

La percepción acústica: Física de la audición

Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso

Dpto.de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid

Este artículo aborda desde una perspectiva física el fenómeno de la audición. En un principio se hace una exposición de las características que hacen del oído humano un eficientísimo analizador de sonidos. En segundo lugar se expone la teoría de la Localización, propuesta por G.V. Békèsy y el concepto de Banda Crítica, necesarios para la comprensión de la audición. Se complementa con demostraciones audiovisuales on-line a las que el lector puede acceder siguiendo los hipervínculos insertados en el texto. Dichas demostraciones hacen la lectura más amable y comprensible.

Introducción

La Acústica es el área de la Física que se ocupa del estudio de las ondas de presión, responsables de los sonidos y adquiere importancia en la medida en que la percepción de estos constituye, junto con las imágenes, la principal forma de relación del ser humano con el entorno. El estudio del fenómeno de la audición se divide en tres fases netamente diferenciadas:

- El estudio de la naturaleza de los sonidos y cómo estos interactúan con el oído.
- Cómo funciona el oído.
- Cómo se transforman los estímulos acústicos en impulsos nerviosos y cómo estos son interpretados por el cerebro.

La primera corresponde claramente a la Física, más en concreto a la Acústica, involucrando también a la Ondulatoria y la Mecánica. La segunda concierne a la Otoacústica, una disciplina a mitad de camino entre la Física y las ciencias médicas que forma parte de la Física Médica, presente en los planes de estudio de Medicina. En cuanto a la tercera diremos que se trata de una problemática alejada por completo de la Física que cae de lleno en el campo de la Psicoacústica.

Planteadas así las cosas, se ha de aceptar que cualquier intento de dar respuesta a las preguntas: ¿cómo y por qué oímos? ¿a qué se debe que dos sonidos musicales simultáneos puedan sonarnos

agradables (consonantes) o desagradables (disonantes)? ¿cómo discrimina nuestro oído entre los diferentes timbres de sonidos distintos de la misma altura? ¿cómo es posible que conozcamos la situación de un foco sonoro aún con los ojos vendados? etc., pasa por la consideración de todos estos problemas desde el punto de vista físico y el psicológico. Pretender abordar estos problemas desde la Física con exclusividad supone un mal inicio abocado a conclusiones parciales y, en el peor de los casos, erróneas.

He aquí las razones por las que el problema de la audición, que nos es muy cercano por afectar a todos y cada uno de los minutos de nuestra existencia, es tratado marginalmente en los planes de estudio de Física y Psicología recibiendo mayor atención en los estudios de Medicina; eso sí, supeditado a la curación de las patologías auditivas.

Estructura del oído

Es bien sabido que la onda sonora está conformada por una serie de compresiones y enrarecimientos; es por consiguiente, una onda de presión de amplitud P . El oído humano es un sofisticadísimo sistema capaz de detectar frecuencias acústicas comprendidas en el rango de 20–20.000 Hz. Algunos seres, como murciélagos y delfines, son capaces de captar frecuencias por encima de 20 kHz (ultrasonidos) y otros, como elefantes y ballenas, pueden percibir frecuencias por debajo de 20 Hz (infrasonidos). El oído humano es particularmente sofisticado, no en los márgenes de frecuencia ni en los umbrales de

audición (donde muchos animales le superan ampliamente) sino en su capacidad para distinguir los distintos timbres. Así pues, el oído humano se comporta como un sofisticado sistema analizador de sonidos; el cuerpo humano es un diseño resultante de millones de años de evolución; en ese proceso la especie humana "apostó" por el desarrollo cerebral y por la organización social compleja y, por ello, era necesario desarrollar un oído que fuera capaz de reconocer las voces de los distintos individuos del grupo.

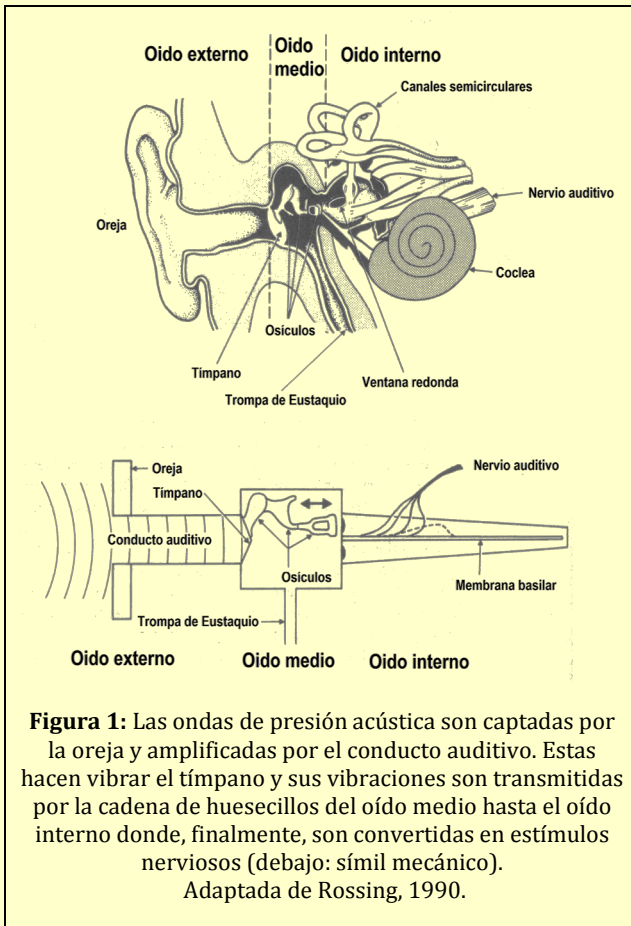


Figura 1: Las ondas de presión acústica son captadas por la oreja y amplificadas por el conducto auditivo. Estas hacen vibrar el tímpano y sus vibraciones son transmitidas por la cadena de huesecillos del oído medio hasta el oído interno donde, finalmente, son convertidas en estímulos nerviosos (debajo: símil mecánico). Adaptada de Rossing, 1990.

El oído puede detectar sonidos que en su propagación por el aire producen variaciones de presión que son muy pequeñas, del orden de $20 \mu\text{Pa}$, si se las compara con la presión atmosférica que es del orden de 105 Pa . Por otro lado, el intervalo de presiones correspondientes a sonidos audibles va de $20 \mu\text{Pa}$ a $10^8 \mu\text{Pa}$. En consecuencia, el rango de intensidades de los sonidos audibles es más de 10^{12} unidades, es decir, la intensidad del sonido más intenso que el oído puede percibir ($10^{-4} \text{ Watt/cm}^2$) es un billón de veces mayor que la de un sonido apenas audible ($10^{-16} \text{ Watt/cm}^2$). Esto equivale a un intervalo 1000 veces superior al rango de intensidades luminosas que el ojo puede ver.

La estructura del oído es un diseño, fruto de la selección natural, en el que se conjugan la

miniaturización y la eficiencia funcional. Así, la oreja cumple una doble función: amplificadora al recoger la máxima cantidad de energía acústica concentrándola en el conducto auditivo y direccional, permitiendo la localización del foco sonoro.

El conducto auditivo o meato actúa como un resonador de banda ancha, con una frecuencia de resonancia de unos 3000 Hz . Sus dimensiones medias son $0,7 \text{ cm}$ de diámetro por $2,7 \text{ cm}$ de longitud. Se comporta como un tubo tapado que resuena con los múltiplos impares de la frecuencia fundamental proporcionando una ganancia de unos 10 db en la banda de frecuencias comprendida entre 2 y 6 kHz . Su frecuencia más baja de resonancia está situada en torno a los 3000 Hz .

El tímpano es una membrana aproximadamente circular de unos 8 o 9 mm de diámetro, de 65 a 80 mm^2 de superficie, $0,1 \text{ mm}$ de espesor y 14 mg de peso. Tiene forma cónica, presentando su vértice por debajo del centro y proyectado hacia adentro. En su cara interna está adherido el martillo, primer huesecillo del oído medio. Establece el límite entre el oído externo y el medio, actuando a modo de una membrana microfónica. Su peculiar propiedad es que se trata de un resonador muy amortiguado, por lo que posee un gran intervalo de resonancia que cubre con eficacia la gama comprendida entre 20 y 20000 Hz .

Desde el punto de vista físico, el tímpano se comporta como un parche que cierra el tubo constituido por el canal auditivo. Este puede vibrar siguiendo las oscilaciones de la onda sonora que ingresa desde el exterior y trasmite al oído medio vibraciones cuyas amplitudes van desde 10 - 11 m para los sonidos más débiles hasta 2 mm para los sonidos más intensos. Presenta distintos modos de vibración a las distintas frecuencias, para bajas frecuencias vibra como un solo cuerpo rígido en torno a un eje que pasa horizontalmente por su borde superior, mientras que para frecuencias superiores a 2.400 Hz vibra en segmentos como el parche de un tambor cuyo patrón de vibración depende de cada frecuencia particular. De esta forma la vibración de las moléculas de aire producida por la onda sonora en el oído externo se convierte en el tímpano en un movimiento mecánico que se transmite al oído medio.

Los huesecillos del oído medio tienen por finalidad transmitir las vibraciones del tímpano hasta la cóclea, órgano en el que las vibraciones mecánicas son convertidas en impulsos nerviosos. Están sujetos entre sí por unos diminutos músculos que son capaces de modificar su tensión con objeto de disminuir la amplitud de los movimientos si el

sonido es intenso. Este fenómeno está controlado por el cerebro y se denomina reflejo acústico. Se trata de un efecto "sordina" con el que el oído se protege de los sonidos excesivamente intensos, evitando así posibles daños en el delicado oído interno. El reflejo acústico tarda del orden de medio segundo en entrar en acción por lo que, realmente, se está en indefensión ante sonidos violentos e inesperados, tales como disparos, explosiones, etc.

La cóclea es una cavidad hermética cuyo interior está anegado por un líquido denominado linfa. Con objeto de ahorrar espacio está arrollada en espiral, formando dos y media vueltas, con una longitud de unos 30 mm. Se encuentra dividida longitudinalmente por una membrana flexible, llamada membrana basilar, sobre la que se asientan los filamentos terminales del nervio auditivo, en número de unos 26000. A su vez, existe una segunda membrana también longitudinal, llamada membrana de Reissner. Ambas membranas dividen el volumen interno de la cóclea en tres segmentos paralelos, los cuales están llenos del fluido linfático. La cóclea tiene una sección variable, de unos 4 mm² en el lado basal y de 1 mm² en el apical. La cavidad mayor es el canal vestibular, con un volumen de unos 54 mm³ y está separada por la membrana de Reissner de otra cavidad más pequeña y de unos 7 mm³ que constituye el canal medio. Este, a su vez, está separado por la membrana basilar de una tercera cavidad de aproximadamente 37 mm³ denominada canal timpánico (Fig. 2)

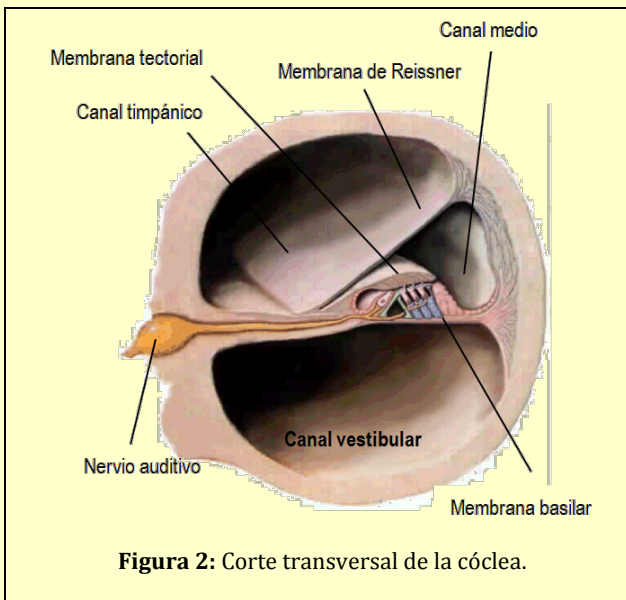


Figura 2: Corte transversal de la cóclea.

El canal medio (también llamado coclear) contiene la endolinfa, un líquido viscoso cuya finalidad primordial es la protección de los delicados terminales neuronales. El conjunto formado por la membrana basilar y los terminales nerviosos, se denomina órgano de Corti. Este complejo constituye

el "corazón" del oído, siendo su función el convertir las vibraciones mecánicas en corrientes nerviosas. Los otros dos canales, intercomunicados por el helicotrema, están llenos por la perilinfa, según muestra la figura 3.

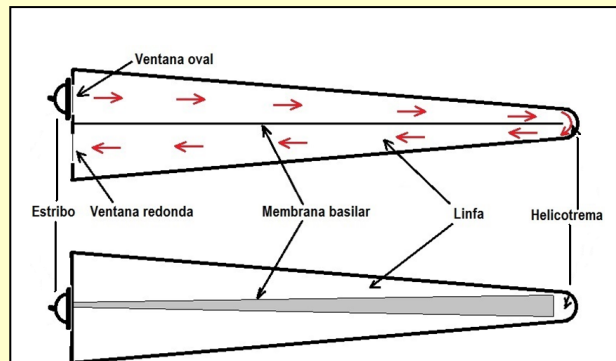


Figura 3: Esquema de la cóclea desenrollada. Arriba vista lateral mostrando la circulación de la linfa bajo los impulsos acústicos y abajo una vista superior mostrando la "asimetría" de la membrana basilar.

La audición

Se debe a Georg Von Békésy, Premio Nobel de Medicina en 1961, la explicación teórica del funcionamiento de la cóclea. Según su "Teoría de la Localización", el funcionamiento del oído interno parece ser así: Al empujar el estribo la membrana de la ventana oval se produce una sobrepresión en la parte superior del caracol que obliga a circular el fluido linfático hacia la cavidad inferior a través del helicotrema según muestra la figura 3. Ello provoca que la membrana basilar se deforme hacia abajo al tiempo que la membrana elástica que cierra la ventana redonda cede hacia afuera. Si el estribo se mueve sinusoidalmente de izquierda a derecha con una frecuencia n , el efecto producido es la aparición de una onda que se desplaza de izquierda a derecha por la membrana basilar.

La figura 4 muestra cómo se desplaza dicha onda; la velocidad de avance de la perturbación depende de su frecuencia y también del ancho y rigidez de la membrana basilar. Dado que ésta última es más estrecha y rígida por su lado izquierdo (extremo basal) y más ancha y flexible por su lado derecho (extremo apical) el resultado es que en algún punto de la cóclea la velocidad de la onda llega a ser cero (en nuestro esquema, el punto P); en ese punto la onda se para y la energía se absorbe. Llegamos así a la conclusión de que cada punto de la membrana basilar responde de la manera descrita a una determinada frecuencia. Las más altas son detectadas en el extremo basal y las más bajas en el apical (Figura 5).

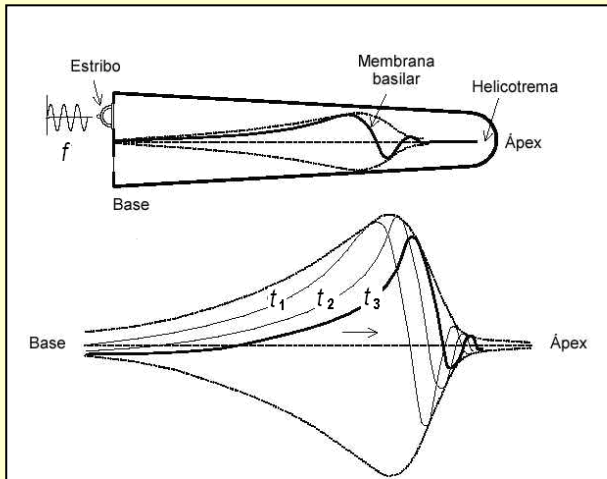


Figura 4: Esquema que muestra la excitación selectiva de la membrana basilar por una determinada frecuencia. La membrana basilar es excitada con un movimiento altamente amortiguado con una amplitud que aumenta gradualmente con la distancia a partir del estribo, alcanza un máximo y después disminuye rápidamente hacia el vértice. Adaptada de Pierce, 1983.

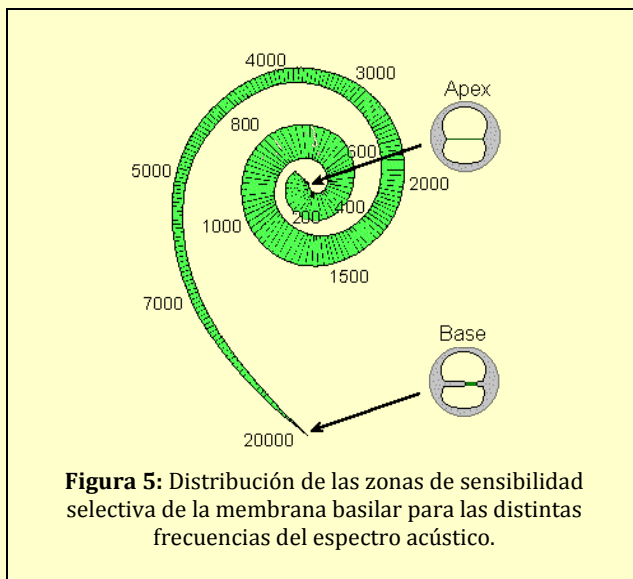


Figura 5: Distribución de las zonas de sensibilidad selectiva de la membrana basilar para las distintas frecuencias del espectro acústico.

Demostración 1: Excitación de la membrana basilar a distintas frecuencias.

Excitación coclear.

La excitación de los terminales neuronales tiene lugar debido a que estos están acoplados a la membrana basilar en tanto que la membrana tectorial está acoplada a la lámina ósea. Así, los movimientos relativos generados entre ambos elementos flexionan las células pilosas y excitan sus

terminaciones nerviosas, produciéndose los impulsos eléctricos. Ahora bien, las distintas frecuencias no afectan en igual medida al sistema auditivo. Ciertamente, la banda de frecuencias audibles se extiende desde 20 hasta 20000 Hz, pero la sensibilidad del oído es máxima en la región de 2000-5000 Hz y decrece a bajas y altas frecuencias, tal y como muestra la figura 6.

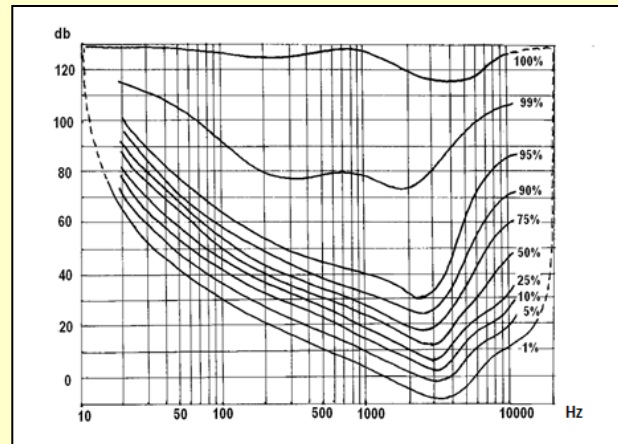


Figura 6: Curvas representativas de los umbrales de audición para una extensa población a distintas frecuencias. Los valores porcentuales indican el tanto por ciento de población cuyos umbrales están por debajo de la curva. Salta a la vista que la máxima sensibilidad de nuestro oído se sitúa en la banda 1000-5000 Hz. Por debajo de 20 Hz y por encima de 20.000 Hz somos completamente sordos. Adaptada de Kinsler et al., 1992.

Cuando el oído recibe un sonido musical con todos sus armónicos, cada una de las frecuencias captadas excita un punto de la membrana basilar, de este modo el cerebro puede interpretar no sólo la altura del sonido, sino también su timbre, sin más que discernir qué terminaciones nerviosas fueron excitadas y con qué intensidad lo fueron. De alguna manera pues, el oído interno actúa como un eficazísimo analizador de sonidos. Pero esto no es todo, pues la sensación de altura también puede ser detectada por el cerebro a través de la velocidad con que se suceden los impulsos que llegan al oído. Tal es el caso de la sensación de altura que produce una sirena.

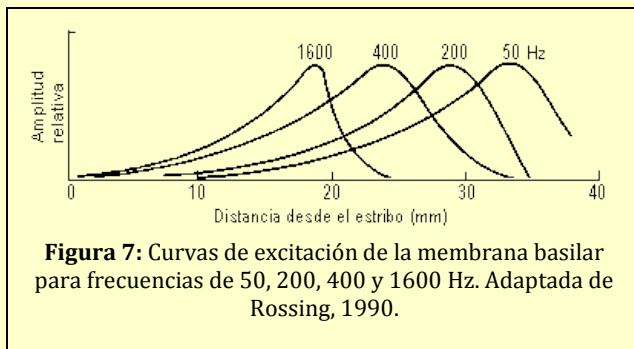
Resumiendo, el oído tiene dos maneras de estimar la altura, una es por el punto de excitación de la membrana basilar. El otro es por la periodicidad con que se envía al cerebro los impulsos nerviosos a través de diferentes fibras, desde distintos puntos de la membrana basilar.

Banda crítica

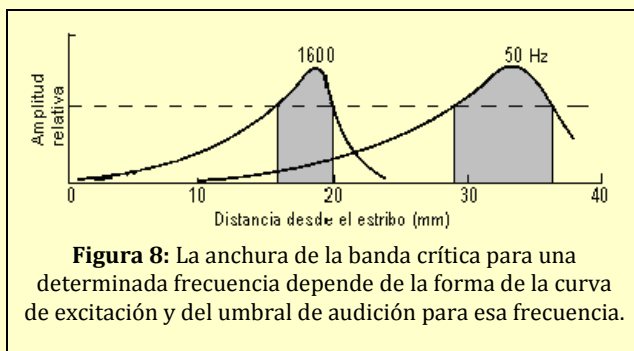
En el punto anterior hemos visto que, cuando el oído capta un tono puro, se excita una determinada zona

de la membrana basilar. Esta excitación no se localiza en un punto concreto sino que se extiende por delante y por detrás del pico de máxima excitación. El cerebro es capaz de detectar ese pico y de ello detrae la sensación de altura de los sonidos (Figura 7).

En concordancia con esta idea, se define banda crítica como aquella porción de la membrana basilar que resulta excitada a causa de un tono puro por encima del nivel umbral de audición. Se estima que el rango audible se compone de 24 bandas críticas de una longitud promedio de 1,3 mm conteniendo cada una de ellas 1300 terminales neuronales.



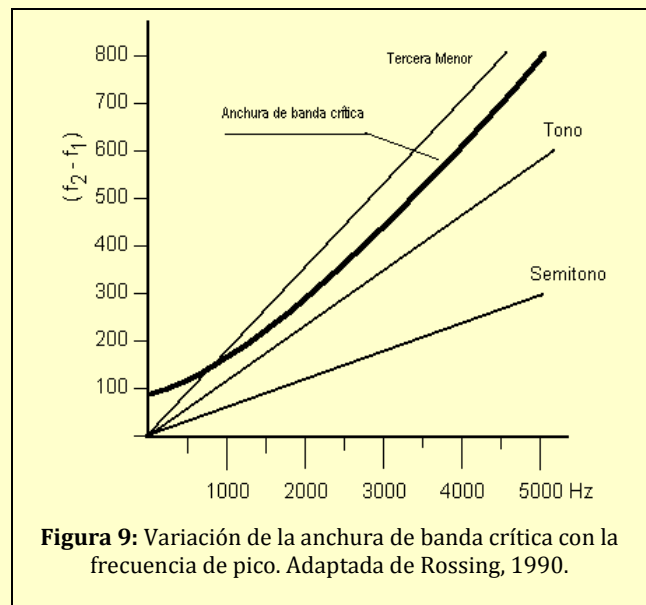
Desde otro punto de vista, la banda crítica puede considerarse como la banda de frecuencias con la que dos o más tonos puros excitan casi las mismas células auditivas de la membrana basilar, siendo así difícil distinguirlos como tonos separados. Un ruido cuya anchura de banda sea inferior a la banda crítica se comporta a efectos auditivos como si fuera un tono puro. También cabe decir que la banda crítica es el rango de frecuencias en el que tonos simples suman sus sonoridades. Por el contrario, si las frecuencias de esos tonos difieren en más que el ancho de la banda crítica, no las suman y son percibidos como tonos simultáneos distintos.



Según se aprecia en la figura 8, el ancho de banda crítica no es uniforme sino que varía con respecto de la frecuencia del pico, de acuerdo con la siguiente tabla:

Frecuencia pico ν (Hz)	100	200	500	1000	2000	5000	10000
Ancho de banda $\Delta\nu$ (Hz)	90	90	110	150	280	700	1200

El ancho de banda crítica se mantiene constante, del orden de 90 Hz, a bajas frecuencias (entre 100 y 500 Hz) y es casi proporcional a la frecuencia de pico a altas frecuencias. En general, se acepta que es algo menor que 1/3 de octava, o lo que es lo mismo, 4 semitonos, equivalentes a un intervalo de Tercera Mayor (Figura 9).



El hecho de que el ancho de banda crítica sea equiparable a la amplitud del intervalo de Tercera Menor concuerda con lo establecido por la teoría de la consonancia musical, en la que se considera la Tercera Menor como el intervalo consonante más pequeño.

Intensidad acústica y sensación acústica

Ningún sentido humano es analógico, esto es, no existe proporcionalidad directa entre la intensidad del estímulo y el grado de la sensación percibida. En el caso del oído, podemos percibir desde sonidos extremadamente débiles, próximos al umbral de audición, hasta sonidos de intensidad un billón de veces superior. Sería impensable que el cerebro fuese estimulado de forma proporcional a la intensidad del estímulo, ello sería psíquicamente demoledor. En consecuencia, la Naturaleza ha dispuesto que la sensación que un estímulo acústico produce sea, *grosso modo*, proporcional al logaritmo decimal de la intensidad de este. Por ello, en la física de la audición se distinguen dos magnitudes que no guardan proporcionalidad sencilla entre sí. Estas son la intensidad acústica y el nivel acústico. La primera

se define como la energía en forma de onda sonora que atraviesa en la unidad de tiempo a la unidad de superficie, perpendicularmente dispuesta a la dirección de propagación.

Niveles acústicos

En cuanto al *nivel acústico*, empezaremos afirmando que dos focos idénticos actuando simultáneamente, no producen en el oído una sensación doble que uno sólo. Esto se debe a que la sensación sonora se rige, de forma aproximada, por la ley de Weber-Fletcher, según la cual, la sensación es función lineal de logaritmo de la intensidad, es decir, que la sensación crece en progresión aritmética cuando la intensidad lo hace en progresión geométrica. El nivel acústico es una magnitud que se ajusta bastante a la sensación que los sonidos producen en nuestro sistema auditivo. El nivel acústico puede cuantificarse en función de la intensidad, de la presión acústica y de la potencia acústica. Por ello, es frecuente hablar de nivel de intensidad acústica (L_I), nivel de presión acústica (L_p) y nivel de potencia acústica (L_w) (en función de las conveniencias del momento, se utiliza una de las tres expresiones) y se definen como el logaritmo del cociente entre la intensidad, la presión o la potencia acústica y la intensidad, la presión o la potencia acústica umbral (mínima audible), respectivamente. Las tres expresiones para el nivel acústico son:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} ; L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} ; L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

Los umbrales de referencia para la definición de estos niveles son: $I_0=10^{-12} \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}$; $W_0=10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ y $P_0=2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$. La presencia de los coeficientes se debe a la necesidad de adaptar estas expresiones a la escala de los decibelios. Así, por ejemplo, si la intensidad de un sonido es 10000 veces superior al valor umbral, entonces:

$$L_I = 10 \log 10000 = 10.4 = 40 \text{ db}$$

Igualmente, si la potencia acústica de un sonido 10^{-6} Wm^{-2} su nivel acústico será:

$$L_w = 10 \log \frac{10^{-6}}{10^{-12}} = 10 \log 10^6 = 60 \text{ db}$$

El coeficiente de la expresión del nivel de presión acústica es doble que los otros dos debido al valor umbral de referencia para la presión acústica. Así, por ejemplo, si la presión acústica de un sonido es 10^{-3} Nm^{-2} su nivel de presión acústica será:

$$L_p = 20 \log \frac{10^{-3}}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \log 50 = 34 \text{ db}$$

Cuando se trata de la sensación sonora producida por el sonido ambiental, se habla de "nivel del ruido" y se mide también en decibelios.

Demostración 2: La escala de decibelios.

Escala decibelios.

Pero aún queda un problema, pues la sensación acústica es una magnitud que siempre está referida a una intensidad umbral. ¿Cuál es ese umbral? Sabemos que hay personas con un oído muy fino y otras que oyen con dificultad; sabemos también que el umbral de un mismo individuo varía según sus condiciones fisiológicas del momento y no menos cierto es que el oído humano no es igualmente sensible a todas las frecuencias. Por todo ello, si se quiere disponer de unos valores umbrales de aplicabilidad lo más extensa posible, no hay más remedio que recurrir a la estadística y elegir una frecuencia patrón. La comunidad internacional de la Acústica tiene establecido como valor para ese umbral:

$$I_0=10^{-16} \text{ Wcm}^{-2} \text{ (a 1000 Hz)}$$

Aceptado este convenio, el nivel acústico

$$L_I = 10 \log \frac{I}{10^{-16}}$$

se mide en unas nuevas unidades, llamadas fonos. Con frecuencia, el nivel acústico medido en fonos se denomina *loudness*. Obviamente, los niveles acústicos medidos en fonos y en decibelios no tienen el mismo valor, pero son bastante próximos. El estudio realizado sobre centenares de individuos permite dibujar las líneas isofónicas, que expresan los niveles de presión acústica (Igualmente, se pueden dibujar las curvas referidas a niveles de intensidad, las cuales no difieren sustancialmente de éstas) que, a distintas frecuencias, proporcionan un mismo nivel de sensación *loudness*.

La figura 10 corresponde al diagrama de las isolíneas de sensación acústica para toda la gama de frecuencias audibles, expresadas en fonos. La curva inferior de cero fonos es la de los sonidos de sensación nula, mientras que la superior corresponde a los sonidos que producen sensación dolorosa. Ello indica que sólo podemos oír sonidos comprendidos entre 0 y 120 fonos. En ella se observa que la sensibilidad del oído es nula por debajo de 16 Hz y por encima de 20000 Hz, siendo máxima a 3000 Hz.

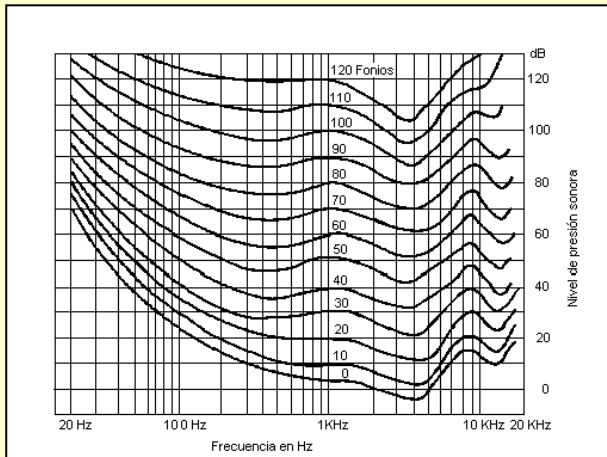


Figura 10: Curvas isofónicas para distintos niveles de sensación acústica. Los mínimos de las curvas indican las zonas de mayor sensibilidad. Así, por ejemplo, un tono puro de 1,1 kHz cuyo nivel de presión sea 70 db y un tono puro de 4 kHz cuyo nivel de presión sea 60 db producirán un nivel de sensación de 70 fonos. Para alcanzar esa misma sensación en la frecuencia de 40 Hz se requerirá un nivel de presión de 90 db y si la frecuencia del tono es 10 kHz, se necesitará un nivel de presión algo superior a 75 db para alcanzar el mismo nivel de sensación.
Adaptada de Rossing, 1990.

Demostración 3: Respuesta del oído a diferentes frecuencias.

[Respuesta oído.](#)

Sensación acústica

En el punto anterior hemos visto la relación que existe entre la magnitud del estímulo acústico y la sensación que este produce en el sistema auditivo. La ley logarítmica de Weber-Fletcher es aproximada y, verdaderamente, ni los niveles expresados en db ni los expresados en fonos se ajustan totalmente a la sensación subjetiva que el sonido produce y mucho menos para todas las frecuencias del espectro audible. Por ello, en un intento de mejorar la cuantificación de la sensación acústica de los sonidos, se ha establecido la escala sónica. En ella, la unidad es el sono, el cual se define como la sensación acústica que produce un tono puro de 1 KHz cuyo nivel de intensidad sea 40 fonos.

Para niveles de intensidad de 40 fonos o superiores, la sensación subjetiva expresada en sonos se obtiene por aplicación de la fórmula empírica propuesta por la *International Standards Organization (ISO)*:

$$S = 2^{(L_I - 40)/10}$$

El diagrama de la figura 11 muestra el comportamiento del sistema psicoacústico a lo largo del espectro audible para diversos niveles de presión acústica. Destaca en ellas el máximo que aparece en la banda de 2000–4000 Hz, lo cual se corresponde con el hecho de que este es el margen de frecuencias para el que el oído humano registra su mayor sensibilidad. También son evidentes los máximos más amplios y menos pronunciados en la banda comprendida entre 100 y 800 Hz, lo cual tiene su lógica si se piensa que nuestro sentido auditivo es el resultado de la evolución natural en una especie como la nuestra, en la que la supervivencia y el éxito se fundamenta en la intercomunicación hablada entre los individuos del grupo, siendo esta banda la que aglutina el mayor número de sonidos propios del habla.

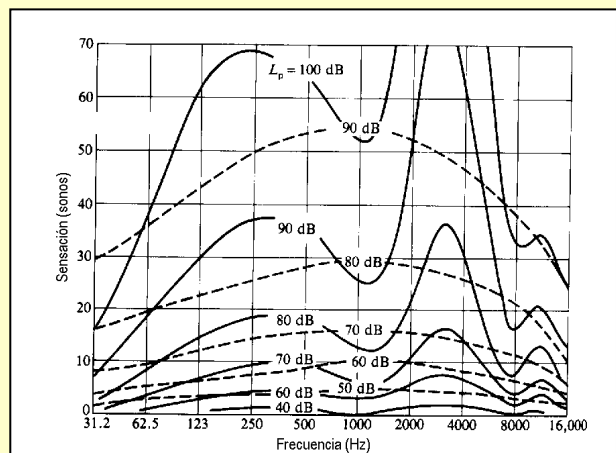


Figura 11: Curvas sónicas representativas de la sensación producida por tonos puros (trazo continuo) y tonos complejos de cinco armónicos (líneas de trazos) a lo largo de las frecuencias del espectro audible, para diversos niveles de presión L_p (dB).
Adaptada de Crocker, 1998.

Demostración 4: La escala loudness o de las sensaciones acústicas.

[Loudness.](#)

Conclusiones

El oído humano es un sistema complejo y miniaturizado cuya finalidad es captar y concentrar las ondas de presión para convertirlas en impulsos nerviosos. Si bien las energías requeridas para su excitación son mínimas, lo más portentoso del oído es su eficacia en la detección de las diferentes frecuencias y su capacidad para discernir entre sus distintos valores.

Forma un conjunto indisoluble con el cerebro aportando a este los impulsos nerviosos auditivos

que luego se transforman en sensaciones acústicas. Su funcionamiento responde a las leyes físicas si bien su complejidad hace difícil el establecimiento de un modelo científico sencillo sobre el que elaborar leyes que puedan expresarse en ecuaciones matemáticas (igualmente sucede con el resto del cuerpo humano).

No puede abordarse el estudio del fenómeno auditivo desde un punto de vista netamente físico que se refiera únicamente al oído. Es preciso considerar en su conjunto el sistema auditivo, en el que también interviene el cerebro. Este último se rige por leyes psicológicas que nada tienen que ver con la Física y ello hace arduo el estudio del problema de la audición.

Para saber más

BÉKÉSY, G.V., (1960) *"Experiments in hearing"* Acoustical Society of America
BLAUERT, J. (1997) *"Spatial Hearing"* The MIT Press, London

EVEREST, F.A., (2001) *"Master Handbook of acoustics"* McGraw Hill, New York
HALL, D.E., (1980) *"Musical Acoustics"* Brooks-Cole Publ. Company, Pacific Grove, California.
HELMHOLTZ, H. (1954) *"On the sensations of tone"* Dover Publ., inc., New York
KINSLER, L.E., FREY, A.R., COPPENS, A.B. Y SANDERS, J.V., (1992) *"Fundamentos de Acústica"* Editorial Limusa, S.A., Noriega Eds., Mexico.
MERINO, M. (1998) "Some difficulties in teaching the properties of sound", *Phys. Educ.*, 33, 2, pp. 101-104
MOORE, B.C.J., (1997) *"An introduction to the Psychology of hearing"* Academic Press, San Diego.
PIERCE, J.R., (1983) *"The science of musical sound"* Freeman and Company, Eds., New York
RAICHEL, D.R., (2000) *The science and applications of Acoustics"* Springer-Verlag Eds., New York
RAYLEIGH, J.W.S., (1945) *"The theory of sound"* Dover Publ., Inc., New York
RECUERO, M., (2000) *"Ingeniería Acústica"* Paraninfo, Ed., Madrid
ROSSING, T.D., (1990) *"The science of sound"* Addison-Wesley Publ., New York
ROSSING, T.D. & FLETCHER, N.H. (1995) *"Principles of vibration and sound"* Springer-Verlag Eds., New York

Nota editorial

La descarga de los audiovisuales se produce en formato Power Point tipo autopresentación; sin embargo, dependiendo del navegador utilizado puede abrir el archivo en formato edición. El lector deberá reproducir la presentación para acceder al sonido de cada diapositiva.

La totalidad de los contenidos de este artículo, así como los de otros que pudieran ser continuación de éste, formaron parte de los materiales elaborados para la tesis de D. Eduardo Verde Romera, bajo la dirección del Dr. M. Merino (autor principal del artículo) quien fue galardonado con el Premio de la Real Academia de Doctores de España en 2010 y por el Colegio de Doctores y Licenciados en 2011.

Estos contenidos pueden ser consultados de forma más exhaustiva en el Tratado "Las vibraciones de la música", de J. M. Merino, cuya ficha puede ser consultada en el siguiente enlace URL:

<http://www.editorial-club-universitario.es/libro.asp?ref=2232>