

GENERALIDADES SOBRE EL OIDO

A pesar de las profundas investigaciones que hasta la fecha se han realizado sobre el aparato auditivo humano, la verdad es que siguen existiendo cuestiones no resueltas del todo satisfactoriamente. Nuestros conocimientos, sin embargo, son lo bastante amplios para explicar el mecanismo del oído y las características del aparato, su respuesta a las frecuencias, etc.

DETALLES FISIOLÓGICOS DEL OIDO

La clave del fenómeno auditivo es que las variaciones de presión del aire causadas por las ondas sonoras se convierten en vibraciones mecánicas que a su vez producen vibraciones de un fluido. Estas estimulan a terminaciones nerviosas que generan impulsos eléctricos, y el cerebro, recogiendo los, los transforma en sensaciones auditivas.

Tal es el principio general del funcionamiento del oído. Sus principales partes anatómicas se dividen en:

1. Acústicas
2. Mecánicas.
3. Fluido-eléctricas.

Al estudiar su estructura se distinguen tres zonas: oído externo, oído medio y oído interno (fig. 2.1).

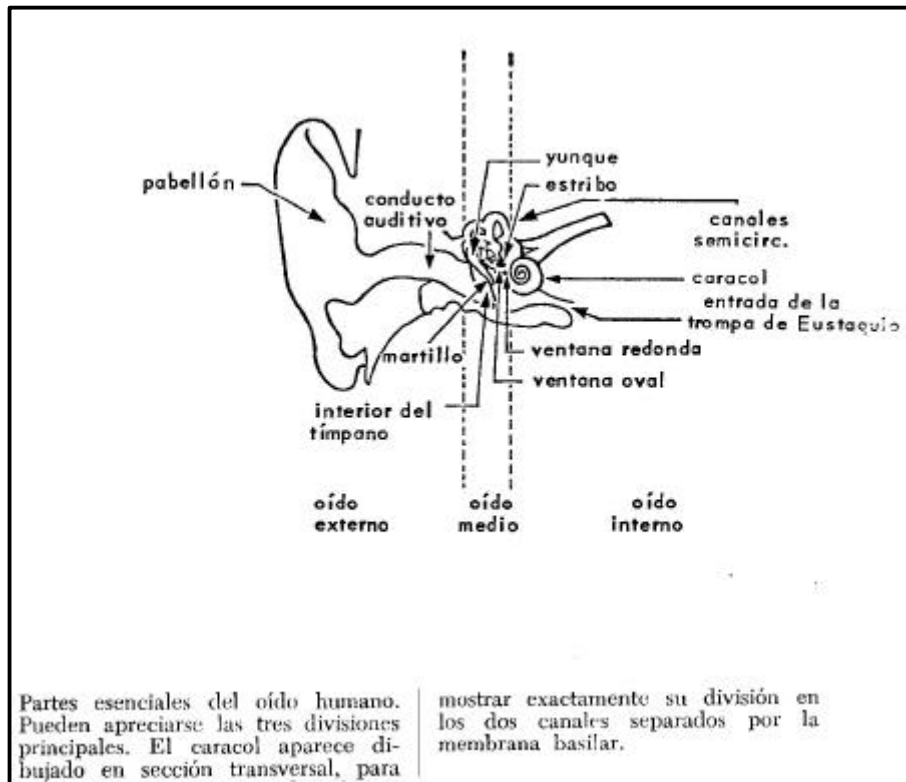


Fig. 2.1

La parte exterior más visible es el pabellón, que en los seres humanos ha perdido su finalidad de ayudar a recoger las ondas sonoras, pero que en ciertos animales sigue sirviendo para dicho objeto. Desde el pabellón parte hacia adentro un conducto cuyas dimensiones vienen a ser de 25 mm. de largo por 7 mm. de ancho, cerrado en su extremo interior por el tímpano, fina membrana que vibra al recibir una onda sonora.

El tímpano es por así decirlo el primer elemento mecánico del oído, y a partir de él comienza la parte media de éste. Tocando con el tímpano se halla el huesillo llamado «martillo», unido por ligamentos a un segundo hueso diminuto llamado «yunque», el cual toca a su vez con el «estribo», tercer huesillo de la serie. El peso total de los tres es de unos 63 miligramos, y su tamaño aproximado, el de una cabeza de cerilla. Están situados en una cavidad llena de aire que se comunica con la faringe por la trompa de Eustaquio, la cual funciona como un dispositivo estabilizador de presión, haciendo que la presión del oído interno sea la misma que la atmosférica. Esta presión actuará sobre la parte interna del tímpano; la parte externa será afectada por la presión de la onda sonora, y la diferencia entre estas dos presiones, debida a la onda sonora, hará que vibre el tímpano.

El último de los huesillos, el estribo, se apoya contra un orificio denominado «ventana oval», que marca la divisoria entre oído medio e interno. Este está constituido por una cavidad de paredes óseas llena de líquido. Después de la ventana oval viene un espacio llamado vestíbulo, que conduce al órgano final del oído, el «caracol».

El caracol tiene la forma de un cono hueco en espiral, espiral que tiene $2 \frac{3}{4}$ vueltas y un hueso perforado por el que pasa, camino del cerebro, el nervio acústico, no sin antes juntarse con el que procede de los canales semicirculares, también situados en el oído interno y cuya misión no es acústica, sino la importante de proporcionarnos el sentido del equilibrio.

El caracol tiene en esencia dos canales, separados por la membrana basilar, sobre la que reposa el órgano de Corti. La comunicación con el oído medio ocurre, además de por la ventana oval, por la «ventana redonda», ambas obturadas por sendas membranas.

Como quiera que la ventana oval está gobernada por el estribo y la redonda es capaz de vibrar, y hallándose los dos canales en comunicación, se deduce que el líquido se pondrá en movimiento. Este afecta a la membrana basilar, que tiene una complicada serie de células sensoriales en forma de filamentos finísimos, los cuales se estimulan al moverse aquella membrana. La estimulación de un grupo determinado de filamentos depende de la frecuencia de la onda sonora, y esto demuestra cómo el caracol actúa en principio como un analizador de frecuencias. Cuando la intensidad de una frecuencia dada se hace mayor, no solamente vibra más el punto respectivo de la membrana basilar, sino que hay una propagación de movimiento a ambos lados de dicho punto. La sensación de fuerza de un sonido parece depender del número de impulsos nerviosos enviados al cerebro.

Estas células producen los potenciales eléctricos que gobiernan las señales enviadas a lo largo del sistema nervioso hasta los centros receptivos del cerebro.

Las siguientes dimensiones mostrarán la pequeñez del caracol y de sus partes constituyentes. El caracol en sí tiene unos 5 mm. de la base hasta la cúspide, y 9 mm. en su parte más ancha. Si se estirara completamente, su longitud sería de 35 mm. El área de la parte del estribo adosada a la ventana oval es de unos 3 mm^2 , y la del orificio entre los dos canales de $0,25 \text{ mm}^2$. El área de su sección transversal varía, siendo más ancha en el vestíbulo y más estrecha en la cúspide. La membrana basilar tiene de ancho unos 0,25 mm., y de largo unos 32 mm., aunque estas dimensiones varían algo según los casos. Las células sensoriales filamentosas son en número de varios miles, dispuestas sobre la membrana basilar con arreglo a una base de frecuencias: las más altas se encuentran cerca del vestíbulo, y las más bajas en la cúspide.

El oído puede percibir sonidos en una amplia gama de frecuencias e intensidades, y distinguir asimismo ligerísimos cambios en estos dos factores.

SENSIBILIDAD DEL OIDO

Si tomamos un diapasón y le hacemos sonar, las ondas que produce serán audibles inmediatamente. Poco a poco la fuerza del sonido irá disminuyendo y el oído acabará por no percibir nada. Sin embargo, tocando levemente el diapasón con los dedos, se notará que sigue vibrando. El instrumento tiene, pues, que seguir haciendo vibrar al aire; pero puesto que no oímos nada debe de haber un nivel mínimo de intensidad por debajo del cual nuestro órgano auditivo no es capaz de captar las ondas sonoras. El nivel de intensidad que divide los sonidos audibles y los no audibles, se llama «umbral de audición».

Supóngase que tenemos un manantial sonoro, susceptible de aumentar su intensidad en una amplia gama. Comenzando desde el umbral de audición, si elevamos la intensidad, aumentará la potencia sonora. Este proceso continuará hasta que la escucha nos moleste y aun llegue a ser dolorosa. Hay, pues, un nivel que separa los sonidos que el oído humano recibe sin desagrado y los que son molestos o llegan a ser hirientes por lo intensos. Este nivel se denomina «umbral del dolor». Los dos niveles o umbrales marcan los límites de la sensación auditiva normal. Más allá de uno y otro, o no existe percepción, o el sonido es doloroso.

Siendo la audición algo puramente subjetivo, es evidente que los dos umbrales no pueden establecerse con exactitud, ya que varían según la persona. La fig. 2.2 corresponde a un promedio general obtenido mediante el examen de infinidad de personas.

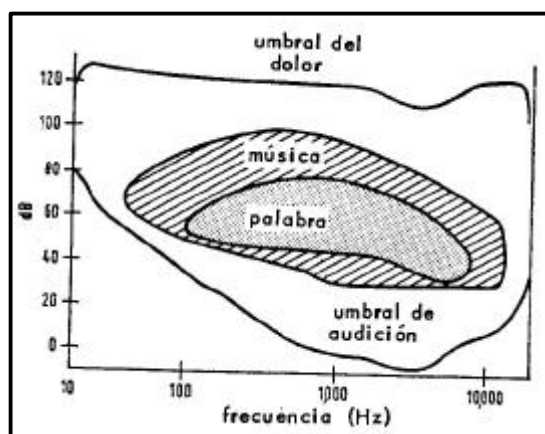


Fig. 2.2

Al observar el umbral de audición usando tonos puros, es decir, notas de una sola frecuencia, se ve que la intensidad mínima de sonido que se precisa para oír la nota difiere ampliamente a lo largo de la gama de frecuencias audibles.

La mayor sensibilidad del oído se halla en la zona de 1.000 a 5.000 Hz. Con frecuencias superiores, la sensibilidad va disminuyendo hasta que, cuando llega a ser muy elevada, el aumento de la intensidad del sonido no produce sensación alguna auditiva. Por debajo de los 1.000 Hz hace falta mayor intensidad para oír la nota; y al llegar a una frecuencia baja pasa lo mismo que en el caso anterior: el oído no percibe nada independientemente de su intensidad.

Las frecuencias que marcan los límites de la audibilidad varían considerablemente, no solamente según el individuo, sino según la edad. Con los años el oído se debilita. Para los adultos se suele citar una gama máxima de 20 a 20.000 Hz pero más representativa sería la de 30 a 17.000 Hz.

Al ir envejeciendo una persona, experimenta una notable pérdida de sensibilidad para las frecuencias altas. La relativa a las bajas también disminuye, pero no tanto. Por experimentos se

sabe que dicha pérdida de sensibilidad a frecuencias altas es mayor en los hombres que en las mujeres, fenómeno contrapesado por el hecho de que éstas las pierden más a bajas frecuencias.

La intensidad necesaria para producir dolor no presenta las mismas variaciones con la frecuencia que el umbral de audición. El umbral del dolor, si bien tiene leves variaciones es más uniforme.

Puesto que estos dos umbrales no son líneas paralelas, la gama de intensidad a que funciona el oído variará con la frecuencia. A las frecuencias más sensibles, la gama de intensidades es amplia; mientras que hacia los límites de la gama de frecuencias la diferencia de intensidades entre los dos umbrales es estrecha. En su máximo, la gama de intensidades va desde unos 10^{-16} a 10^{-4} vatios/cm², o sea una gama de 10^{-14} vatios/cm². Expresado en decibelios sería como sigue:

Relación en decibelios = $10 \log$ (relación de intensidades)

$$10 * \log \frac{10^{-16}}{10^{-4}} = 10 * \log 10^{-12} = -120dB$$

POTENCIA SONORA

Es la magnitud de la sensación auditiva que produce un sonido. Acabamos de ver que la intensidad del umbral de audición varía a lo largo de la gama de frecuencias, lo cual demuestra que la potencia de un sonido no depende únicamente de su intensidad. Si tomamos nota de 1.000 Hz en el umbral de audición y aumentamos su intensidad, su potencia sonora aumentará también. Suponiendo que el aumento de intensidad hubiera sido desde 10^{-16} vatios/cm² hasta 10^{-13} vatios/cm², esto es, en una gama de 30 dB, la potencia sonora se incrementaría naturalmente hasta cierto valor. Ahora bien: si cambiásemos la frecuencia de la nota desde 1.000 Hz a 100 Hz, comprobaríamos que apenas se notaría variación de potencia. Este nivel de intensidad, 10^{-13} vatios/cm², es el umbral de capacidad perceptiva para la nota más baja.

Deducimos, por tanto, que la potencia sonora depende de la frecuencia y de la intensidad. Es también evidente la inutilidad del decibelio en mediciones de potencia sonora, a menos que se modifique de alguna manera, puesto que es una relación de dos intensidades. Al juzgar sobre potencia sonora habremos de usar necesariamente procedimientos subjetivos: el oyente ha de estimar el efecto de cambiar la intensidad o la frecuencia. Esto nos lleva a la unidad de potencia sonora llamada «fono».

NIVELES ACUSTICOS. EL FONO

Al usar el fono, la técnica es comparar la potencia sonora de una nota de referencia con la de una nota dada. La intensidad de la primera puede ajustarse hasta que se perciba tan patente como la segunda. La cuantía en que la nota de referencia se ha alejado de su valor de intensidad correspondiente al umbral de audición, da el nivel de potencia sonora en fonos.

Hace falta especificar no sólo la frecuencia de la nota de referencia, sino además su valor de intensidad en el umbral de audición. La nota de referencia usada es un tono puro de 1.000 Hz y la intensidad de referencia 10^{-16} vatios/cm².

En condiciones de audición normales, un oyente no tiene dificultad en apreciar cuándo la potencia sonora de la nota de 1.000 Hz es igual a la de la nota dada. Para tal identificación, la intensidad de dicha nota de 1.000 Hz habrá tenido que elevarse cierto número de decibelios sobre el valor de la intensidad de referencia. El número de dB indica la potencia sonora equivalente (o nivel de potencia sonora de la nota dada) en fonos.

Otra forma de enfocar la cuestión sería decir que a 1.000 Hz cuando hay 120 dB entre los umbrales, hay 120 fonos. Los decibelios y los fonos se consideran iguales a la frecuencia de

referencia.

Las curvas de la fig. 2.2 se llaman *curvas isofónicas*. En definitiva, un fono es un decibelio SPL (Sound Pressure Level) a 1 KHz.

Comparemos ahora dos sonidos cualesquiera, senoidales o complejos. Se puede, con una incertidumbre más o menos grande, según los casos, regular uno de los dos para que dé la misma sensación de intensidad subjetiva que el otro. Se dice que tienen entonces *el mismo nivel acústico L*, insisto en que se toman como términos de referencia los sonidos de frecuencia 1.000 Hz.

Ordenes de magnitud de algunos niveles sonoros:

Umbral de la audición	0 por definición
Susurro	20 fonos
Música suave	40 fonos
Conversación agitada	60 fonos
Ruido alborotado (griterío)	80 fonos
Proximidad de un avión	100 fonos

La medida de los niveles acústicos se hace corrientemente con ayuda de los sonómetros, este nombre es preferible al de *decibelímetro*, que debería reservarse a los instrumentos que indican una relación entre presiones o flujos acústicos, y no niveles fisiológicos.

Un sonómetro (fonómetro) consiste esencialmente en un micrófono sobre el que actúa el sonido estudiado y un circuito eléctrico con amplificadores y filtros, unido a un miliamperímetro indicado o grabador, graduado en fonos (o dB). El papel de los filtros es reducir la corriente, proporcionalmente a las vibraciones de la sensibilidad del sistema auditivo con la frecuencia; esta reducción debe variar según la intensidad y también con el timbre (los efectos de los diversos sonidos simultáneos no son aditivos).

TIMBRE DE LOS SONIDOS

Es la cualidad que distingue a los sonidos del mismo tono y de igual intensidad emitidos por fuentes de naturalezas diferentes, cuando los diferentes instrumentos de la orquesta se acordan, se puede a pesar de todo distinguir por su timbre el LA emitido por cada uno de ellos. Por ejemplo la percusión de un martillo de goma (ataque de un piano) y por rozamiento con un cuerpo duro de corte vivo (ataque del clavecín) la diferencia de timbre se percibe fácilmente.

Las diferencias de timbre de los dos sonidos musicales se explican por el hecho de que estos sonidos no son simples, es decir, no son debidos a vibraciones senoidales, sino que contienen armónicos superpuestos al sonido fundamental que fina el tono.

Es muy raro encontrar un sonido realmente simple, no obstante, el sonido de un diapasón es simple (excepto al principio, cuando se le acaba de poner en vibración); ocurre lo mismo con el de una esfera hueca como la de un resonador esférico, cuando se hace vibrar el aire del interior soplando en la abertura, un tubo cerrado muy largo da también un sonido casí simple. Todos estos sonidos tienen el mismo timbre suave y un poco apagado, se les emplea poco en música porque no tienen "brillo".

TONO

Lo definimos en el capítulo 1 como la cualidad subjetiva de una nota que hace posible situarla en la escala musical. El tono, aunque determinado principalmente por la frecuencia con que vibra el cuerpo sonoro, depende también de la intensidad de la nota.

Con tonos puros y bajos niveles de intensidad, depende solamente de la frecuencia; es decir, el tono de una nota permanece el mismo aunque alteremos la intensidad. Sin embargo, si aquellos están 40 decibelios por encima del umbral de audición, se comprueba, respecto a las notas de baja frecuencia, que se produce un cambio de tono si la intensidad la alteramos. Al aumentar la intensidad desciende el tono aparente. Si la frecuencia es variable, un oyente puede elevarla para restablecer el tono cuando la intensidad crece. Este fenómeno es más evidente alrededor de los 200 Hz. Con notas de alta frecuencia, el cambio sucede al revés: al incrementar la intensidad aumenta el tono de la nota.

Tal variación del tono con la intensidad está limitado a las bajas y altas frecuencias. Con medias, cuya gama sea de 750 a 6.000 Hz aproximadamente, hay poco o ningún cambio de tono.

Con notas que combinan varias frecuencias, las de un instrumento musical, por ejemplo, la aparición del tono es algo diferente. Se puede eliminar o aumentar la frecuencia más baja sin que el tono de la nota total sufra alteración.

ENMASCARAMIENTO

Si oyendo nosotros una nota suena otra, esta segunda quizá no la percibamos aunque su frecuencia e intensidad caigan dentro de la gama audible. En otros términos: hallándose el oído afectado por un sonido, se reduce su sensibilidad para otros. A esto se llama enmascaramiento, y su efecto se advierte con facilidad.

El enmascaramiento real depende de que el tono enmascarador sea puro o sea un ruido. Por experimentos se conoce el grado de intensidad en que ha de ser incrementado un sonido para que empiece a ser audible cuando se halla presente un tono o ruido enmascarador.

PERCEPCIÓN DIRECCIONAL DEL OIDO

El problema de por qué somos capaces de localizar la dirección de que procede un sonido ha sido objeto de un sinnúmero de investigaciones. Éstas todavía tomaron mayor vuelo al empezar a desarrollarse la grabación y la reproducción estereofónicas.

Esta facultad de direccionalidad del sonido es bastante compleja y depende de muchos factores. En esencia puede atribuirse a que la impresión acústica de lo que nos rodea llega al cerebro por dos canales, los cuales, naturalmente, comienzan en los oídos; y como quiera que entre estos hay cierta distancia, son afectados con una ligera diferencia. Tal diferencia es como una clave que puede interpretar el cerebro en virtud del acopio que posee de experiencias y hábitos acústicos, y de aquí su capacidad de identificar la dirección de la fuente sonora.

Veamos ahora cómo se producen algunas de las claves acústicas mencionadas. Una teoría antigua y atractiva era la de que las señales en los oídos difieren en *intensidad*, diferencia debida a la sección de sombra de la cabeza. El oyente localiza la fuente porque está en la dirección en que uno de sus oídos recibe la mayor intensidad. Para dar más verosimilitud a esta hipótesis se aducía que el interesado, no hallándose bien seguro de la procedencia del sonido, volvía la cabeza hasta que éste y sus oídos quedaban en la misma línea. Con ello la diferencia de intensidad llegaba al máximo y se podía averiguar exactamente la dirección.

Sin embargo, un objeto sólo puede afectar la distribución de la energía en un campo acústico si su tamaño es comparable o superior a la longitud de onda del sonido. Considerando a la cabeza como un objeto, se infiere que, con bajas frecuencias, o sea con longitudes de onda grandes, la cabeza no podrá hacer bastante efecto de sombra para causar diferencia de intensidad apreciable entre las señales recibidas por ambos oídos. Con frecuencias altas sí podrá proporcionar tal diferencia suficiente. La línea divisoria aproximada se halla en los 1.000 Hz. Lord Rayleigh fue el primero en llamar la atención sobre el hecho de que la teoría de la intensidad era de uso restringido para explicar la facultad direccional de nuestra percepción auditiva. Valía para altas frecuencias, pero no para bajas.

El famoso físico examinó la posibilidad de que la *diferencia de fase* fuera el factor que proporcionase al cerebro la distinción direccional. Sus experimentos le llevaron a descubrir que a bajas frecuencias existe suficientemente diferencia de fase para que las señales difieran considerablemente. Las conclusiones a que llegó fueron que tanto las diferencias de intensidad como de fase intervienen en el fenómeno que nos ocupa, y el ser humano utiliza lo uno o lo otro según que la frecuencia sea baja o alta.

Investigaciones posteriores, durante el decenio de 1930 a 1940, demostraron que el efecto de la diferencia de fase podía considerarse del mismo modo que el producido por la *diferencia de tiempo de llegada*, siendo esta última más adecuada para advertirla directamente el oyente. Prosiguiendo los estudios, se vio que esta diferencia de tiempo era también eficaz con frecuencias altas, y que la teoría primitiva, la de la diferencia de intensidad, era dudosa, puesto que las diferencias que en realidad experimenta el individuo parecen insuficientes para conocer de modo preciso la procedencia del sonido.

Los últimos trabajos realizados en Inglaterra tienden a confirmar la teoría de la diferencia de tiempo de llegada. También se inclinan por asegurar que la aptitud para localizar con certeza una fuente sonora depende de la índole de ésta. Si la fuente emite tonos puros, la localización es insegura; en cambio es mucho más precisa si se trata de ondas complejas. Y llega a ser exactísima tratándose de ruidos, chasquidos, etc., es decir, sonidos de amplia gama de frecuencias.

No obstante lo dicho, hay que recordar que nuestros conocimientos sobre el sistema oído-cerebro adolecen todavía de muchas lagunas. Respecto a la facultad direccional del oído, quizá existan otros factores desconocidos además de la diferencia de tiempo de llegada, y harán falta muchas y profundas investigaciones futuras antes de que se dilucide a satisfacción el enigma de que podemos localizar la posición de una fuente sonora con tanta precisión.