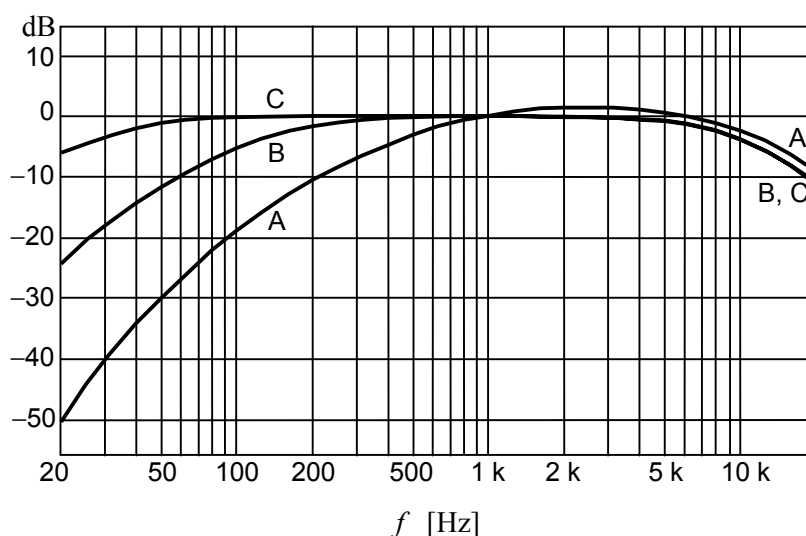


Figura 27. Curvas de compensación (o ponderación) A, B y C. Para cada frecuencia, el valor de la ordenada representa la corrección aditiva a aplicar al *nivel de presión sonora* de un tono de esa frecuencia para obtener su *nivel sonoro*. En 1 kHz todas las curvas coinciden en 0 dB.

A pesar de ello, investigaciones posteriores revelaron que las cifras medidas intercalando la curva de ponderación A estaban muy bien correlacionadas con el daño auditivo experimentado por las personas expuestas a ruidos intensos durante periodos considerables de tiempo, como suele ocurrir en los ambientes de trabajo en la industria. También se correlacionaba bastante bien con la sensación de molestia y con la interferencia a la palabra causadas por determinados ruidos. Por estos motivos no sólo se po-

¹⁷ Las curvas A, B y C en realidad son *aproximaciones* de las inversas de las curvas de Fletcher y Munson de 40, 70 y 100 fon, ya que además se pretendía que fueran realizables con redes eléctricas sencillas.

¹⁸ La manera de medir la sensación de sonoridad es a través del concepto de sonoridad (ver capítulo 1, sección 1.6.2.) que se determina por métodos como el ya descrito Mark VI.

pularizó dicha curva, sino que además fue adoptada en numerosas normas y legislaciones.¹⁹ En la tabla 3 se dan los valores de las curvas A, B y C para diversas frecuencias.

Tabla 3. Valores de las correcciones de las curvas de ponderación A, B y C (Norma IEC 651/79) para la serie de frecuencias estándar de tercio de octava.

Frecuencia [Hz]	Curva A [dB]	Curva B [dB]	Curva C [dB]
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0,0
250	-8,6	-1,3	0,0
315	-6,6	-0,8	0,0
400	-4,8	-0,5	0,0
500	-3,2	-0,3	0,0
630	-1,9	-0,1	0,0
800	-0,8	-0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0
1250	0,6	-0,0	0,0
1600	1,0	-0,0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

¹⁹ En realidad puede especularse que durante muchas décadas se utilizaron en las investigaciones instrumentos equipados con las curvas de ponderación A, B y C, y es por eso que los resultados informados se refieren a dichas curvas. Es posible que si se hubieran utilizado otras ponderaciones, por ejemplo una que midiera realmente el nivel de sonoridad, las correlaciones hubieran sido mejores. Por otra parte, tampoco es claro que los efectos físicos como el deterioro auditivo deban necesariamente estar correlacionados con la sensación.

Los valores medidos con estas curvas de compensación intercaladas se denominan respectivamente *nivel sonoro A*, *nivel sonoro B* y *nivel sonoro C*, y se expresan en dBA, dBB, dBC (también abreviados, a veces, dB(A), dB(B), dB(C)). La curva B en realidad prácticamente no se utiliza hoy en día, por lo cual es raro que los instrumentos la incluyan. La curva C, en cambio, viene incorporada a la mayoría de los instrumentos, ya que algunas especificaciones requieren la lectura en dBC. Por otra parte, dicha medición permite, por comparación con el nivel sonoro A, determinar si existen o no componentes de baja frecuencia importantes. En efecto, dado que la curva A atenúa las bajas frecuencias y la curva C no, si las lecturas en dBA y dBC son similares, es porque el contenido de baja frecuencia no es importante. Si, en cambio, la lectura en dBC es mayor que la lectura en dBA, es porque hay presente bastante energía de baja frecuencia.

Es interesante notar que, a pesar de estar la curva A originalmente destinada a los niveles de sonoridad bajos, resultó ser apropiada para describir fenómenos atribuibles normalmente a niveles elevados.

Las curvas de ponderación responden a unas ecuaciones que pueden implementarse por medio de redes de resistores y condensadores. Para el caso de las respuestas A y C, éstas son (Norma IEC 651/79)

$$A(f) = 20 \log \left(\frac{1,2588 \times 12200^2 f^4}{(f^2 + 20,6^2) \sqrt{f^2 + 107,7^2} \sqrt{f^2 + 737,9^2} (f^2 + 12200^2)} \right) \quad (34)$$

$$C(f) = 20 \log \left(\frac{1,0071 \times 12200 f^2}{(f^2 + 20,6^2) (f^2 + 12200^2)} \right) \quad (35)$$

5.4. Sonoridad (S)

El nivel de sonoridad analizado es aún una magnitud *psicofísica*, ya que en última instancia se basa en la comparación de sensaciones con las producidas por una frecuencia (1 kHz) tomada arbitrariamente como referencia. El valor numérico obtenido se refiere a la magnitud del estímulo físico, no a una valoración de la intensidad de la sensación. Así, por ejemplo, un tono de 80 fon no es el doble de sonoro que uno de 40 fon.

A fin de establecer una escala *subjetiva* de sonoridad se pide a los sujetos que alteren la intensidad de un sonido en una proporción determinada, por ejemplo hasta lograr un sonido 2 veces más sonoro que el original. Para este tipo de experimento es necesario que los sujetos atribuyan un significado inequívoco al concepto de duplicación de la sonoridad. Esto puede lograrse por comparación entre la audición monoaural y binaural²⁰ de un mismo sonido. Un sonido B escuchado monoauralmente es doblemente sonoro que otro A cuando produce el mismo incremento de sensación que produce pasar de la escucha monoaural a la escucha binaural de A.

El experimento se realiza con varios niveles de presión sonora, cubriendo todo el rango audible y con una cantidad suficientemente numerosa de sujetos. Luego se procesan estadísticamente los resultados. El resultado es una relación entre el nivel de sonoridad expresado en fon y la *sensación de sonoridad*, o simplemente *sonoridad*, *S*

²⁰ Las pruebas monoaurales y binaurales se logra mediante auriculares alimentados individual o simultáneamente.

(loudness, L). Expresando la sonoridad en *son*, unidad que corresponde a un nivel de sonoridad de 40 fon, se obtiene la *función de transferencia* indicada en la figura 28.

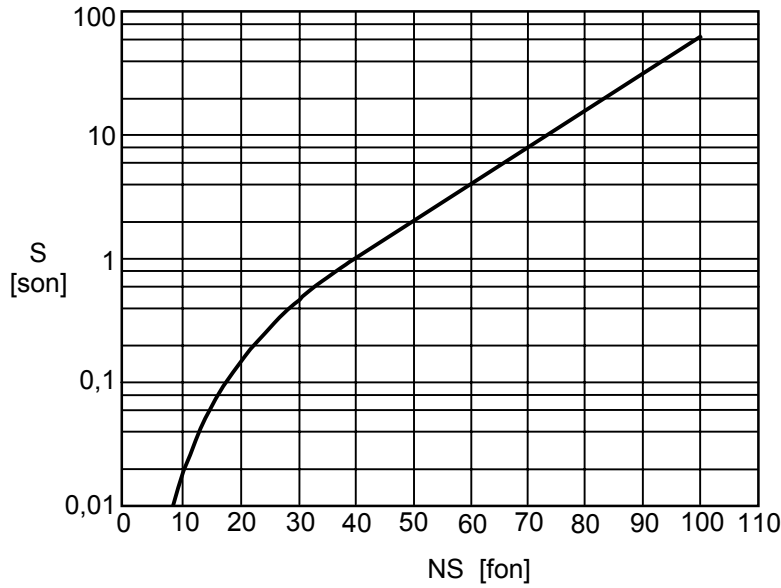


Figura 28. Relación entre *sonoridad* (son) y *nivel de sonoridad* (fon). La curva, dibujada en un diagrama semilogarítmico es aproximadamente lineal por encima de los 40 fon (Zwicker y Feldtkeller, 1999).

A partir de un nivel de sonoridad de 40 fon la relación es exponencial, ya que, según se aprecia,

$$\frac{\log S - \log 1}{\log 8 - \log 1} = \frac{NS - 40}{70 - 40}$$

de donde

$$S = 2^{\frac{NS - 40}{10}} \quad (36)$$

Esta relación es válida sólo para $NS > 40$ fon, pero como 40 fon representa un nivel de sonoridad bastante bajo (corresponde al ruido ambiente diurno en una habitación de un barrio tranquilo), en la práctica es aplicable a la mayor parte de los sonidos habituales.

NOTA: Para $NS < 40$ fon, es posible aproximar la curva anterior por medio de la ecuación

$$S = 6,901 \times 10^{-5} (NS - 2)^{2,634} \quad (37)$$

Si bien la relación entre el nivel de sonoridad y la sonoridad fue obtenida para tonos de 1 kHz, es aplicable con independencia de la frecuencia, debido a que para otras frecuencias pueden aplicarse previamente los contornos de igual sonoridad.

Para el caso de un tono de referencia de 1 kHz, podemos obtener una conclusión interesante. Recordemos que para el tono de referencia el nivel de sonoridad en fon coincide numéricamente con el nivel de presión sonora:

$$NS = L_p = 20 \log (P/P_{ref}) . \quad (38)$$

Entonces

$$S = \frac{1}{16} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{0,601} , \quad (39)$$

expresión válida para $L_p > 40$ dB y 1 kHz.

Resulta así que la sensación de intensidad, expresada a través de la sonoridad, dista mucho de cumplir con la ley de Weber-Fechner, ya que no se vincula logarítmicamente sino potencialmente con la magnitud del estímulo físico (ya sea que éste se represente con la presión o con la intensidad sonora). Si bien esta conclusión fue obtenida para 1 kHz, es válida para otras frecuencias con pequeñas modificaciones.²¹

A modo de ejemplo, calculemos cuál debe ser el incremento del nivel de presión sonora para que la sonoridad de un tono de 1 kHz se duplique. Dado que a 1 kHz el nivel de sonoridad coincide con el nivel de presión sonora, podemos aplicar directamente la ecuación 36. Si NS' es el nivel de sonoridad que produce una sonoridad doble de la producida por NS , entonces

$$S = 2^{\frac{NS' - 40}{10}} = 2 \times 2^{\frac{NS - 40}{10}} .$$

Aplicando logaritmo podemos despejar NS' ,

$$NS' = 10 + NS = NS + 10 \text{ fon}$$

o bien, por estar en 1 kHz,

$$L_p' = L_p + 10 \text{ dB}. \quad (39)$$

5.5. Sonoridad para sonidos compuestos

En la sección anterior se estudió la relación entre el nivel de presión sonora y la sonoridad para el caso de los tonos puros. La mayoría de los sonidos que se encuentran en la práctica no son, sin embargo, tonos puros, sino que están formados por una gran cantidad de componentes armónicos superpuestos.

La extensión del concepto de sonoridad a estos sonidos no es sencilla ni obvia, ya que los mecanismos de integración de la sensación difieren según la separación entre las frecuencias de los componentes, evaluada en términos de las bandas críticas.

Si los sonidos puros que forman el sonido compuesto están comprendidos dentro de una misma banda crítica, la *intensidad* (o lo que es equivalente, el cuadrado de la presión sonora) total se obtiene sumando las intensidades individuales. A partir de la intensidad, por aplicación de las curvas de igual sonoridad y luego la función de transferencia, puede obtenerse la sonoridad correspondiente a dicha banda crítica.

²¹ Para otras frecuencias la relación entre L_p y NS es aproximadamente lineal hasta 80 fon, aunque con una constante diferente de 1. Se puede hacer una aproximación cuadrática válida en todo el rango de interés.

Si, en cambio, los tonos puros están suficientemente alejados, vale decir a más de una banda crítica entre sí, la *sonoridad* total se obtiene directamente sumando las sonoridades individuales. Más adelante se da un modelo neurológico que permite explicar esto.

El procedimiento práctico para calcular el nivel de sonoridad consiste en subdividir el espectro del sonido compuesto en bandas críticas, luego sumar las intensidades dentro de cada banda, convertir la intensidad en nivel de sonoridad y éste en sonoridad, y finalmente sumar todas las sonoridades de las diversas bandas críticas y convertir en nivel de sonoridad. Para la aplicación de este método se pueden utilizar los valores de la tabla 4.

Tabla 4. Frecuencia inferior (f_i), central (f_o) y superior (f_s) y ancho de banda (Δf_{BC}) de las bandas críticas (Zwicker y Feldtkeller, 1999).

Banda	f_i [Hz]	f_o [Hz]	f_s [Hz]	Δf_{BC} [Hz]
1	20	50	100	80
2	100	150	200	100
3	200	250	300	100
4	300	350	400	100
5	400	450	510	110
6	510	570	630	120
7	630	700	770	140
8	770	840	920	150
9	920	1000	1080	160
10	1080	1170	1270	190
11	1270	1370	1480	210
12	1480	1600	1720	240
13	1720	1850	2000	280
14	2000	2150	2320	320
15	2320	2500	2700	380
16	2700	2900	3150	450
17	3150	3400	3700	550
18	3700	4000	4400	700
19	4400	4800	5300	900
20	5300	5800	6400	1100
21	6400	7000	7700	1300
22	7700	8500	9500	1800
23	9500	10500	12000	2500
24	12000	13500	15500	3500

Ejemplo 1: Calcular la sonoridad de una onda cuadrada de 200 Hz y nivel de presión sonora $L_p = 60$ dB.

En la onda cuadrada los armónicos son de orden impar, y sus amplitudes están en relación inversa con el orden correspondiente. Calculemos primero el L_p de los primeros armónicos. Si la presión eficaz es P , dado que el valor eficaz de una onda cuadrada coincide con su amplitud, los armónicos tienen una amplitud de $4P/\pi$, $4P/3\pi$, $4P/5\pi$, etc, y sus valores eficaces se obtienen dividiendo por $\sqrt{2}$. Así, los niveles de presión sonora resultan:

$$L_{p1} = 60 \text{ dB} - 20 \log (\pi\sqrt{2}/4) = 59 \text{ dB},$$

$$L_{p3} = L_{p1} - 20 \log 3 = 50 \text{ dB},$$

$$L_{p5} = L_{p1} - 20 \log 5 = 45 \text{ dB},$$

y así sucesivamente. En la tabla 5 se indica el ancho de las bandas críticas y se convierten los L_p a NS y luego a S , utilizando sucesivamente las curvas de igual sonoridad y la función de transferencia. El cálculo se efectuó por computadora.

Tabla 5. Cálculo de la sonoridad en el ejemplo 1

f [Hz]	Banda crítica [Hz]	Lp [dB]	NS [fon]	S [son]
200	150	59,0879	56,6174	3,1640
600	570	49,5455	52,7891	2,4266
1000	1000	45,1085	45,1085	1,4249
1400	1370	42,1859	42,1268	1,1588
1800	1850	40,0031	41,2794	1,0927
2200	2150	38,2600	40,9219	1,0660
2600	2500	36,8090	41,1848	1,0856
3000	2900	35,5661	41,7294	1,1274
3400	3400	34,4789	41,9070	1,1413
3800	4000	36,1102	43,6314	1,2862
4200				
4600	4800	34,5166	40,1521	1,0106
5000				
5400	5800	34,6526	35,5076	0,7180
5800				
6200				
6600				
7000	7000	33,0062	27,4745	0,3488
7400				
7800				
8200				
8600	8500	33,4649	23,5706	0,2251
9000				
9400				
9800				
10200	10500	32,2740	25,9077	0,2951
10600				
11000				
11400				
11800	13500	31,9269	34,8588	0,6820
12200				
12600				
13000				
13400				
13800				
14200				
14600				
15000				
15400				
TOTAL				18,2531

Como se puede observar, dado que los armónicos están equiespaciados y en cambio las bandas críticas van creciendo, a partir de la banda crítica centrada en 4000 Hz entran varios armónicos en cada banda.

Con el valor final en son puede obtenerse

$$NS_{total} = 40 + 10 \log_2 18,25 = 81,9 \text{ fon.} \quad (40)$$

Este nivel de sonoridad es mucho mayor que lo que haría suponer el NPS de 60 dB, lo cual se debe a la gran cantidad de armónicos de alta frecuencia que contiene la onda cuadrada.

Referencias y bibliografía

- Beranek, Leo L.: "Acoustics". American Institute of Physics (Acoustical Society of America). Cambridge, USA, 1986.
- Beranek, Leo L.: "Acústica". Editorial Hispanoamericana S. A. Buenos Aires (Arg.), 1961.
- Beranek, Leo L.: "Acoustical Measurements". American Institute of Physics. Cambridge, USA, 1993.
- Beranek, Leo L.: "Concert and Opera Halls: How they Sound". American Institute of Physics. Woodbury, USA, 1996.
- Buniak, Hugo N. (Ed): "Hipoacusia. Criterios Médicos y Jurisprudenciales". Editorial Juris. Rosario, Argentina, 1991.
- Curet, Carlos: "ERA - Audiometría por Respuestas Eléctricas". CTM Servicios Bibliográficos, Buenos Aires, Argentina, 1988.
- Davis, Don; Davis, Carolyn: "Sound System Engineering". SAMS (Prentice Hall Computer Publishing). Carmel, Indiana, USA, 1994.
- Deutsch, Sid; Deutsch, Alice: "Understanding the Nervous System. An Engineering Perspective". IEEE Press. Piscataway, NJ, USA, 1993.
- Egan, James P.; Hake, Harold W.: "On the masking pattern of a simple auditory stimulus". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 22, No 5, September, 1950, pp. 622-630.
- Everest, F. Alton: "The Master Handbook of Acoustics". TAB Books. Blue Ridge Summit, USA, 1989.
- Fidell, Sanford; Teffeteller, Sherri; Horonjeff, Richard, Green, David. "Predicting annoyance from detectability of low-level sounds". Journal of the Acoustical Society of America, Vol 66, No 5, November, 1979, pp 1427-1434
- Fletcher, Harvey: "Speech and Hearing in Communication - ASA Edition". American Institute of Physics (for the Acoustical Society of America). Woodbury, USA, 1995.
- Fletcher, H.; Munson, W. A.: "Loudness, its definition, measurement and calculation". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 5, pp. 82-108, 1933.
- Fryer, Douglas; Edwin, Henry; Sparks, Charles: "General Psychology. Survey of Basic Principles Review. Questions and Answers". Barnes & Noble, Inc. New York, USA, 1970.
- Ginn, K. B.: "Architectural Acoustics". Brüel Kjaer. 1978.
- Grimm, Laurence G. "Statistical Applications for the Behavioral Sciences". John Wiley & Sons. New York, 1993
- Haas, Helmut: "The influence of a single echo on the audibility of speech". Journal of the Audio Engineering Society, Vol 20, No 2, March 1972, pp 146-159.
- Jonsohn, Richard A.: "Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund". Prentice Hall Hispanoamericana. Naucalpán de Juárez, México, 1994.
- Kinsler, Lawrence; Frey, Austin; Coppens, Alan; Sanders, James: "Fundamentos de Acústica". Editorial Limusa. México, 1995
- Knudsen, Vern O.; Harris, Cyril M.: "Acoustical Designing in Architecture". American Institute of Physics. USA, 1978.
- Layrd, Leonard; Coxe, Kenneth. "Psychological Measurements of Annoyance as Related to Pitch and Loudness" Journal of the Acoustical Society of America, Vol 1, No 1, September, 1929, pp 158-163
- Makrinenko, L. I.: "Acoustics of Auditoriums in Public Buildings". American Institute of Physics. Woodbury, NY, USA, 1994.
- Miedema, H.M.E., Vos, H.: "Exposure-response relations for transportation noise". Journal of the Acoustical Society of America 104 (6), December. 1998.
- Miyara, Federico: "Acústica y Sistemas de Sonido". UNR Editora. Rosario, Argentina, 1999.
- Robinson, D. W.; Dadson, R. S.: "A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones". British Journal of Applied Physics, 7, 1956, pp.166-181
- Roederer, Juan G.: "Acústica y Psicoacústica de la Música". Ricordi Americana. Buenos Aires, 1997
- Rosen, S.; Bergman, M.; Plestor, D.; El-Mofty, A.; Satti, M: "Presbycusis Study of a Relatively Noise-Free Population in the Sudan" Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 71:727-743 (1962)
- Sabine, Wallace Clement: "Collected Papers on Acoustics". Peninsula Publishing. Los Altos, California, USA, 1922.
- Schultz, T. J.: "Synthesis of social surveys on noise annoyance". Journal of the Acoustical Society of America 64 (2), Aug. 1978.
- Schwartzman, Jorge Alberto: "Audiometría por respuestas eléctricas". CTM Servicios Bibliográficos. Buenos Aires, Argentina, 1984.
- Scott, H. H. "Historical development of the sound level meter". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 29, 12, pp. 1331-1333, 1957.
- Spehlmann, Rainer: "Evoked Potential Primer". Butterworth Publishers. Stoneham, MA, USA, 1985.

- Stevens, S. S.: "On the validity of loudness scale". Journal of the Acoustical Society of America, Vol 31, 1959, pp 959-1003
- Stevens, S. S.: "Procedure for Calculating Loudness: Mark VI". Journal of the Acoustical Society of America, Vol 33, No 11, November, 1961, pp 1577-1585
- Stevens, S.S. "Psychophysics: Introduction to its Perceptual, Neural and Social Prospects". Wiley, New York, 1975
- Stevens, S.; Davis, H.: "Hearing. Its Psychology and Physiology". American Institute of Physics (Acoustical Society of America). New York, NY, USA, 1983.
- van Bergeijk, Willem A.; Pierce, John R.; David, Edward E. (h.): "Las ondas y el oído". Eudeba. Buenos Aires, 1962.
- von Békésy: "Experiments in Hearing". American Institute of Physics (Acoustical Society of America). Reimpresión del volumen publicado por McGraw-Hill en 1960.
- Wainerman, Jaime; Tato, Juan Manuel (h); Mantilaro, Stella Maris: "Otoemisiones Acústicas". Otorinolaringológica, año XVIII N° 3, agosto de 1996.
- Winckel, Fritz: "Music, Sound and Sensation. A Modern Exposition". Dover Publications. New York, USA, 1967.
- Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: "The Ear as a Communication Receiver". American Institute of Physics (Acoustical Society of America) . USA, 1999.
- Zwicker, E.; Fastl, H.: "Psychoacoustics. Facts and Models". Springer. Berlin Heidelberg, 1999.

NORMAS IRAM

- IRAM 4028-2:1993 Audiometría tonal. métodos básicos de prueba en campo libre. Parte 2: Audiometría en campo acústico con tonos puros y con bandas angostas de ruido como señales de prueba
- IRAM 4036:1972 Acústica. Definiciones
- IRAM 4061:1991 Acústica. Frecuencias normales por utilizar en mediciones
- IRAM 4064:1990 Acústica. Magnitudes físicas y subjetivas del sonido o del ruido en el aire. Relación entre sonoridad y nivel de sonoridad
- IRAM 4066:1997 Acústica. Curvas normales de igual nivel de sonoridad
- IRAM 4070:1986 Ruidos. Procedimiento para su evaluación utilizando las curvas "NR"
- IRAM 4074:1972 Medidor de nivel sonoro (revisada parcialmente por IRAM 4074 partes I y II)
- IRAM 4074-1:1988 Medidor de nivel sonoro. Especificaciones generales
- IRAM 4074-2:1988 Medidor de nivel sonoro. Compensación de frecuencia para la medición del ruido de aeronaves
- IRAM 4075:1995 Electroacústica. Audiómetro
- IRAM 4081:1977 Filtros de banda de octava, de media octava, de tercio de octava, destinados al análisis de sonidos y vibraciones

NORMAS ISO

- ISO 16:1975 Acoustics - Standard tuning frequency (Standard musical pitch)
- ISO 226:1987 Acoustics - Normal equal-loudness level contours
- ISO 266:1997 Acoustics - Preferred frequencies
- ISO 389-1:1998 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 1: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and supra-aural earphones
- ISO 389-2:1994 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 2: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and insert earphones
- ISO 389-3:1994 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 3: Reference equivalent threshold force levels for pure tones and bone vibrators
- ISO 389-4:1994 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 4: Reference levels for narrow-band masking noise
- ISO/TR 389-5:1998 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 5: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones in the frequency range 8 kHz to 16 kHz
- ISO 389-7:1996 Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions

ISO 532:1975 Acoustics - Method for calculating loudness level
 ISO 1683:1983 Acoustics - Preferred reference quantities for acoustic levels
 ISO 1999:1990 Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment
 ISO/TR 3352:1974 Acoustics - Assessment of noise with respect to its effect on the intelligibility of speech
 ISO 3382:1997 Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters
 ISO/TR 4870:1991 Acoustics - The construction and calibration of speech intelligibility tests
 ISO 7029:2000 Acoustics - Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age
 ISO 8253-1:1989 Acoustics - Audiometric test methods - Part 1: Basic pure tone air and bone conduction threshold audiometry
 ISO 8253-2:1992 Acoustics - Audiometric test methods - Part 2: Sound field audiometry with pure tone and narrow-band test signals
 ISO 8253-3:1996 Acoustics - Audiometric test methods - Part 3: Speech audiometry
 ISO 10843:1997 Acoustics - Methods for the description and physical measurement of single impulses or series of impulses

NORMAS IEC

IEC 196:1965 (Obsolete number) IEC Standard frequencies
 IEC 225:1966 (Obsolete number) Octave, half-octave and third-octave band filters intended for the analysis of sound and vibrations
 IEC 537:1976 (Obsolete number) Frequency weighting for the measurement of aircraft noise (D-weighting)
 IEC 651:1979 (Obsolete number) Acoustics - Sound Level Meters
 IEC 804:1975 (Obsolete number) Acoustics - Integrating Sound Level Meters
 IEC 1094-4:1995 (Obsolete number) Measurement microphones - Part 4: Specification for working standard microphones
 IEC 60268-3:2000 Sound system equipment - Part 3: Amplifiers
 IEC 60268-4:1997 Sound System Equipment - Part 4: Microphones
 IEC 60268-5:1989 Sound system equipment. Part 5: Loudspeakers
 IEC 60268-6:1971 Sound system equipment. Part 6: Auxiliary passive elements
 IEC 60268-7:1996 Sound system equipment - Part 7: Headphones and earphones
 IEC 60268-8:1973 Sound system equipment. Part 8: Automatic gain control devices
 IEC 60268-9:1977 Sound system equipment. Part 9: Artificial reverberation, time delay and frequency shift equipment
 IEC 60268-10:1991 Sound system equipment - Part 10: Peak programme level meters
 IEC 60268-11:1987 Sound system equipment. Part 11: Application of connectors for the interconnection of sound system components
 IEC 60268-12:1987 Sound system equipment. Part 12: Application of connectors for broadcast and similar use
 IEC 60268-13 TR3:1998 Sound system equipment - Part 13: Listening tests on loudspeakers
 IEC 60268-14:1980 Sound system equipment. Part 14: Circular and elliptical loudspeakers; outer frame diameters and mounting dimensions
 IEC 60268-16:1998 Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index
 IEC 60268-17:1990 Sound system equipment. Part 17: Standard volume indicators
 IEC 60268-18 TR3:1995 Sound system equipment - Part 18: Peak programme level meters - Digital audio peak level meter
 IEC 60581-5:1981-01 High fidelity audio equipment and systems: Minimum performance requirements. Part 5: Microphones
 IEC 60651:1979-01 Sound level meters
 IEC 60651:1979-01 Sonómetros. (Versión oficial en español)
 IEC 60651-am2:2000-10 Amendment 2
 IEC 60804 Ed. 1.0 b:1985 Integrating-averaging sound level meters
 IEC 60804 Ed. 2.0 b:2000 Integrating-averaging sound level meters
 IEC 60942:1997-11 Electroacoustics - Sound calibrators

IEC 60942-am1:2000-10 Amendment 1

IEC 61094-1:2000-07 Measurement microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones

IEC 61094-2:1992-03 Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

IEC 61094-2:1992-03 Micrófonos de medida. Parte 2: Método primario para la calibración en presión de micrófonos patrones de laboratorio por la técnica de la reciprocidad (Versión oficial en español).

IEC 61094-3:1995-11 Measurement microphones - Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

IEC 61094-3:1995-11 Micrófonos de medida. Parte 3: Método primario para la calibración en campo libre de micrófonos patrones de laboratorio por la técnica de la reciprocidad (Versión oficial en español)

IEC 61094-4:1995-11 Measurement microphones - Part 4: Specifications for working standard microphones

IEC 61094-4:1995-11 Micrófonos de medida. Parte 4: Especificaciones para los micrófonos patrones de trabajo (Versión oficial en español)

IEC 61094-5 (Project) Measurement microphones - Part 5: Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison

IEC 61183:1994-06 Electroacoustics - Random-incidence and diffuse-field calibration of sound level meters

IEC 61183:1994-06 Electroacústica. Calibración de sonómetros para incidencia aleatoria y en campo difuso. (Versión oficial en español)

IEC 61252 Ed. 1.0 b:1993 Electroacoustics - Specifications for personal sound exposure meters

IEC 61329 Ed. 1.0 b:1995 Sound system equipment - Methods of measuring and specifying the performance of sounders (electroacoustic transducers for tone production)

IEC 61672-1 (Project) Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications

IEC 61672-2 (Project) Electroacoustics - Sound level meters - Part 2: Pattern evaluation tests