

CAPÍTULO III

FONACIÓN, AUDICIÓN Y PERCEPCIÓN DEL SONIDO

Contenidos

- 3.1 Introducción. Anatomía y fisiología descriptiva del oído. El oído externo, medio e interno. La cóclea, el órgano de Córti, el nervio auditivo y la corteza cerebral. Sonidos audibles, infrasonidos y ultrasonidos.
- 3.2 La voz y el sistema de fonación humano. Características del mensaje oral. Directividad y espectro de la voz humana. Inteligibilidad de la palabra.
- 3.3 Percepción sonora. Sonoridad. Diferencias mínimas perceptibles. Curvas isofónicas de Fletcher y Munson. Umbral de audibilidad y del dolor. El fon. Nivel de sonoridad. El son. Altura tonal. Relación entre la altura y frecuencia. El mel. Timbre. Bandas críticas. Escalas de Barks y ERB.
- 3.4 Aspectos perceptuales de la audición binaural. Diferencias perceptuales entre reverberación y eco. Sensaciones de direccionalidad y espacialidad.
- 3.5 Otros fenómenos perceptuales complejos: efecto Doppler; efecto de precedencia y efecto de enmascaramiento.
- 3.6 Patologías básicas del sistema auditivo. Efectos del ruido sobre el hombre. Efectos clínicos auditivos y no auditivos. Efectos no clínicos.
- 3.7 Resumen. Bibliografía

3.1 Introducción

En primer lugar, vamos a aclarar que no debe confundirse entre el *estímulo físico del sonido* y la *experiencia perceptual del mismo*. Como se vio anteriormente, el *estímulo físico* hace referencia a cambios rápidos de presión en el aire u otro medio. La *percepción*, en cambio, se refiere al proceso de interpretación de la estimulación sensorial generada en el oído y su relación con imágenes y experiencias sensoriales pasadas. Por ejemplo, cuando al escuchar el sonido de un ladrido decimos “es mi perro que ladra”. Por otro lado, vamos a diferenciar dos términos *oír* y *escuchar*. El primero hace referencia a la capacidad de percibir un sonido mientras que el segundo implica también que pongamos atención en esa sensación, por eso, preguntamos a menudo ¿me estás escuchando?. Finalmente, podemos afirmar que la capacidad para detectar pequeñas variaciones en la estimulación sonora es importante para la comunicación y el lenguaje.

Anatomía y fisiología descriptiva del oído

La *anatomía* es el área de la medicina que estudia la estructura de los diversos órganos del cuerpo. La *fisiología*, en cambio trata del funcionamiento de estos órganos. Por consiguiente, la fisiología del oído se dedica a estudiar la transmisión de las ondas sonoras a través del oído y su conversión en impresiones sonoras. El oído está dividido anatómicamente en tres partes: el oído externo, el oído medio y el oído interno. También se distingue una *parte conductora* y una *parte perceptora*. La primera, transmite la estimulación a la porción central del sistema auditivo y comprende el oído externo, el oído medio y una porción del interno. La segunda, abarca el resto del oído interno, el nervio auditivo y los centros cerebrales en los que se opera la percepción e identificación final de los sonidos.

El oído externo

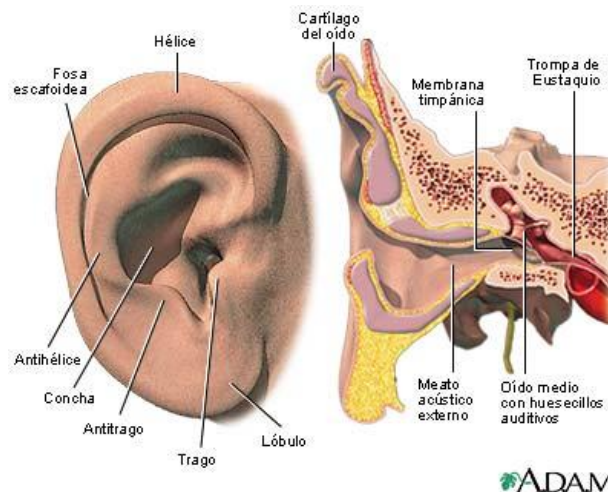


Fig. 3.1 Anatomía del oído externo (Russell).

Su parte más conocida es la oreja, también llamada *aurícula* o *pabellón*. En los humanos la aurícula sirve para canalizar el sonido hacia el conducto auditivo, permitiendo junto con otros componentes distinguir la dirección en que nos llega el mismo. En la mayoría de los animales esta función está más desarrollada, ya que éstos poseen músculos que le permiten mover las orejas en dirección normal hacia la fuente. En el hombre estos músculos también existen, pero prácticamente se encuentran anquilosados. En el caso de las personas con defecto auditivo que llevan un audífono, la oreja tiene la función adicional de retener el auricular (e incluso en muchos casos de soportar el audífono entero).

La aurícula consiste en un cartílago recubierto de piel. Esto hace que sea flexible. El borde extremo de la aurícula se llama *hélice*. La parte inferior se llama *lóbulo* de la oreja. Junto al borde plegado de la aurícula se encuentra un espacio poco profundo llamado *concha*, que lleva directamente al conducto auditivo externo. Delante del orificio del conducto auditivo se encuentra una eminencia cartilaginosa llamada *trago*, que se utiliza para cerrar manualmente el conducto auditivo externo en ocasiones de extremado nivel sonoro (Philips, 1991).

El conducto auditivo tiene una función protectora con respecto al oído medio. La características del sonido apenas son influidas por la forma del conducto auditivo, el cual está ligeramente curvado en forma de “S”, tanto vertical como horizontalmente, con una longitud de 2,5 cm. Está provisto de pelos y varias glándulas lubricantes, las que segregan una cera marrón llamada *cerumen*. Este cerumen, junto con los pelos, sirve para proteger al oído medio, por ejemplo, contra la intrusión de cuerpos extraños (partículas, insectos, entre otros).

El oído medio

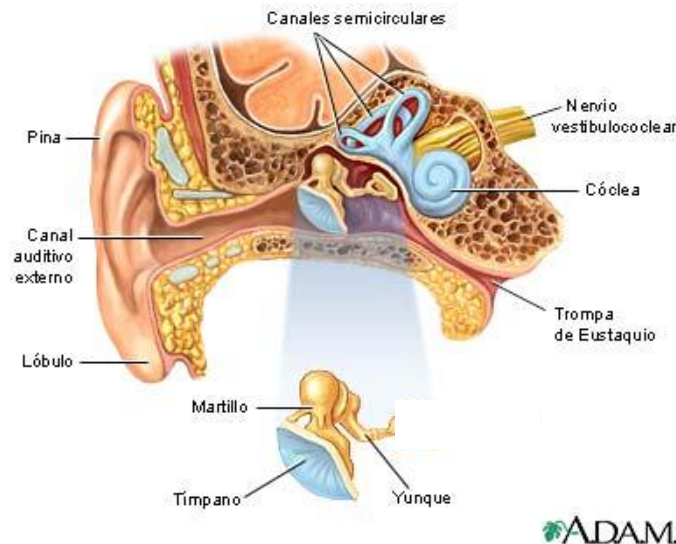


Fig. 3.2 Anatomía del oído externo, medio e interno (Russell).

El oído medio es anatómicamente más complicado. Está formado en primer lugar por la *membrana timpánica*, situada al final del *conducto auditivo* sometida a cierta tensión. La membrana timpánica del conducto auditivo cierra la cavidad del oído medio. Esta membrana consta de tres capas delgadas de color gris perla cuando está sana y está curvada hacia el oído interno, en forma cónica. A temprana edad suele ser bastante transparente, permitiendo ver la posición de los huesos auditivos que están detrás. La *cavidad timpánica* es un espacio lleno de aire conectado con la *faringe* (parte posterior de la garganta) por la *trompa de Eustaquio*. Esta cavidad también está conectada por un gran espacio (*antro*) con un gran número de células cubiertas por una membrana mucosa, situada en el hueso duro detrás del oído. Este hueso se llama *mastoide* (Philips, 1991). Los tres huesecillos del oído que se encuentran en la cavidad timpánica se conocen con el nombre de *martillo*, *yunque* y *estribo*, y están conectados poco flexiblemente entre sí. Juntos, forman la *cadena osicular*. El mango del martillo forma un conjunto orgánico con el tímpano, en tanto que su cabeza se apoya en una depresión del yunque. El yunque, a su vez, está acoplado al estribo. El pie del estribo encaja en la *ventana oval*, que la que cierra así el oído interno, lleno de líquido. Su objeto es convertir vibraciones de gran amplitud y poca presión, como las hay en el tímpano, en vibraciones de pequeña amplitud y mayor presión, requeridas en el líquido que llena el oído interno. Esta función es asimilable, por consiguiente, a una palanca mecánica. A causa del efecto palanca las vibraciones del estribo son de menor amplitud pero mayor fuerza. 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:

$$(P_{\text{ventana oval}} / P_{\text{tímpano}}) = (1,3 \cdot 0,6) / 0,04 = 19,5 \text{ (aproximadamente 20 veces)}$$

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 líquido. El conjunto actúa, por consiguiente, como un ingenioso adaptador de impedancias acústicas. El oído medio posee dos músculos muy pequeños conocidos como *tensor timpánico* y *estapedio*. El tensor timpánico va unido al mango del martillo, el estapedio va unido a la cabeza del estribo. Los otros dos extremos de los músculos van fijados a la pared de la cavidad timpánica. Sus funciones son: a) comunicar a la cadena osicular cierta tensión; b) proteger, amortiguando las vibraciones muy violentas resultantes de ruidos muy intensos.

La *trompa de Eustaquio* puede abrirse al toser o tragar saliva, pero normalmente está cerrada. La ocasional abertura de la trompa de Eustaquio es necesaria por la siguiente razón: una parte del aire presente en la cavidad timpánica es absorbida lentamente hacia la sangre por la piel que cubre dicha cavidad. Cuando esta cantidad de aire no se completa con regularidad existirá una presión en la cavidad timpánica inferior a la del otro lado del tímpano. El resultado es que la membrana se curvará hacia adentro. Esto hace que decrezca la sensibilidad del mismo y cause la impresión de "muerte" del oído. Al abrirse la trompa de Eustaquio la presión del aire volverá a ser normal y cesará el estado de mala audibilidad. Un efecto inverso les ocurre a los pasajeros sentados en un avión cuando éste despegue y cambia rápidamente su altitud. Ahora la presión del

aire va siendo cada vez menor, debido a que la atmósfera va siendo menos densa. La presión del aire dentro de la cavidad timpánica, sin embargo, sigue siendo la misma y, por tanto, el tímpano es empujado hacia afuera. Se produce la misma disminución en la audición como en el caso anterior que puede ser corregido deglutiendo enérgicamente. Entonces la trompa de Eustaquio se abre y el aire puede salir de la cavidad timpánica. Es por este motivo, que se suele distribuir goma de mascar a los pasajeros durante el periodo inicial del vuelo.

El oído interno

Es la parte más importante de todo el oído. Se encuentra detrás del oído medio y es una cavidad en el *hueso pétreo*, llena de líquido. El hueso pétreo tiene una función protectora. La relevancia del oído interno se debe a que en él se produce la transducción de vibraciones sonoras a impulsos nerviosos. Anatómicamente consta de tres partes, el *vestíbulo*, los *conductos semicirculares* y la *cóclea* o *caracol*. En la parte exterior del vestíbulo existen dos orificios llamados *ventana oval* (de unos 3 mm), en la cual encaja la *peana* (base) del estribo y la *ventana redonda* (2 mm) de la *cóclea*. El vestíbulo está conectado con los conductos semicirculares y con la *cóclea* la cual tiene un rol destacado en la percepción del sonido. Los conductos 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 (Miyara, 2000).

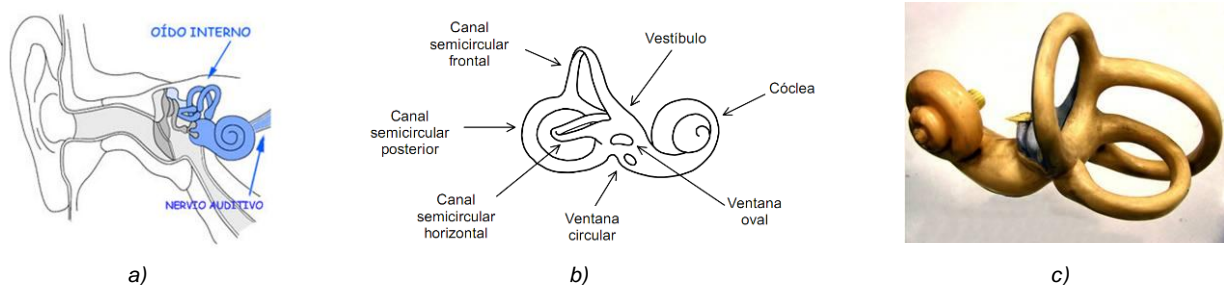


Fig. 3.3 Oído interno: a) posición en el oído; b) representación esquemática; c) modelo anatómico.

La cóclea, el órgano de Corti, el nervio auditivo y la corteza cerebral

La *cóclea* es un conducto en forma de espiral que se estrecha hacia arriba y tiene la forma de la concha de un caracol, en el oído humano tiene una distancia de dos vueltas y media. Entre las ventanas oval y redonda existe un tabique (*septo*) que comienza en el vestíbulo y divide la cóclea en dos partes, estos dos conductos se juntan entre sí en la parte superior a través de un pequeño orificio llamado *helicotrema*, ubicado hacia el vértice (ápex) del caracol. El conducto superior, cerrado por la ventana oval, se llama *escala vestibular*. El conducto inferior que se inicia en la ventana redonda se conoce como *escala timpánica*. Ambos conductos están llenos de un líquido llamado *perilinf*a, rico en sodio (Na).

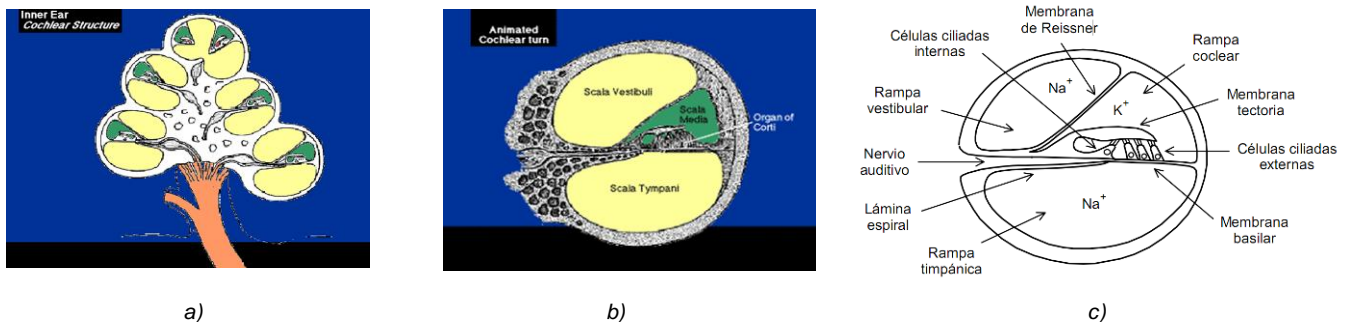


Fig. 3.4 Cóclea, representaciones de cortes transversales: a) completo; b) cavidad simple; c) partes constitutivas escala 25:1.

El propio septo contiene la *escala media*, un conducto llamado coclear lleno de otro líquido (*endolinfa*), rico en potasio (K). La escala media que se encuentra dentro de la cóclea está separada de la escala vestibular por

una membrana muy delgada llamada *membrana de Reinssner*. En la parte inferior el conducto está separado por la *membrana basilar*. En este canal, que cubre la longitud total de la membrana basilar, se encuentra el órgano de Corti. El *órgano de Corti* contiene células capilares llamadas *ciliadas* o *pilas* que en un extremo están ligadas a los millares de finos extremos nerviosos del nervio auditivo y en el otro extremo están provistas de diminutos pelos. Todos estos pelos están recubiertos por la *membrana tectorial*. Cuando esta membrana se mueve con respecto a la membrana basilar como resultado de las ondas sonoras que llegan al oído interno, las células ciliadas se deforman y transmiten los impulsos a las fibras nerviosas. Estas a su vez lo transfieren al cerebro (Philips, 1991). Las células ciliadas se comportan entonces como diminutos micrófonos, generando pulsos eléctricos (denominados potenciales de acción) de unos 90 mV como respuesta a la vibración (Miyara, 2000). Estos pulsos son enviados al cerebro a través de una serie de células nerviosas (neuronas) reunidas en el nervio auditivo. El potencial de acción de una célula individual no es fácil de medir, pero es posible medir la suma de ellos aplicando nos electrodos transtimpánicos entre las ventanas oval y redonda. Estas tensiones se denominan *microfónicos cocleares*, y fueron observadas por primera vez por Wever y Bray, en 1930 en gatos.

La membrana basilar mide alrededor de 35 mm de longitud y tiene unos 0,04 mm de ancho en su zona basal (la más próxima a la base del caracol) y unos 0,5 mm en la zona apical (próxima al vértice o ápex). Además, la zona más angosta es también más rígida, lo cual será importante para la capacidad discriminatoria de frecuencias del oído interno. En la figura 3.5 se muestran dos vistas de la membrana con la cóclea hipotéticamente estirada desde su forma helicoidal hasta una forma rectilínea.

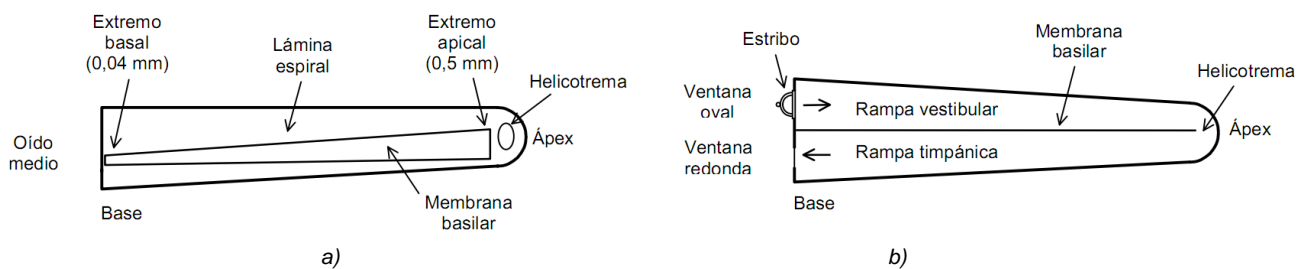


Fig 3.5. Dos vistas de la cóclea hipotéticamente rectificada: a) vista superior; b) vista lateral (Miyara, 2000).

Existen dos tipos de conducción del sonido, la *aérea* y la *ósea*. La *aérea* es la que utiliza las tres partes del oído y la *ósea* es la que sólo utiliza el oído interno estimulando directamente la cóclea a través de las vibraciones transmitidas por el cráneo. 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 3.6) cuyo máximo se produce en cierta posición que depende de la frecuencia del sonido, como se muestra en la figura 3.7a. 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 3.7b. 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

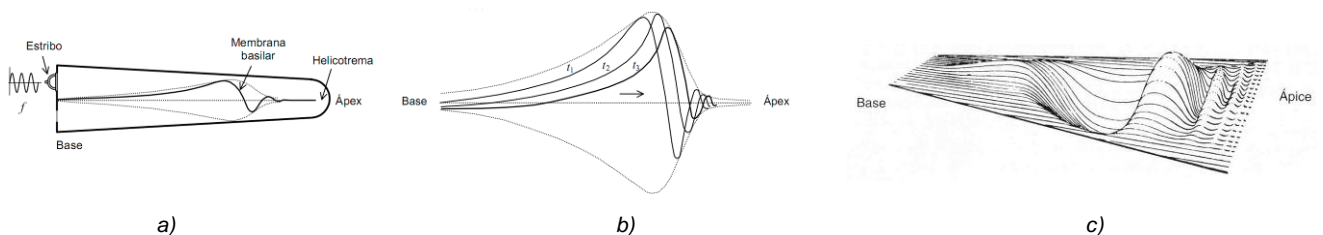


Fig 3.6. a) onda viajera en la membrana basilar en un instante dado; b) posición de la onda en tres instantes de tiempo t_1 , t_2 y t_3 . Las líneas de trazos indican el lugar geométrico de los picos de la onda conforme ésta va avanzando a lo largo de la membrana; c) vista en perspectiva.

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 3.8. 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.

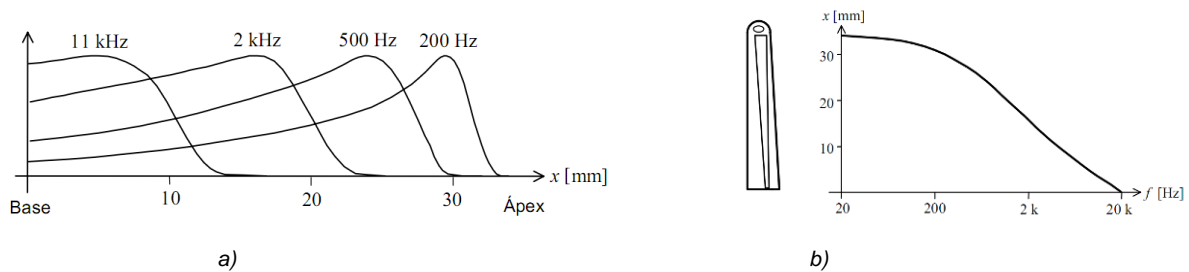


Fig 3.7. a) envolvente espacial de las ondas viajeras sobre la membrana basilar para cuatro frecuencias diferentes; b) ubicación de la resonancia a lo largo de la membrana basilar en función de la frecuencia

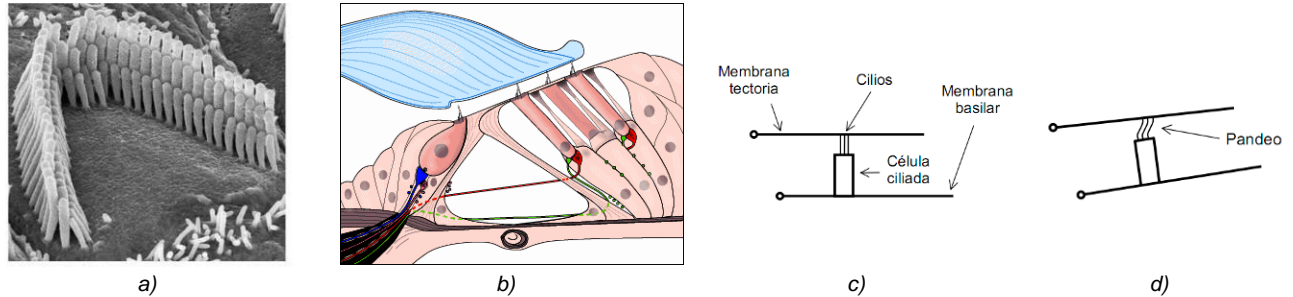


Fig 3.8. a) imagen de microscopio de barrido de células ciliadas sanas; b) esquema de la membrana basilar (abajo) tectoria (arriba) y células ciliadas internas (izq) y externas (derecha); c) representación de una célula ciliada entre las membranas basilar y tectoria en estado de reposo; d) cuando se 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 3.10 se ilustra la estructura de una neurona típica, en la que se indican también los contactos con otras neuronas previas y ulteriores. 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*. 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. Para las neuronas no mielinizadas es de alrededor de 1 m/s, en tanto que para las neuronas recubiertas con mielina 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 (Miyara, 2000).

Cuando aparece un sonido, los movimientos hacia arriba y 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 3.7a 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 3.4c) como elementos contráctiles. Estas células realimentan el sistema agudizando la resonancia.

El *nervio auditivo* recorre una distancia de 5 mm desde la cóclea hasta el punto en el que entra al tallo cerebral entre la *médula* y la *protuberancia*. Los axones de estas *neuronas ganglionares* se contactan con cuerpos celulares de los *núcleos cocleares*. Estos a su vez vuelven hacer sinapsis en el núcleo de la oliva inferior. Desde este punto, la vía auditiva tiene representación bilateral -ambos hemisferios reciben la misma información acústica. En la *oliva* se inicia un tracto que termina en el *colículo inferior* y otro que finaliza en el *sistema reticular* y en el *cerebelo*. Desde el colículo inferior las fibras se dirigen al *núcleo geniculado* medial donde se encuentra la cuarta neurona de la vía, cuyo axón proyecta a la corteza auditiva del *lóbulo temporal*. Aunque en los *núcleos subcorticales* se inicia el procesamiento de la información acústica, es en la *corteza cerebral* donde se produce la percepción consciente de la estimulación sonora.

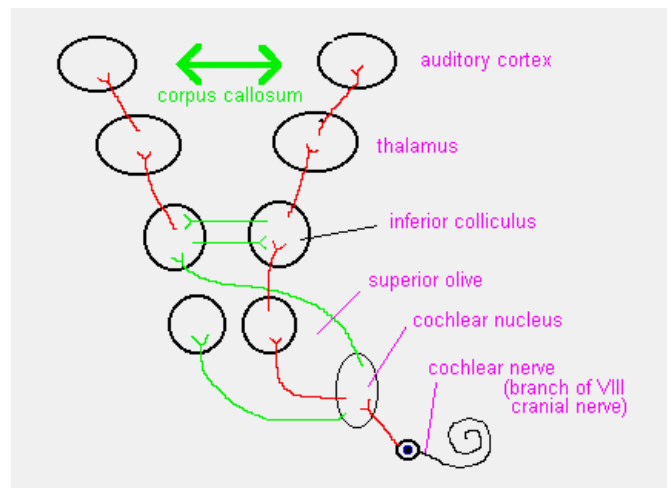


Fig. 3.9 El oído interno, el nervio auditivo y la corteza cerebral.

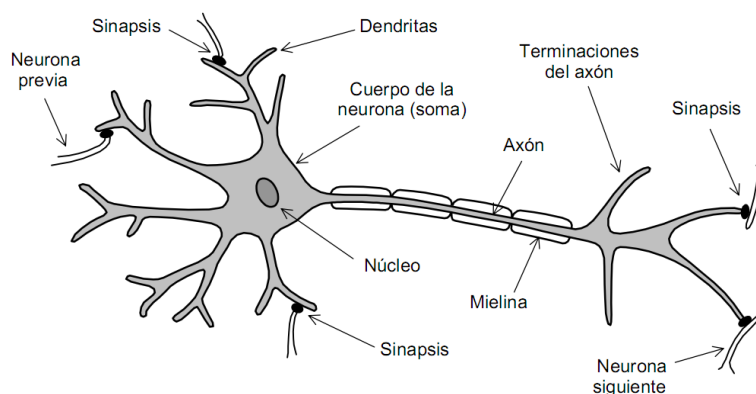


Fig. 3.10 Una neurona típica, en la que se aprecian las dendritas que reciben potenciales de acción de las neuronas previas (o de las células sensorias, como las células ciliadas) a través de las sinapsis, el cuerpo o soma con su núcleo, el axón recubierto con mielina, y sus terminaciones que conectan con las dendritas de nuevas neuronas

Sonidos audibles, infrasonidos y ultrasonidos.

Según el espectro de frecuencias que el ser humano puede detectar los sonidos se clasifican como:

- Sonidos audibles (para el ser humano se ha estandarizado el espectro de frecuencias comprendido entre 20 y 20 000 Hz).

- Infrasonidos (por debajo de 20 Hz).
- Ultrasonidos (por encima de 20 000 Hz).

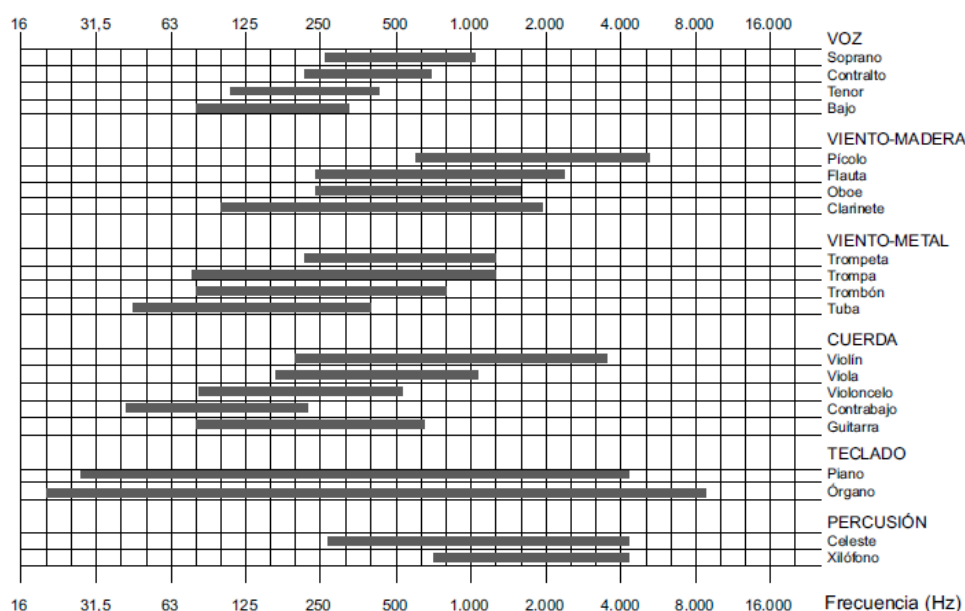


Fig. 3.11 Espectros de frecuencia de diversos instrumentos musicales (Carrión, 2001)

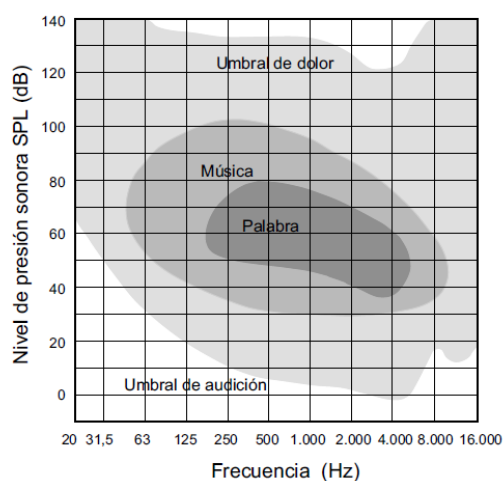


Fig. 3.12 Niveles audibles en función de la frecuencia y correspondientes zonas de la palabra y la música (Carrión, 2001)

3.2 La voz y el sistema de fonación humano

Los órganos que forman parte del sistema de fonación humana y que constituyen el denominado tracto vocal son: los pulmones, la laringe, la faringe, la cavidad nasal y la cavidad bucal

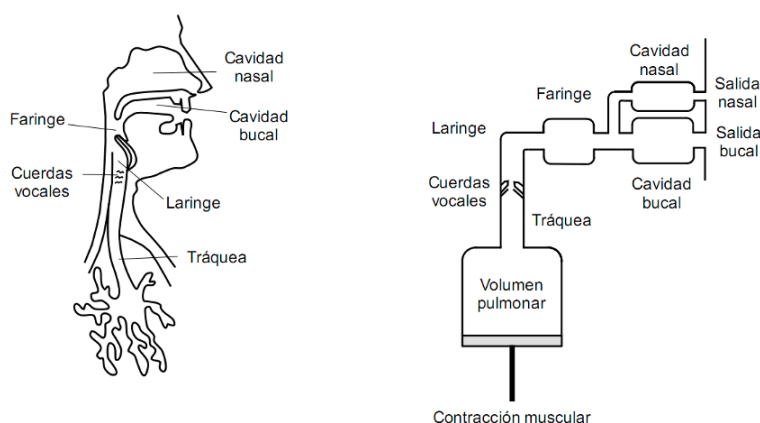


Fig. 3.13 Representación esquemática del sistema de fonación humano (Carrión, 2001)

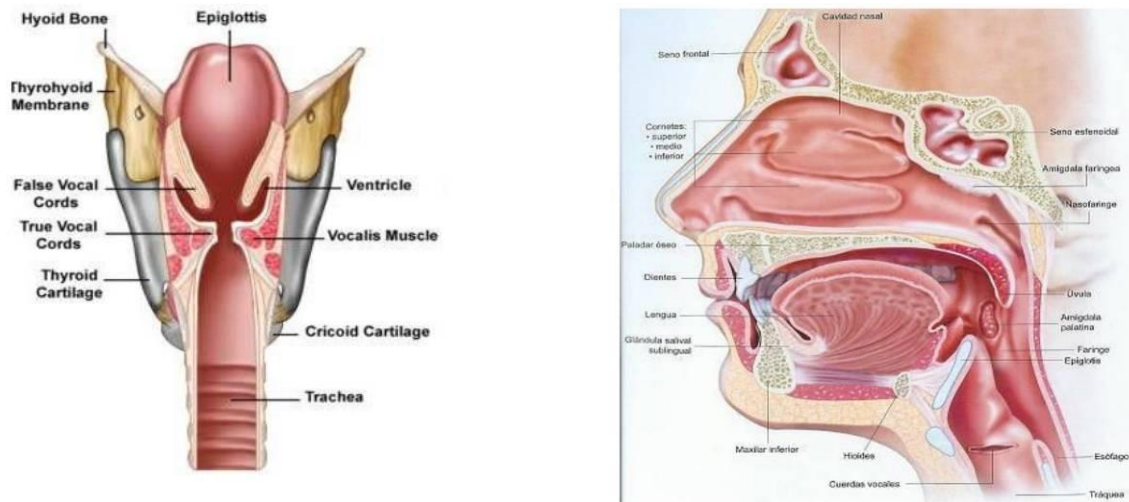


Fig. 3.14 Composición anatómica del sistema de fonación humano.

El flujo de aire impulsado por los pulmones pasa por la laringe. En ella se encuentran situadas las cuerdas vocales. Dicho aire provoca un movimiento rápido de apertura y cierre de las mismas (vibración), produciéndose una modulación del mencionado flujo.

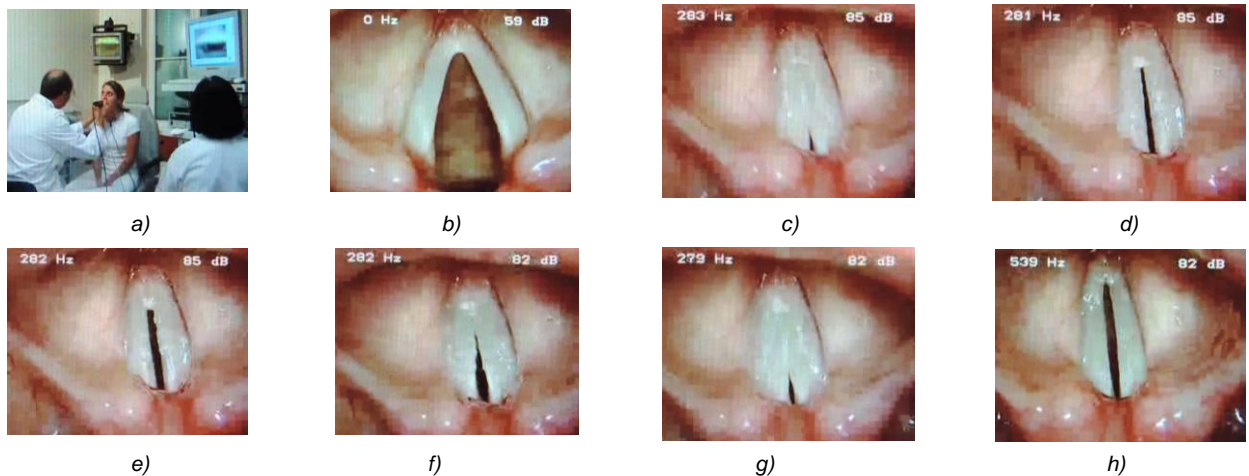


Fig. 3.15 a) equipamiento clínico; b) condición de relajación (sin emisión sonora); c), d) e) f) y g) fases sucesivas del ciclo de vibración de las cuerdas vocales para 280 Hz y 85 dB; h) vibración para 539 Hz y 82 dB

La duración de un ciclo completo de apertura y cierre es de aproximadamente 8 ms. Es el denominado pulso glotal. En dicho intervalo la velocidad volumétrica del aire pasa de un valor máximo (máxima elongación de las cuerdas vocales) a un valor nulo (cuerdas vocales en su posición de equilibrio). El número de ciclos completos por segundo es, en consecuencia, de 125. De esta forma, el espectro frecuencial de la señal generada presenta una máxima contribución a la frecuencia de 125 Hz (frecuencia fundamental) y un conjunto de armónicos situados a frecuencias múltiplos de la anterior.

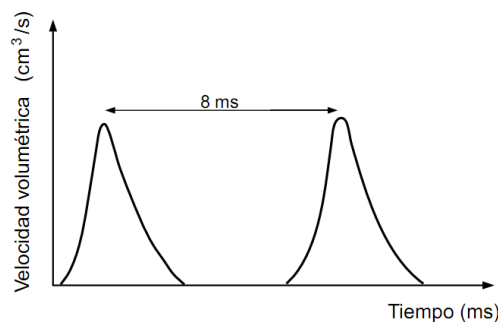


Fig. 3.16 Flujo de aire en un pulso glotal (Carrión, 2001)

Dicho espectro resulta alterado como consecuencia de la existencia de las tres cavidades que atraviesa el flujo de aire: faringe, cavidad nasal y cavidad bucal, que actúan a modo de cavidades resonantes. El resultado final no es otro que la voz característica de cada persona. Los sonidos generados de la forma anteriormente

expuesta se denominan sonidos sonoros. A este grupo de sonidos pertenecen todas las vocales, así como aquellas consonantes generadas a partir de la vibración de las cuerdas vocales (*b, d, g*, etc.). Existen, además, otro tipo de sonidos denominados sonidos sordos. Dichos sonidos se generan sin vibración alguna de las cuerdas vocales, simplemente mediante una constricción del flujo de aire que atraviesa la cavidad bucal. A este grupo pertenecen la mayoría de consonantes (*s, f, p, t, k*, etc.).

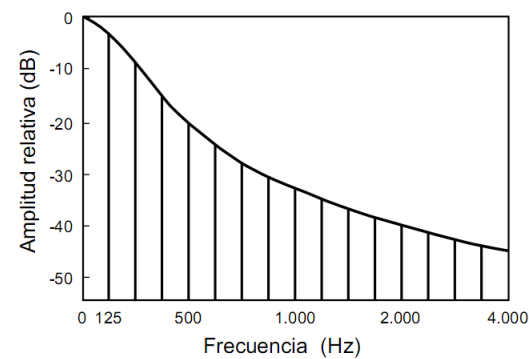


Fig. 3.16 Espectro de frecuencias de la señal generada por la vibración de las cuerdas vocales (Carrión, 2001)

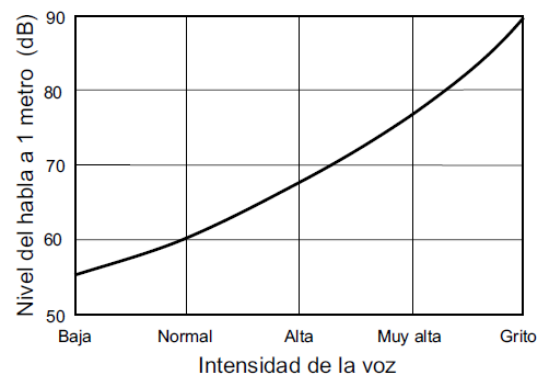


Fig. 3.17 Niveles medios de presión sonora a 1 m de distancia de una persona hablando a diferentes niveles de intensidad (Carrion, 2001)

Características del mensaje oral

Cuando una persona emite un mensaje, emplea un tiempo mayor en la emisión de las vocales que en la de las consonantes. Es por ello que las vocales constituyen el llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio. La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante. El hecho de que la duración de las vocales sea más elevada hace que el nivel de presión sonora asociado a las mismas sea, en promedio, del orden de 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes. Por otra parte, su contenido frecuencial es más rico en bajas frecuencias, mientras que las consonantes presentan una mayor contribución de altas frecuencias.

	DURACIÓN (PROMEDIO)	CONTENIDO FRECUENCIAL DOMINANTE	NIVEL (PROMEDIO)	CONTRIBUCIÓN A LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA
VOCALES	≈ 90 ms	bajas frecuencias	nivel vocales ≈ nivel consonantes + 12 dB	baja
CONSONANTES	≈ 20 ms	altas frecuencias		alta

Fig. 3.18 Características más relevantes del mensaje oral (Carrión, 2001)

Directividad y espectro de la voz humana

En general, cualquier fuente sonora radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad. Dicha directividad depende de la frecuencia y aumenta con la misma. La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad, Q. El factor Q depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese directiva. Cuanto mayor sea el nivel de presión sonora en una dirección determinada, mayor será el valor de Q

en dicha dirección. La voz humana presenta unas características de directividad que vienen determinadas por el sistema de fonación y la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad. Si bien la directividad aumenta con la frecuencia (figura 3.19), a efectos prácticos, se considera que el factor de directividad de la voz humana en la dirección frontal es $Q=2$.

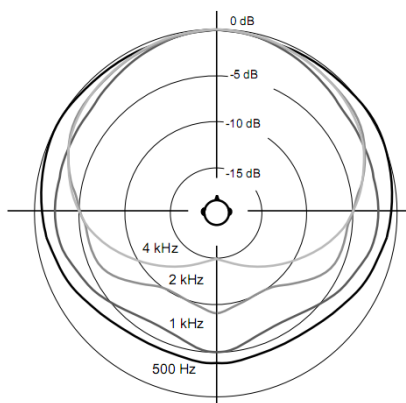


Fig. 3.19 Directividad de la voz humana en bandas de octava entre 500 y 4000 Hz según Moreno y Pfitzschner (Carrión, 2001)

Inteligibilidad de la palabra

Por otro lado, el grado de inteligibilidad de la palabra está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral. En cambio, la información contenida en las vocales es redundante. En la Figura 3.18 se resumen las características mencionadas. En la figura 3.20 se muestra la contribución de cada banda de frecuencias de octava al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra. Según se puede observar, la máxima contribución al nivel de la voz se sitúa en la zona de frecuencias medias, destacando la banda de 500 Hz con un 46%. En cambio, la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra está situada a frecuencias más elevadas (57% sumando la contribución de las bandas de 2 y 4 kHz). Directividad de la voz humana. En general, cualquier fuente sonora radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad. Dicha directividad depende de la frecuencia y aumenta con la misma. La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad Q . El factor Q depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese directiva. Cuanto mayor sea el nivel de presión sonora en una dirección determinada, mayor será el valor de Q en dicha dirección.

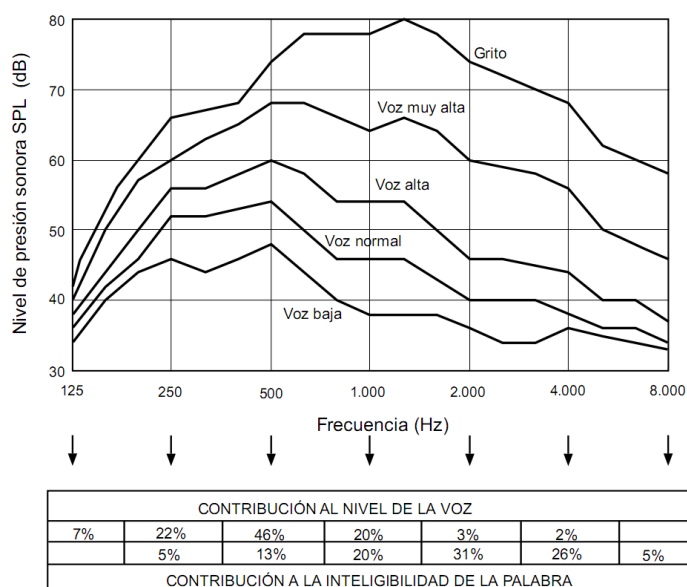


Fig. 3.20 Contribución espectral al nivel de voz y a la inteligibilidad de la palabra (Carrión, 2001)

A título de ejemplo de todo lo expuesto anteriormente, en la figura 3.21 se muestra la evolución de una frase filtrada en las bandas de 500 Hz y 4 kHz, suponiendo que la escucha se realiza delante y detrás del locutor.

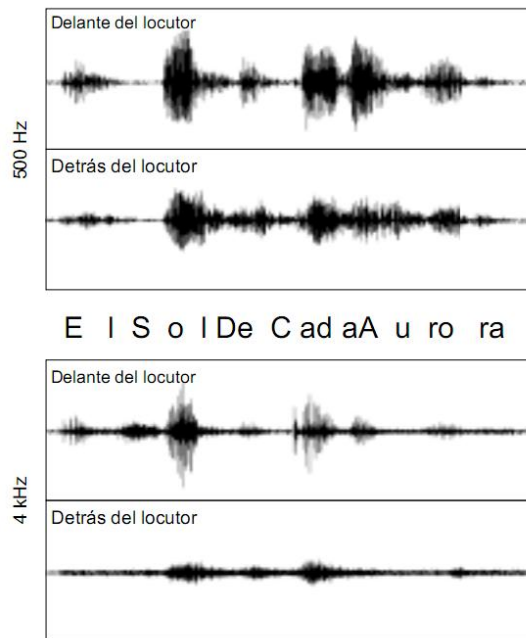


Fig. 3.21 Evolución del nivel de señal correspondiente a una frase filtrada en bandas de frecuencia centradas en 500 Hz y 4 kHz (Carrión, 2001)

De su observación se desprende lo siguiente:

- El nivel de presión sonora es más alto en la banda de 500 Hz que en la de 4 kHz.
- El nivel sonoro asociado a las vocales es más elevado que el correspondiente a las consonantes.
- La directividad de la voz humana provoca una percepción menor detrás del locutor, a la vez que la diferencia delante-detrás es efectivamente más notable en la banda de 4 kHz, por ser la voz más directiva a medida que la frecuencia considerada es mayor

3.3 Percepción sonora

El hombre atribuye los siguientes cuatro *aspectos* o *factores subjetivos* del sonido: *sonoridad*, *tono*, *timbre* y *duración*. Estos cuatro factores subjetivos básicos, forman parte de los fundamentos de la psicoacústica y la acústica musical.

Sonoridad

La percepción de la intensidad sonora se define como *sonoridad* ó *intensidad perceptual*. El sonido se juzga como más fuerte o más débil según sea la amplitud de la oscilación mayor o menor, respectivamente. La escala de sones permite cuantificar este parámetro subjetivo. Donde un *son* se define como la sonoridad de un tono de 1 kHz a 40 dB_{SPL}. Por lo tanto, un sonido tiene una intensidad perceptual de 2 sones si se juzga como el doble de intenso que un tono de 1000 Hz a 40 dB_{SPL}. Basándose en información proveniente de experimentos psicoacústicos, es posible determinar una relación matemática entre la intensidad perceptual ó sonoridad (L) y la intensidad física (I), dada por la siguiente ecuación:

$$L = k I^{0,3} \quad (3.1)$$

donde k es una constante. Esta ecuación indica que para sonidos sobre 40 dB, la intensidad perceptual se duplica cuando el nivel de sonido es incrementado en 10 dB. Para cada una de las curvas, el nivel de sonido total es constante. El ruido tiene mayor intensidad perceptual que un tono de referencia después de un cierto punto crítico.

Existe además otra escala establecida para medir la intensidad perceptual, denominada *escala de fonos*. Un *fono* (del inglés *phone*) se define como el nivel de un tono de 1000 Hz medido en dB_{SPL} que iguala la intensidad percibida de un sonido determinado. Por ejemplo, si un motor eléctrico es igual en intensidad perceptual a un tono de 1000 Hz a 65 dB_{SPL}, el motor tiene una intensidad perceptual de 65 fonos.

Relación entre presión sonora y sonoridad

La relación entre la presión sonora y la sonoridad no es simplemente lineal. Sólo en un margen muy pequeño de presiones sonoras (entre 30 a 60 dB) puede afirmarse que la sonoridad es proporcional a la presión sonora. Debido a que este margen incluye a la presión sonora media de la conversación normal (entre 50 a 60 dB), es admisible decir que cuando una persona habla dos veces más alto, la presión sonora aumenta en 6 dB. Según lo visto en el capítulo II (física acústica), duplicar el nivel de presión sonora implica un aumentarlo de 6 dB_{SPL}. Sin embargo, para que una persona experimente el doble de sonoridad se necesita un aumento de 10 dB_{SPL}. La *diferencia mínima perceptible* (Just Noticeable Difference, JND), también llamado *umbral de diferenciación* (Differential Threshold, DT, ΔL_p), para la sonoridad aproximadamente de 3 dB_{SPL}.

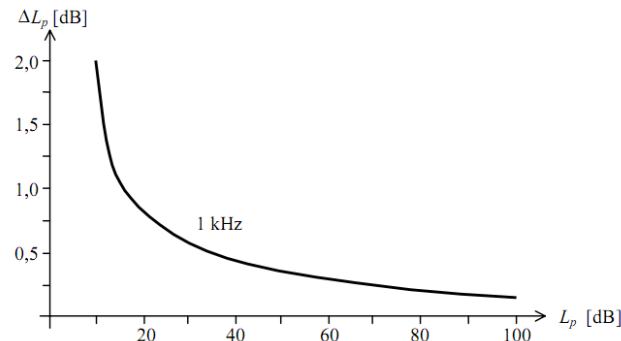


Fig. 3.22 Diferencia mínima perceptible para el nivel de presión sonora en función del nivel de presión sonora referido a 1 kHz (Miyara, 1999)

En 1933, los doctores Harvey Fletcher y Wilden A. Munson, dos científicos Norteamericanos, publicaron en el Journal of the Acoustic Society of America (JASA) el artículo científico denominado "*Loudness, its definition, measurement and calculation*". Donde presentaron los resultados de un experimento que determinaba un conjunto de contornos para diferentes niveles de presión sonora, para los cuales el oído percibía la misma sonoridad cuando era excitado con tonos puros de diferentes frecuencias. Por ejemplo: para el contorno de igual sonoridad de 70 Fon los niveles de presión sonora de diferentes componentes de frecuencias son

Tabla 3.1 Ejemplo de niveles espectrales para una intensidad perceptual de 70 fons.

Frecuencia [Hz]	Nivel de presión sonora [dB]	Contorno de igual sonoridad
50	85	70 Fon
1000	70	
10000	85	

Estas curvas recibieron el nombre de *isófonos* o *curvas isofónicas*. El contorno de 0 Fon es denominado *umbral absoluto de audición* (Absolute Threshold of Hearing, ATH), mientras que el de 120 Fon representa el *umbral del dolor* (Threshold of Pain, TP).

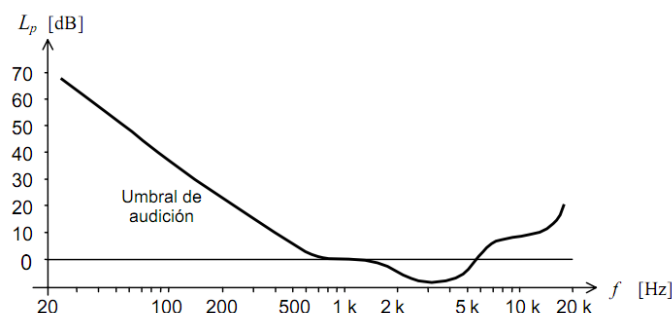


Fig. 3.23 Umbral de audibilidad (curva de 0 Fon). Estandarizada por ISO 223:2003 y IRAM 4066:2008.

Una segunda determinación fue llevada a cabo por Churcher y King en 1937, encontrando discrepancias significativas en bajas frecuencias en el diagrama de audición humano. En 1956, Robinson y Dadson re-determinaron los *contornos de igual sonoridad* (equal-loudness contours), como se los denomina actualmente, siendo dichos resultados la base del actual estándar ISO 226:2003. Cada contorno define un nuevo parámetro expresado en Fon (Phon).

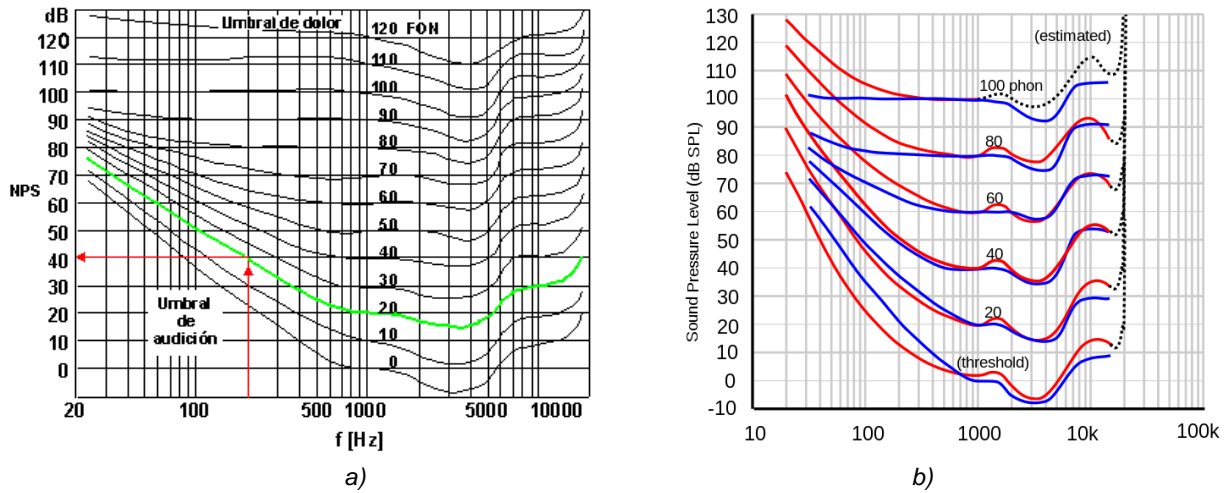


Fig. 3.24 a) Ejemplo de curvas de isosonoridad de Fletcher & Munson, para curva 20 Fons, una excitación con un tono puro de 200 Hz y $L_p = 40$ dB produce igual sonoridad que uno de 1000 Hz y $L_p = 20$ dB; b) rojo: contornos de igual sonoridad (ISO 226:2003), azul: curvas de Fletcher y Munson (1933), línea punteada: valores estimados.

Altura tonal

El correlato subjetivo de la frecuencia es la *altura tonal* del sonido, que se define como el atributo de la sensación auditiva en términos del cual los sonidos pueden ser ordenados en una escala que va de “mas grave” a “más agudo” según menor o mayor sea la frecuencia del estímulo sonoro, respectivamente. Esta escala se conoce como la *escala mel*, propuesta por Stevens, Volkman y Newmann en 1937. El nombre *mel* deriva de “melodía”, como una forma de explicitar que se trata de una escala basada en comparaciones entre alturas tonales.

La altura es uno de los parámetros perceptivos fundamentales del sonido. Aunque está íntimamente vinculada a la frecuencia, la afectan en menor medida de 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. Como se menciona anteriormente, el *mel* es la unidad de medida de la altura tonal. Esta escala se construye equiparando un tono de 1000 Hz y $L_p = 40$ dB por encima del umbral de audición del oyente, para un valor de 1000 mels. Sobre los 500 Hz, los intervalos de frecuencia espaciados exponencialmente son percibidos como si estuvieran espaciados linealmente. En consecuencia, sobre este punto, cuatro octavas en la escala lineal de frecuencias medida en Hz se comprimen a alrededor de dos octavas en la escala mel.

La relación entre mels (m) y Hz (f) es la siguiente:

$$m = 1127,01048 \ln\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad (3.2)$$

y por lo tanto:

$$f = 700\left(e^{\frac{m}{1127,01048}} - 1\right) \quad (3.3)$$

Evaluación de la altura

Como ya se menciona, la altura tonal de un tono puro se corresponde con la frecuencia de dicho estímulo. Esto significa que, por ejemplo, si se estimula a un sujeto con un tono puro de 200 Hz y se le solicita que seleccione otro sonido que suene igual, él elegirá un tono de 200 Hz o cercano a este valor. En otro experimento, se estimula auditivamente a una persona, en general que no sea músico (que no tenga el oído ejercitado) con un tono puro de 1000 Hz. Luego, se le solicita que ajuste el control un dispositivo que puede producir un tono de frecuencia variable hasta que el tono producido sea 2 veces más bajo (ó 2 veces más alto) que el tono de referencia (una octava descendente ó ascendente). En el primer caso, es de esperar que el tono elegido tenga una frecuencia de 500 Hz y en el segundo de 2000 Hz, es decir, que haya una relación 1:1 entre el tono y la frecuencia. También se debe considerar que el oído humano no es igualmente sensible a todas las

frecuencias. El mismo es más sensible a los sonidos en el rango de frecuencias medias, entre 2 kHz a 5 kHz, y es menos sensible en bajas frecuencias y en altas frecuencias. Sin embargo, se ha descubierto que esta relación lineal entre altura tonal y frecuencia sólo existe para el rango margen de frecuencias desde 125 Hz a 2000 Hz. Fuera de este margen ésta relación deja de cumplirse.

Timbre

El parámetro físico *forma de onda* del sonido se corresponde con la sensación sonora de *timbre*. El timbre es el atributo de la percepción auditiva que permite reconocer como sensaciones distintas dos sonidos idénticos en frecuencia y amplitud pero con distinta forma de onda, por ejemplo, una misma nota musical ejecutada por un violín y un piano.

Bandas críticas

Una característica fundamental del sistema auditivo humano es su capacidad resolución de frecuencia e intensidad. Al momento de estudiar éste aspecto de nuestra audición es fundamental el concepto de banda crítica. Una forma de entender el funcionamiento del sistema auditivo es suponer que contienen una serie o banco de filtros pasa banda sobrelapados conocidos como *filtros auditivos* (Fletcher, 1940; Moore, 1998). Estos filtros se producen a lo largo de la membrana basilar y tienen como función aumentar la resolución de frecuencia de la cóclea y así incrementar la habilidad de discriminar entre distintos sonidos. Este banco de filtros no sigue una configuración lineal, y el ancho de banda y morfología de cada filtro depende de su frecuencia central. El ancho de banda de cada filtro auditivo se denomina *banda crítica* (Fletcher 1940; Gelfand, 2004).

Las bandas críticas son rangos de frecuencia dentro de los cuales un tono bloquea ó enmascara la percepción de otro tono. Ocurren porque una onda que estimula la membrana basilar perturba la membrana dentro de una pequeña área más allá del punto de primer contacto, excitando a los nervios de toda el área vecina. Por lo tanto, las frecuencias cercanas a la frecuencia original tienen mucho efecto sobre la sensación de intensidad del sonido. La intensidad percibida no es afectada, en cambio, en la presencia de sonidos fuera de la banda crítica. Es importante destacar aquí que el concepto de banda crítica es una construcción teórica y no algo físicamente comprobado.

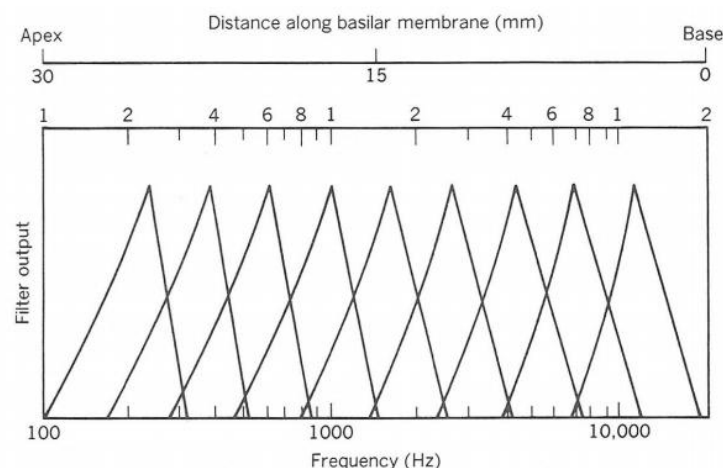


Fig 3.25 Esquema de las bandas críticas del sistema auditivo humano

Escala de Barks y ERB

Una inquietud que surge de inmediato es preguntarse cuantas bandas críticas existen en el sistema auditivo y cuál es la frecuencia central de cada una. Existe una escala de medición de las bandas críticas llamada la *escala de Barks* la cual se detalla en la Tabla 3.2. La escala tiene un rango del 1 a 24 y corresponde a las primeras veinticuatro bandas críticas del sistema auditivo. Esta escala que tiene relación con la escala *mel*, ha sido menos empleada por la comunidad científica.

La relación entre un Bark y un Hz está dada por:

$$\text{Bark} = 13 \arctan (0,00076 f) + 3,5 \arctan [(f / 7500)^2] \quad (3.4)$$

Tabla 3.2. Escala de Barks, para estimación de las bandas críticas del sistema auditivo

Banda crítica	Frecuencia central	Ancho de banda	Frecuencia mín.	Frecuencia máx.
[Bark]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	50	-	-	100
2	150	100	100	200
3	250	100	200	300
4	350	100	300	400
5	450	110	400	510
6	570	120	510	630
7	700	140	630	770
8	840	150	770	920
9	1000	160	920	1080
10	1170	190	1080	1270
11	1370	210	1270	1480
12	1600	240	1480	1720
13	1850	280	1720	2000
14	2150	320	2000	2320
15	2500	380	2320	2700
16	2900	450	2700	3150
17	3400	550	3150	3700
18	4000	700	3700	4400
19	4800	900	4400	5300
20	5800	1100	5300	6400
21	7000	1300	6400	7700
22	8500	1800	7700	9500
23	10500	2500	9500	12000
24	13500	3500	12000	15500
25	18775	6550	15500	22050

Posteriormente Moore y Glasberg (1983) proponen un nuevo concepto asociado al concepto de banda crítica, el *equivalente rectangular de ancho de banda*, (Equivalent Rectangular Bandwidth, ERB). El cual muestra la relación entre el conducto o canal auditivo y el ancho de banda de un filtro auditivo. La idea de esta medida es reemplazar una banda crítica por un rectángulo equivalente cuya área sea la misma, de manera de permitir en su interior la misma cantidad de energía. La frecuencia central del ERB en Hz, se calcula mediante la siguiente fórmula (Moore y Glasberg, 1996):

$$\text{ERB} (f) = 0,108 f + 24,7 \quad (3.5)$$

La figura 3.20 muestra la escala de Barks, la ERB y la escala *mel* en función de la frecuencia. Ambas tienen curvas parecidas, pero difieren en algunos detalles.

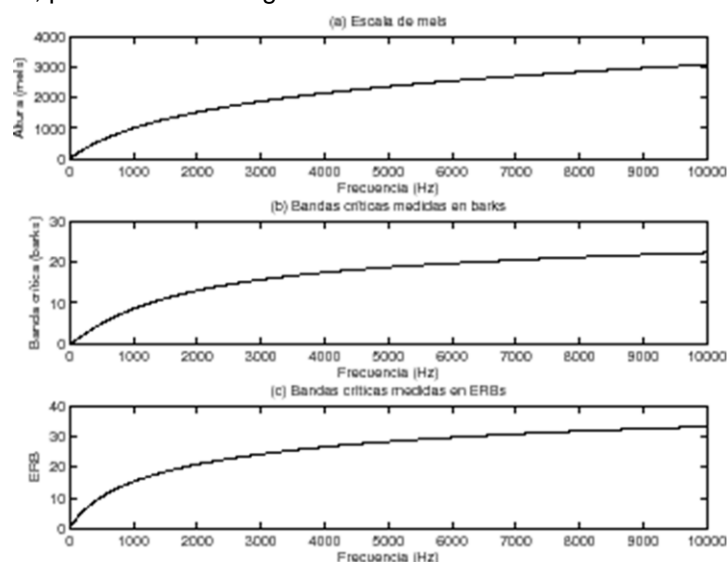


Fig 3.26 a) Escala de mels vs frecuencia; b) bandas críticas medidas en Barks vs frecuencia; c) bandas críticas medidas ERB vs frecuencia.

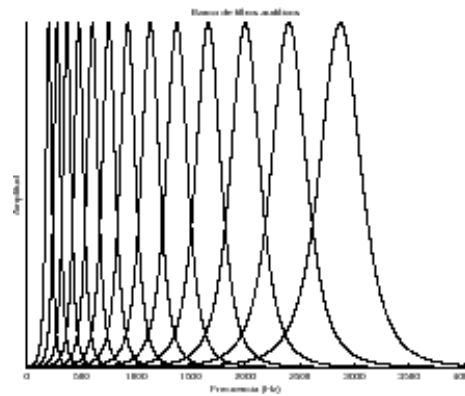


Fig 3.27 Banco de filtros auditivos, aproximación computacional basada en la escala ERB.

3.5 Aspectos perceptuales de la audición binaural

El sistema auditivo es un sofisticado procesador espacial, que le permite al organismo detectar y discriminar la ubicación de objetos sonoros en el espacio. Grantham (1995) señala que un oyente tiene una inmediata apreciación del espacio auditivo, en el sentido de que su orientación hacia el evento sonoro es natural, rápida y, en general, exacta. Aunque la precisión espacial es más pobre en el dominio auditivo que en el visual (de hasta dos órdenes de magnitud), el “mundo auditivo” tiene la ventaja de extenderse en todas las direcciones alrededor del observador, mientras que el “mundo visual” se restringe sólo a su región frontal (siendo óptima la resolución visual dentro de unos pocos grados del eje óptico de la mirada). En situaciones de alta incertidumbre espacial, esto es, cuando un observador no sabe para dónde mirar, la potencia del sistema auditivo para proveer información espacial es excelente (Arias y Ramos, 2003). Perrott et al. (1990) han sugerido que esta geometría perceptual diferencial permite que el sistema auditivo reaccione primero a los eventos ambientales y “dirija” la cabeza del observador para que apunte hacia ellos, de manera tal que entre en juego el sistema visual para realizar un análisis espacial más refinado. Las grandes temáticas de este área son: el procesamiento binaural, la localización sonora (sonidos directos) y el efecto precedente (localización de sonidos reflejados).

Diferencias perceptuales entre reverberación y eco.

El eco es el fenómeno más sencillo que tiene lugar en un ambiente con superficies reflectoras del sonido, consistente en una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente (observador) unos 100 ms (o más) después de emitido el sonido. Se produce después de un tiempo t , relacionado con la distancia d , a la superficie más próxima por la expresión:

$$t = 2 d / c \quad (3.6)$$

donde c es la velocidad del sonido, es decir 343 m/s. El factor 2 se debe a que el sonido recorre de ida y de vuelta la distancia entre la fuente sonora y la superficie. De esta fórmula se deduce que para producirse eco la superficie más próxima debe estar a una distancia igual a 17 m.

Si el oyente está ubicado en la misma posición que la fuente (ej: sujeto que produce un golpe con las palmas de sus manos –pulso de corta duración–), este percibirá al eco como un sonido producido por una *fente virtual ó imagen* que se localiza a una distancia $2 d$ respecto del él, en la dirección donde se encuentra el objeto reflejante.

Por otra parte, la *reverberación* es un proceso mucho más complicado que ocurre en espacios cerrados y semicerrados. Si en cambio, la situación descrita anteriormente, se efectuara en un recinto (de mediana ó grandes dimensiones) con todos sus cerramientos interiores (techo, paredes y piso) construidos con materiales reflejantes sonoros, el pulso que arriba al oyente estará acompañado de un conjunto de múltiples repeticiones con mínimas diferencias temporales y amplitudes decrecientes. Lo cual, producirá la sensación de extensión de duración del sonido original y correspondiente desvanecimiento hasta volverse inaudible (envolvente de decrecimiento). En este caso, el pulso es percibido siempre como un único sonido proveniente de la posición real de la fuente. Tanto el *eco* como la *reverberación*, serán desarrollados detalladamente en el capítulo IV.

Sensaciones de direccionalidad y espacialidad.

El sistema auditivo tanto en los humanos como en las especies animales, tiene la capacidad de localizar sonidos en el ambiente. Los sonidos reales se originan en fuentes que están ubicadas en algún lugar del espacio circundante, dando origen a dos tipos de sensaciones: la *direccionalidad* y la *espacialidad*.

En términos generales la *direccionalidad* se refiere a la capacidad de localizar la dirección de donde proviene el sonido. Nos permite, por ejemplo, ubicar visualmente una fuente sonora luego de escucharla.

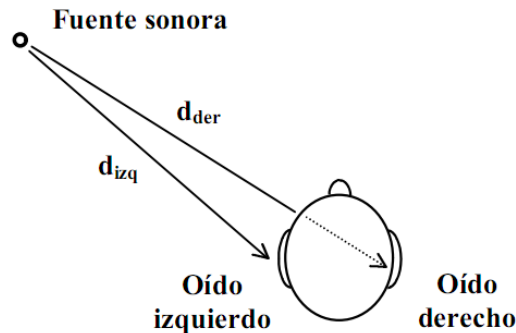


Fig 3.28 Direccionalidad del sonido. El recorrido entre la fuente sonora y el oído izquierdo es menor que el correspondiente al oído derecho, es decir $d_{izq} < d_{der}$. Por esto el sonido llega antes y con mayor intensidad al oído izquierdo que al derecho.

James Blauert (1997), define que la *localización sonora* ó *direccionalidad* se refiere a la percepción de la posición de una fuente sonora en el plano acimutal o horizontal (izquierda-derecha), en el plano medio o vertical (arriba-abajo), y a la percepción de la distancia relativa entre el oyente y la fuente. Una gran parte de los estudios de localización auditiva se han realizado en condiciones artificiales, por ejemplo en ambientes anecoicos, sin que el participante pudiera moverse libremente y con estímulos artificiales como tonos puros, clics o ráfagas de ruido (noise bursts). Si bien estas condiciones han permitido conocer la mayor parte de lo que se conoce sobre audición espacial, explican muy poco sobre cómo una persona funciona auditivamente en la vida real y cotidiana (Brown y May, 2005).

Claves involucradas en la localización

La experimentación realizada tanto en campo libre como con auriculares ha permitido identificar las principales claves que intervienen cuando una persona localiza sonidos (Grantham 1995; Blauert 1997). Las claves binaurales son: a) la *diferencia de tiempo interaural* (interaural time difference, ITD), y b) la *diferencia de nivel interaural* (interaural level difference, ILD). La ITD es la diferencia de tiempo con que un sonido llega a cada uno de los oídos. Para fuentes sonoras ubicadas fuera del plano medio (azimut diferente a 0°), el sonido alcanza primero al oído más cercano a la fuente. En adultos, la ITD varía entre 0 y $700 \mu s$ para fuentes ubicadas a 0° y 90° de azimut respectivamente (Basso, 2006). Cuando la fuente sonora se ubica fuera del plano medio, la intensidad de los sonidos que llegan a cada uno de los oídos también es ligeramente diferente. La ILD se refiere a estas variaciones de intensidad ocasionadas por la cabeza y el torso, que actúan como una barrera acústica que se interpone entre la fuente y el oído más alejado de ésta. En el plano horizontal, la posición percibida de la fuente sonora depende tanto del valor de ITD como de ILD. Por otro lado, el efecto de filtrado natural es una clave monoaural que ayuda en la localización de una fuente sonora. La cabeza y los pabellones auditivos, de forma irregular y asimétrica, funcionan como un filtro al reflejar y absorber algunas componentes del sonido. El efecto de filtrado se produce por la interacción del sonido con los pliegues del pabellón auricular, cabeza, torso y hombros, que modifica el contenido espectral del mismo. Esta clave permite localizar fuentes ubicadas en el plano medio (azimut igual a 0°) y varía en función de la posición y distancia de la fuente sonora así como del contenido en frecuencia del estímulo (Blauert 1997). En relación a la percepción de la distancia, se han identificado un conjunto de claves que estarían involucradas (Coleman 1962; Grantham 1995), aunque aún no se conoce en detalle cómo interactúan entre sí (Brown y May 2005):

Intensidad sonora: si una fuente sonora de intensidad constante se aleja del oyente, la disminución en la intensidad del sonido le servirá como clave para percibir su distancia (a menor intensidad

se percibe una mayor distancia y viceversa). Esta clave es especialmente relevante cuando se trata de sonidos familiares. Debido a que las fuentes sonoras también pueden variar de intensidad sin modificar su distancia, es necesario contar con otras claves adicionales como la reverberación y la frecuencia.

Reverberación: en espacios cerrados, la proporción de energía directa (temprana) y energía reverberante (tardía) que alcanza al oyente será menor en el caso de una fuente ubicada a distancia lejana y mayor para las fuentes cercanas.

Frecuencia: generalmente las fuentes sonoras ubicadas a distancias lejanas tienen una mayor pérdida de componentes de alta frecuencia por la absorción del aire y los materiales, por esto un sonido con más componentes de alta frecuencia se percibe a una menor distancia. En el hombre, la habilidad para localizar sonidos es muy buena en el plano horizontal, algo menos eficiente en el plano medio y la precisión con la que se percibe la distancia es regular (Moore, Perazzo, y Braun 1995).

Sobre la localización en campo libre

El término *localización* se refiere a los estudios realizados en campo libre, donde se presentan fuentes sonoras dispuestas según un determinado arreglo espacial, como, por ejemplo, parlantes apareados (es decir que sus diferencias espectrales han sido corregidas) u objetos sonoros. En este caso el oyente percibe que el sonido proviene desde algún lugar situado en el espacio externo, fuera de él, por lo que se denomina externalización de la imagen sonora. La posición subjetiva o aparente se denomina localización. El *mínimo ángulo audible* (Minimum Audible Angle, MAA) es el umbral que indica el cambio más pequeño en la posición de una fuente sonora que puede ser confiablemente discriminado (Mills 1958). El MAA depende tanto de la frecuencia como de la dirección de arribo de la onda sonora. En el plano horizontal, para estímulos de banda ancha y para tonos de baja frecuencia, el MAA es de $1 - 2^\circ$ para posiciones frontales (Mills 1958; Blauert 1997), se incrementa a $8 - 10^\circ$ en posiciones laterales extremas (Kuhn 1987), y decrece nuevamente a $6 - 7^\circ$ si la fuente se ubica detrás del oyente (Mills 1958; Perrott 1969). El umbral MAA es mayor para sonidos de medias y altas frecuencias, especialmente para fuentes ubicadas en ángulos que exceden los en el plano horizontal (Mills 1958; 1960; 1972). En el plano medio el MAA es de alrededor de $3 - 9^\circ$ para fuentes ubicadas en el hemisferio frontal (Perrott y Sabieri 1990; Blauert 1997).

Por otro lado, la *espacialidad* nos permite asociar un sonido con el ambiente en el cual se propaga, y estimar, por ejemplo, las dimensiones del recinto sin necesidad de recurrir a la vista. Dentro del estudio de la espacialidad podemos destacar algunos de los factores que la caracterizan. El primer factor que hace a la espacialidad lo constituyen las *reflexiones tempranas*. En espacios abiertos, las ondas sonoras generadas por una fuente se alejan indefinidamente atenuándose hasta volverse inaudible. En un espacio cerrado ó confinado, en cambio, la onda sonora se refleja en los cerramientos (paredes, techo y piso) múltiples veces. Las primeras reflexiones se denominan reflexiones tempranas. Las reflexiones tempranas proveen al sistema auditivo una clave temporal que se relaciona con la distancia entre los cerramientos, lo cual a su vez se vincula al tamaño del recinto. Esto crea la sensación de *ambiencia* (Miyara, 1999).

El segundo factor que hace a la espacialidad del sonido son las *reflexiones tardías* o *reverberación*. El fenómeno de la reverberación se produce como consecuencia de las numerosas reflexiones tardías del sonido. Mientras que las primeras reflexiones (las reflexiones tempranas) están distanciadas considerablemente, las subsiguientes comienzan a superponerse entre sí, debido a que aparecen las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente. El efecto más conocido de la reverberación es el hecho de que el sonido se prolonga después de interrumpida la fuente. El tiempo de permanencia o *tiempo de reverberación*, depende de las características acústicas del recinto, y nos da una clara sensación de espacialidad que puede y debe ser aprovechada en audio técnica para evocar ambientes con gran realismo.

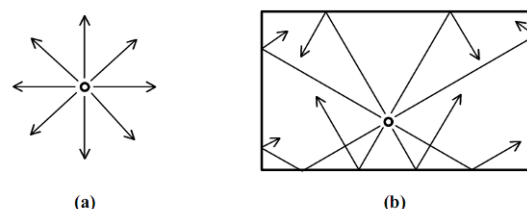


Fig 3.29 (a) Una fuente sonora en campo abierto: el sonido se aleja indefinidamente de la fuente. (b) Una fuente sonora encerrada en un ambiente cerrado: el sonido se refleja una y otra vez en las superficies del recinto (paredes, techo y piso).

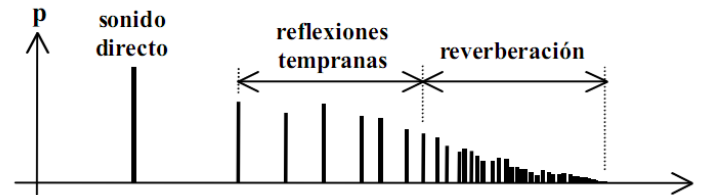


Fig 3.30 Reflexiones tempranas y reverberación en un recinto cerrado.

El último factor que interviene en la sensación de espacialidad es el *movimiento de la fuente*. Muchas fuentes sonoras son fijas, pero otras son móviles, y la movilidad es percibida a través no solo del desplazamiento evocado por la dirección de procedencia del sonido, sino también por el denominado *efecto Doppler*, por el cual la frecuencia de una fuente móvil parece cambiar.

3.6 Otros fenómenos perceptuales complejos

Efecto Doppler

El *efecto Doppler*, llamado así en honor a Christian Andreas Doppler, es el aparente cambio de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Doppler propuso este efecto en 1842 en su tratado *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels* (sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros).

En 1845, Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot investigó esta hipótesis para el caso de ondas sonoras y confirmó que el tono de un sonido emitido por una fuente que se aproxima al observador es más agudo que si la fuente se aleja. Hippolyte Fizeau descubrió independientemente el mismo fenómeno en el caso de ondas electromagnéticas en 1848. En Francia este efecto se conoce como "efecto Doppler-Fizeau" y en los Países Bajos como el "efecto Doppler-Gestirne". En el caso del espectro visible de la radiación electromagnética, si el objeto se aleja, su luz se desplaza a longitudes de onda más largas, desplazándose hacia el rojo. Si el objeto se acerca, su luz presenta una longitud de onda más corta, desplazándose hacia el azul. Esta desviación hacia el rojo o el azul es muy leve incluso para velocidades elevadas, como las velocidades relativas entre estrellas o entre galaxias, y el ojo humano no puede captarlo, solamente medirlo indirectamente utilizando instrumentos de precisión como espectrómetros. Si el objeto emisor se moviera a fracciones significativas de la velocidad de la luz, sí sería apreciable de forma directa la variación de longitud de onda.

Sin embargo hay ejemplos cotidianos de efecto Doppler en los que la velocidad a la que se mueve el objeto que emite las ondas es comparable a la velocidad de propagación de esas ondas. La velocidad de una ambulancia (50 km/h) puede parecer insignificante respecto a la velocidad del sonido al nivel del mar (unos 1.235 km/h ó 343 m/s), sin embargo se trata de aproximadamente un 4% de la velocidad del sonido, fracción suficientemente grande como para provocar que se aprecie claramente el cambio del sonido de la sirena desde un tono más agudo a uno más grave, justo en el momento en que el vehículo pasa al lado del observador.

Observador acercándose a una fuente sonora

Imaginemos que un observador O se mueve con una velocidad v_o que tiene una dirección y sentido hacia una fuente de sonido S que se encuentra en reposo. El medio es aire y también se encuentra en reposo. La fuente emite un sonido de velocidad V , frecuencia f y longitud de onda λ . Por lo tanto, la velocidad de las ondas respecto del observador no será v , sino la siguiente:

$$v' = v + v_o$$

Sin embargo, no debemos olvidar que como la velocidad del medio no cambia, la longitud de onda será la misma, por lo tanto, si:

$$v = f \cdot \lambda \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda}$$

Pero como mencionamos en la primera explicación, el observador al acercarse a la fuente oír un sonido más agudo, esto implica que su frecuencia es mayor. A esta frecuencia mayor captada por el observador se la denomina *frecuencia aparente*, f' .

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_o}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} + \frac{v_o}{\lambda} = f + \frac{v_o}{\lambda} = f \cdot \left(1 + \frac{v_o}{f \cdot \lambda}\right) = f \cdot \left(1 + \frac{v_o}{v}\right)$$

El observador escuchará un sonido de mayor frecuencia debido a que: $\left(1 + \frac{v_o}{v}\right) \geq 1$

Observador alejándose de una fuente sonora

Analicemos el caso contrario: cuando el observador se aleja de la fuente, la velocidad será $v' = v - v_o$ y la *frecuencia aparente*, f' estará dada por:

$$f' = f \cdot \left(1 - \frac{v_o}{v}\right)$$

Fuente sonora acercándose al observador

En este caso la frecuencia aparente percibida por el observador será mayor que la frecuencia real emitida por la fuente, lo que genera que el observador perciba un sonido más agudo.

Por tanto, la longitud de onda percibida para una fuente que se mueve con una velocidad v_s será:

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda$$

Como $\lambda = \frac{v}{f}$ podemos deducir que:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{\frac{v}{f} - \frac{v_s}{f}} = f \cdot \left(\frac{v}{v - v_s}\right)$$

Fuente sonora alejándose del observador

Haciendo un razonamiento análogo para el caso contrario: fuente alejándose; podemos concluir que la frecuencia percibida por un observador en reposo con una fuente en movimiento será:

$$f' = f \cdot \left(\frac{1}{1 \pm \frac{v_s}{v}}\right)$$

Cuando la fuente se acerque al observador se pondrá un signo (-) en el denominador, y cuando la fuente se aleje se reemplazará por (+).

En el caso particular de que la fuente y el observador se mueven simultáneamente se aplica la siguiente fórmula, que no es más que una combinación de las dos anteriores:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}\right)$$

Los signos \pm y \mp deben ser aplicados de la siguiente manera: si el numerador es una suma, el denominador debe ser una resta y viceversa.

Si la fuente de sonido se aleja del observador el denominador es positivo, pero si se acerca es negativo. Si el observador se aleja de la fuente el numerador es negativo, pero si se aproxima es positivo. Se puede dar el caso de numerador y denominador sean una suma, y también de numerador y denominador sean una resta.

Ejemplo conceptual

Un observador se mueve a una velocidad de 42 m/s hacia un trompetista en reposo. El trompetista está tocando (emitiendo) la nota “La” (con una frecuencia fundamental de 440 Hz). ¿Qué frecuencia percibirá el observador, para una velocidad del sonido de 340 m/s.

Solución: Si el observador se acerca hacia la fuente, implica que la velocidad con que percibirá cada frente de onda será mayor, por lo tanto la frecuencia aparente será mayor a la real (en reposo). Para que esto ocurra debemos aplicar el signo (+) en la ecuación.

$$f' = f \cdot \left(1 \pm \frac{v_o}{v}\right)$$

$$f' = 440\text{Hz} \cdot \left(1 + \frac{42\text{m/s}}{340\text{m/s}}\right) \Rightarrow f' = 494,353\text{Hz}$$

En este caso particular, el trompetista emite la nota La con una frecuencia fundamental de 440 Hz; sin embargo, el observador percibe una nota que vibra a una frecuencia de 494,353 Hz, que es la frecuencia perteneciente a la nota **Si**. En términos musicales, el observador percibe el sonido con un tono más agudo del que se emite realmente.

Enmascaramiento

Dentro de las cualidades del oído hay una que tiene consecuencias de gran importancia para la audición, y es el hecho de que los sonidos son capaces de enmascarar (ocultar, hacer imperceptibles) a otros sonidos. El enmascaramiento es un fenómeno bastante familiar para todos. Sucede, por ejemplo, cuando intentamos escuchar a alguien que habla en medio de un ruido muy intenso: no podemos discriminar lo que dice porque su voz está enmascarada por el ruido. Es importante observar que el enmascaramiento es una propiedad del oído y no del sonido. Si mezclamos, en un equipo de audio un sonido intenso (90 dB) con otro muy débil (20 dB), la salida de los parlantes contendrá ambos sonidos en sus proporciones originales. Sin embargo el oído no percibirá el de 20 dB.

Se ha determinado con gran detalle cómo cambia la curva del umbral de audición ante la presencia de un sonido dado (denominado sonido *máscara*, o sonido *enmascarante*). Esta determinación se repitió para diversos sonidos máscara, de distintas frecuencias, amplitudes y contenidos espectrales. A modo de ejemplo, en la Figura 3.13 se muestra el efecto de un tono máscara de 400 Hz para varios niveles sonoros (40 dB, 60 dB y 80 dB). Se puede apreciar que a medida que aumenta el nivel de presión sonora del tono máscara, mayor resulta el incremento del umbral, lo cual significa que los otros tonos deberán ser cada vez más intensos para no ser enmascarados. Por otra parte, la región enmascarada se ensancha, vale decir que la zona de influencia de la máscara crece. En otras palabras, al aumentar el nivel del tono máscara, se produce un incremento cuantitativo (mayor nivel) y cualitativo (más frecuencias) del umbral (Miyara, 1999). El enmascaramiento es, en cierto sentido, un defecto del oído, pero también es una virtud, ya que nos permite desembarazarnos de una cantidad de información inútil o difícil de procesar por el cerebro.

Una interesante aplicación del enmascaramiento es la compresión de los datos de audio digital, de manera de reducir la cantidad de espacio requerido para almacenar un tiempo dado de música. La técnica se basa en aprovechar que mucha información que aparece en una grabación de alta calidad no aporta nada a la audición, ya que es enmascarada por otros tonos presentes, de modo que puede eliminarse, con ahorro de espacio. Por ejemplo, si se detecta que existe un tono de 400 Hz de 80 dB, de acuerdo a lo indicado por la curva de 80 dB de la Figura 3.31 un tono de 1 kHz y 30 dB será inaudible, y por consiguiente se puede eliminar sin perjuicio alguno para la calidad de la reproducción. Esta idea se aplica en los DCC (Digital Compact Cassette, o cassette compacto digital) y en los MD (Minidisc), así como en el formato de compresión de datos con pérdidas MPEG-1 Audio Layer III (MP3). La música funcional de los locales comerciales, bares, restaurantes y algunas salas de espera de consultorios médicos, también aprovecha el fenómeno de enmascaramiento, posibilitando cierta “privacidad pública”, al impedir que las conversaciones ajenas puedan ser escuchadas por terceras personas.

También se apela al enmascaramiento en forma inconsciente cuando se incrementa el volumen de un equipo de música (Reproductores de MP3, MP4, teléfonos inteligentes, car stereo, discman, etc.) ante la existencia de ruidos ambientales (ruido urbano por ejemplo). En este caso, al elevar el nivel sonoro de la música, ésta enmascara al ruido ambiente, permitiendo escuchar la música en mejores condiciones. En el mundo moderno el ruido ambiente es considerable, lo que ha llevado a la sociedad al acostumbamiento, y aún

a la predilección por la música “a todo volumen”. Esto es potencialmente peligroso para la salud auditiva, ya que para enmascarar el ruido con la música se requiere que el nivel de ésta se encuentre entre 20 y 30 dB por arriba del ruido. Así, si el ruido ambiente es de 75 dB, es probable que el usuario del reproductor musical esté escuchando a un nivel cercano a los 100 dB. Esto puede llegar a ser causa de accidentes, por ejemplo, en el caso de estar conduciéndose en la vía pública (en automóvil, motocicleta, bicicleta o como transeúnte). Además de ser peligroso para la salud auditiva.

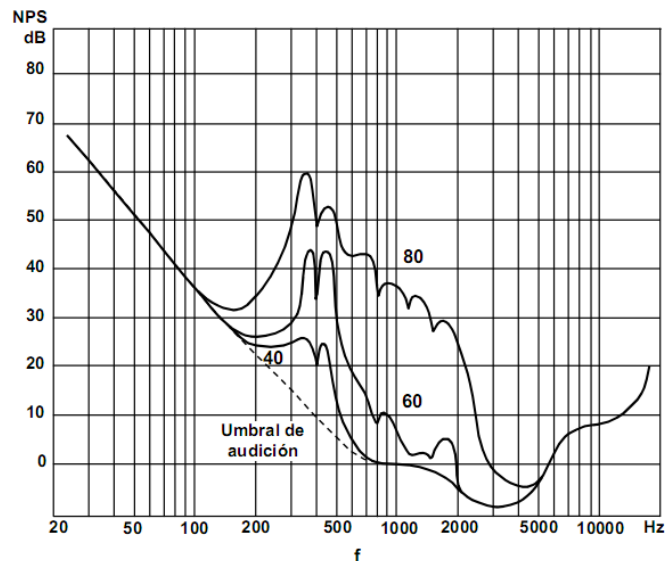


Fig 3.31 Enmascaramiento. Curvas de umbral de audición antela presencia de un tono máscara de 400 Hz (según Egan, Harold y Hake). Se muestran las curvas correspondientes a los casos en que el tono máscara tiene niveles de presión sonora de 40 dB, 60 dB y 80dB respectivamente, y en línea de trazos, el umbral de audición original. Se observa que cuanto mayor es el nivel del tono máscara, mayores el incremento del umbral, y más amplia la zona del espectro afectada.

Efecto precedente

El *efecto precedente* es el fenómeno de audición espacial que ocurre cuando dos sonidos similares se presentan desde diferentes lugares separados por un breve retardo de tiempo. La persona escucha sólo un sonido que ubica según la dirección del sonido que le llegó primero. Sin embargo, bajo ciertas condiciones el sistema auditivo puede percibir las dos señales como separadas.

Un experimento interesante consiste en alimentar unos auriculares estereofónicos con dos señales iguales, una de las cuales se encuentra ligeramente retardada respecto a la otra. Si se va aumentando el retardo desde 0 a 0,6 ms, se crea la sensación de una fuente virtual (aparente) que parece desplazarse desde el frente hacia el lado que no experimenta retardo. Después de los 0,6 a 35 ms de retardo, la fuente virtual permanece más o menos fija, pero parece ensancharse cada vez más. Para retardos mayores a 35 ms la fuente virtual se divide en dos, percibiéndose separados ambos canales, como provenientes de diferentes fuentes. A medida que el retardo se hace mayor, el segundo sonido aparece como un eco del primero (Miyara, 1999).

Este experimento es el denominado *efecto de precedencia* o *Efecto Haas* (en honor al investigador que estudio sus consecuencias para la inteligibilidad de la palabra) y puede utilizarse para controlar de un modo más realista la ubicación aparente de una fuente en la imagen estereofónica.

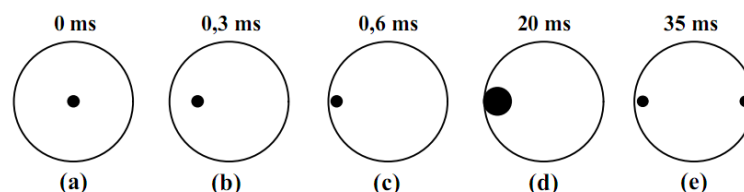


Fig 3.32 Efecto de precedencia (efecto Haas). Se envía por medio de auriculares un sonido corto a ambos oídos, estando el correspondiente al oído derecho retrasado respecto al del oído izquierdo. En la figura se muestran las imágenes auditivas ante diferentes retardos: (a) La señal llega a ambos oídos simultáneamente (sin retardo). (b) La señal llega al oído izquierdo 0,3 ms después que al oído derecho: la fuente virtual se desplaza hacia la derecha. (c) La señal llega al oído izquierdo 0,6 ms después que al oído derecho: la fuente virtual deja de moverse. (d) La señal llega al oído izquierdo 20 ms después que al oído derecho: la fuente virtual parece ensancharse. (e) La señal llega al oído izquierdo 35 ms después que al oído derecho: por primera vez se crea la sensación de dos fuentes virtuales.

3.7 Patologías básicas del sistema auditivo.

La patología o el estudio de las enfermedades del oído se ocupa de todas las dolencias y anormalidades que pueden afectar a este órgano. En muchas ocasiones éstas se vuelven irreversibles. A continuación nombraremos algunas patologías del aparato auditivo:

Enfermedades del oído externo:

1. Acumulación de cerumen.
2. Infecciones del conducto auditivo.
3. Deformaciones congénitas.

Enfermedades del oído medio:

1. Inflamación aguda del oído medio (otitis media aguda).
2. Inflamación crónica del oído medio.
3. Otosclerosis.

Enfermedades del oído interno:

1. Tinnitus (zumbido en los oídos).
2. Recrutement.(reclutamiento)
3. Trastorno en la discriminación de frecuencias.
4. Presbicusis.
5. Sordera congénita del oído interno.
6. Trauma acústico.
7. Enfermedad de Meniere.

Agotamiento

Algunas personas sufren de una pérdida no muy grande de audición por una forma anormal de adaptación auditiva llamada “agotamiento. Estas personas nunca deben usar audífonos. En este caso el tiempo de recuperación de un oído agotado es mucho mayor que el de un oído adaptado. Dependiendo de la duración del sonido escuchado, puede durar desde varias horas a todo un día (Philips, 1991).

Fatiga

Cuando el oído está sometido a sonidos fuertes (más de 90-100 dBA) de larga duración se produce fatiga, además de una adaptación normal. Es decir, la reducción de la percepción de la sonoridad es mucho mayor que pudiera esperarse a base de la adaptación. El tiempo de recuperación también es más largo. Si la sonoridad antes mencionada no se excede demasiado, frecuentemente el proceso todavía sigue siendo reversible (Philips, 1991).

Trauma acústico

Cuando el oído está expuesto frecuentemente a sonidos de más de 90-100 dB, se produce daño del ruido. Entonces la audición es afectada en el área de las notas altas (alta frecuencia), es decir, una persona expuesta constantemente a un ruido alto se convertirá en “duro de oído” en cuanto a las notas agudas, independientemente de las frecuencias que comprendan los tonos constituyentes del ruido perjudicial.

Los obreros de astilleros y talleres mecánicos suelen sufrir de esta sordera profesional. A esta persona se le debería recomendar que usara protectores de oídos que atenuarán hasta cierto grado el ruido a que están expuestos (Philips, 1991).

Adaptación

Cuando se expone el oído durante un largo periodo a un sonido no demasiado alto se ha demostrado mediante medidas que la sensibilidad del oído decrece. Esta reducción de sensibilidad puede ser muy importante. Cuando el sonido cesa, la antigua sensibilidad vuelve lentamente. Este fenómeno se llama Adaptación. Es un proceso fisiológico normal. La adaptación del oído es completamente análoga a la del ojo

cuando se pasa de la oscuridad a la luz: transcurre un tiempo hasta que el ojo puede comenzar a ver nuevamente (Philips, 1991).

Audiometría

La *audiología práctica* es la parte de la *audiología* que trata de todos los diversos modos de determinar el grado de deficiencia auditiva de un paciente (*audiometría*) y de las posibilidades de corrección por medio de un audífono. Como se vio anteriormente existe un *umbral normal de audibilidad* que depende de la frecuencia. Cuando a un oído normal se lo somete a una presión sonora de 20 μPa , con una frecuencia de 1000 Hz obtenemos un nivel de presión sonora 0 dB. Haciendo lo correspondiente para cada frecuencia obtendremos la gráfica que muestra el *umbral normal de audibilidad*, que es la curva trazada por Fletcher y Munson para 0 Fon.

Por lo tanto, cualquier curva obtenida al realizar una audiometría a un paciente que se encuentre sobre los niveles de la curva de umbral normal de audibilidad es considerada como dentro del umbral patológico. La gráfica resultante recibe el nombre de *audiograma* y es un modo particular de registrar el umbral patológico de audibilidad en función de la frecuencia. Cualquier curva obtenida por debajo del umbral normal de audibilidad es considerada dentro del umbral fisiológico. Existen varios modos sencillos de estimar la agudeza auditiva de una persona. El más sencillo es comprobar si puede oír las palabras susurradas o la conversación normal, donde se utilizan palabras de 2 y 3 sílabas, con la condición de que el paciente no pueda ver los labios del interlocutor y cada oído debe someterse a la prueba separadamente. El oído que no se está probando se puede tapar bastante bien apoyando firmemente el dedo sobre el trago, de modo que el conducto auditivo quede cerrado. Donde se deberían obtener los siguientes resultados aproximados:

Tabla 3.3 Niveles sonoros en proximidad del oído.

	a 1 cm de la aurícula	a 30 cm de la aurícula	a 100 cm de la aurícula	a 300 cm de la aurícula
Susurros	75 dB	55 dB	45 dB	35 dB
Conversación normal	90 dB	70 dB	60 dB	50 dB

La intensidad de los sonidos de esta tabla está expresada en decibeles referidos a 20 μPa . Este es aproximadamente el nivel de 0 fisiológico para la audición, pero el *umbral de la comprensión* es unos 25 dB más alto. Esto significa que si el paciente oye el susurro a una distancia de 30 cm (55 dB) y puede repetir las palabras bien, su pérdida auditiva es de unos 55 dB - 25 dB = 30 dB. No se debe olvidar nunca este factor de corrección.

Otra experiencia simple es el frotado de los dedos para determinar si el paciente puede ser sordo para las notas agudas. Se puede estimar la agudeza auditiva, aproximadamente, frotando el dedo pulgar e índice, uno contra otro, junto al oído. El nivel de este sonido es de unos 50 dB con gran contenido de medias y altas frecuencias. Si el sujeto no puede oír esto, se puede sospechar una pérdida de la audibilidad de 50 dB, por lo menos, para altas frecuencias. Otra prueba es el uso del reloj. El reloj es también un medio sencillo, pero efectivo. El tictac de un reloj mantenido justamente delante del conducto auditivo (pero sin tocar la cabeza) tiene un nivel de aproximadamente 40 dB con gran contenido de medias y altas frecuencias por encima de 1500 Hz. Puede usarse como una prueba sencilla, pero aproximada, para ligeras sorderas de notas agudas.

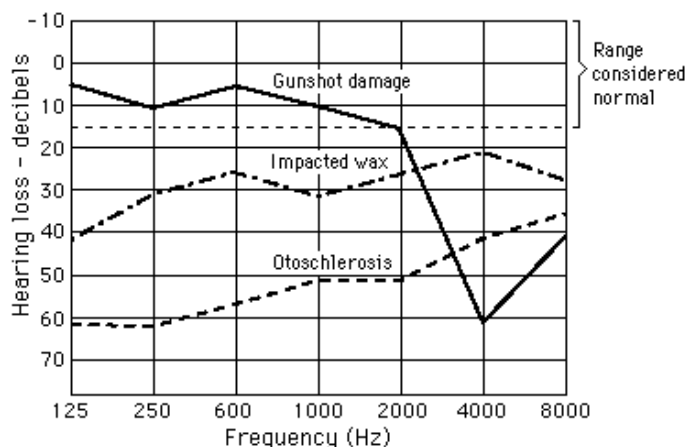


Fig. 3.33 Tres audiometrías de oídos con patologías.

El audiómetro

Es un instrumento electrónico que produce tonos puros de frecuencia y presión ajustables. Estos tonos se hacen audibles por medio de auriculares (conducción aérea) de alta calidad. La intensidad del sonido producido puede ser regulada exactamente por la persona que maneja el audiómetro. También es posible conectar al audiómetro un vibrador especial (conductor óseo), para medir la conducción ósea (las vibraciones son aquí transmitidas directamente al oído interno a través de cráneo). Esta prueba se realiza en una cámara audiometría (recinto con bajo nivel de ruido de fondo y tiempo de reverberación). El audiómetro cuenta también con un micrófono para comunicarse con el paciente.

Efectos del ruido sobre el hombre

El excesivo nivel sonoro, ya sea éste el resultado del ruido molesto de una maquinaria industrial o de la música más excelsa, tiene efectos nocivos para el hombre que han sido detalladamente estudiados por investigadores de todas partes del mundo. Es importante recalcar que tanto la música como el ruido de una fábrica tienen similares efectos nocivos cuando sus niveles sonoros son elevados. El cerebro los discrimina, pero el oído, que es quien sufre el daño, no. Una cualidad del mundo moderno es, precisamente, la de que a causa del vertiginoso crecimiento de la tecnología, se ha incrementado el nivel sonoro ambiental, que hoy se reconoce como un contaminante más (el ruido es considerado un *contaminante físico*). Una consecuencia indirecta de esto es la tendencia a escuchar música con niveles excesivos, lo cual trae aparejados diversos problemas, como afecciones nerviosas, somáticas y auditivas.

Efectos clínicos auditivos

El efecto sobre la audición humana ha sido una de las primeras consecuencias de los niveles sonoros excesivos que se estudiaron. Las investigaciones se realizaron aprovechando datos obtenidos en ambientes laborales. La consecuencia más notoria es la *pérdida de audición* ó *hipoacusia*. Esta dolencia, sobreviene ante la exposición a ruidos extremadamente fuertes aún cuando sea durante poco tiempo, o ante la exposición reiterada a lo largo del tiempo a ruidos de no tan intensos. Ejemplos del primer caso son las explosiones, bombas de estruendo, o disparos de armas de fuego sucedidas cerca de una persona, sin mediar ningún tipo de protección auditiva. El segundo caso se da por lo general en ambientes laborales, aunque también se puede dar en el interior de vehículos, en ambientes con música muy fuerte, y ante el uso de reproductores personales de música (RPM) con auriculares, ya que en general el usuario ajustará el volumen de modo de contrarrestar el ruido ambiente (por lo general bastante elevado), enmascarándolo. La pérdida auditiva se determina midiendo, por medio de una audiometría, el aumento del umbral auditivo en cada frecuencia respecto al considerado normal, teniendo en cuenta que el aumento del umbral significa que hace falta más nivel de presión sonora para percibir la presencia de un sonido. Luego se promedian los valores a 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, obteniéndose la *pérdida auditiva promedio*, PAP. Se considera que hay hipoacusia, o incapacidad auditiva, cuando la PAP supera los 25 dB, ya que se ha comprobado que a partir de esta cifra comienzan las dificultades para la comprensión de la palabra. Se define el riesgo de la exposición a determinado nivel de ruido de origen laboral durante un tiempo dado como el porcentaje de las personas expuestas que adquieren algún grado de incapacidad auditiva menos el porcentaje de las personas no expuestas que adquieren el mismo grado de incapacidad. Se toma esta diferencia para eliminar los casos de presbiacusia (es decir la pérdida gradual de la audición con la edad), y conservar sólo aquellos atribuibles exclusivamente a la exposición al ruido. En la Tabla 3.4 se indican los porcentajes de personas no expuestas a ruidos importantes que adquieren incapacidad de acuerdo al criterio anterior, en función de la edad, es decir, la distribución estadística de presbiacúsicos.

Tabla 3.4 Porcentaje de personas con presbiacusia en función de la edad (Miyara, 1999).

Edad	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
%	1	2	3	5	7	10	14	21	33	50

La Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization, ISO) ha emitido una norma, la ISO 1999, que proporciona los riesgos según la definición anterior) en función del nivel sonoro laboral promedio en dBA, y los años de exposición, como se indica en la Tabla 3.5 (los datos consignados corresponden a la primera edición de la ISO 1999). A los efectos de calcular el riesgo de acuerdo con la definición dada, se considera que la vida laboral comienza a los 20 años edad.

Tabla 3.5. Riesgo porcentual en función del nivel sonoro y de los años de exposición. Criterio ISO 1999:1975.

Edad		18	23	28	33	38	43	48	53	58	63
Años de exposición		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Nivel de exposición [dBA]	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	85	0	1	3	5	6	7	8	9	10	7
	90	0	4	10	14	16	16	18	20	21	15
	95	0	7	17	24	28	29	31	32	29	23
	100	0	12	29	37	42	43	44	44	41	33
	105	0	18	42	53	58	60	62	61	54	41
	110	0	26	55	70	76	78	77	72	62	45
	115	0	36	71	82	86	84	81	75	64	47

El nivel sonoro promedio se calcula sobre 8 horas diarias y 6 días por semana. Si la jornada laboral es de menos horas, se resta al nivel real 3 dBA por cada reducción a la mitad, y lo mismo para cada reducción a la mitad de la semana laboral. Por ejemplo, si un disc jockey trabaja 4 horas por día y 3 días por semana (es decir, la mitad de horas y la mitad de días) sometido a 106 dBA, equivale a $106 - 3 - 3 = 100$ dBA para la tabla anterior, y por lo tanto después de 10 años de actividad el riesgo de sufrir daño auditivo irreversible es de un 29%. Vemos, entonces, que para los 100 a 110 dBA que en promedio hay en las discotecas, salones de fiestas, conciertos de rock, etc., el riesgo de sufrir hipoacusia en pocos años es muy alto. Por esta razón el técnico de sonido (en especial el disc jockey y quien hace sonido en salas o exteriores) está expuesto a ver deteriorado uno de sus sentidos más preciados y laboralmente más imprescindibles: el oído. Esto implica la necesidad de trabajar siempre con protectores auditivos, ya sean tipo tapones (de siliconas, de lana mineral, etc.) o tipo cobertor (independientes ó unidos a cascos), los que utilizados sistemáticamente reducen los riesgos considerablemente. Los valores de la tabla anterior han llevado a la mayoría de los países a promulgar reglamentaciones por las cuales se exige que en ambientes laborales no se exceda un nivel promedio de 90 dBA (lo cual en realidad brinda una protección relativa, porque hasta un 21% de los sometidos a este nivel sonoro puede desarrollar hipoacusia). En la República Argentina, la ley que se aplica es la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo, N° 19.587/72, Decreto Reglamentario N° 351/79, Resolución N° 295/03 del MTESS y Resolución N° 85/12 de la SRT. En general cada país cuenta con legislación propia que regula la máxima exposición a ruido laboral admisible, pero en general los límites para una jornada de 8 horas oscilan entre 85 dBA (caso de la República Argentina) y 90 dBA. La tabla muestra que cuando el nivel de ruido es inferior a los 80 dBA el porcentaje de personas afectadas más allá de lo atribuible a la presbiacusia no es significativo. Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) de los Estados Unidos, ha concluido que una exposición permanente (24 horas diarias) a un nivel de ruido de 70 dBA o bien una exposición de carácter laboral (8 horas diarias) a 75 dBA aseguran que un 96% de la población no sufrirá mayores daños auditivos que los correspondientes a la propia presbiacusia.

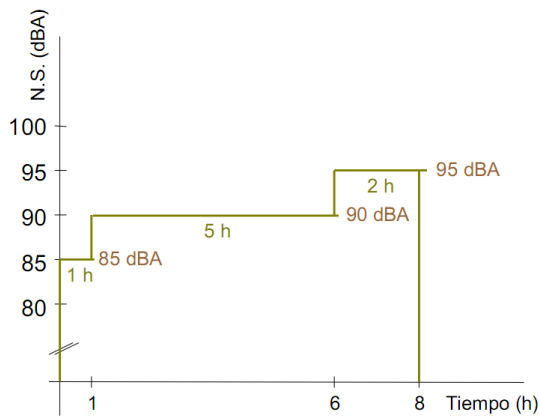
La sordera profesional ú ocupacional, inducida por ruido o sonidos de nivel muy alto, comienza perjudicando la audición de las altas frecuencias. El sonido pierde brillo, y más adelante empiezan a perderse las frecuencias imprescindibles para comprender la palabra. Es de notar que la percepción de la música se ve afectada mucho más tarde, ya que la comprensión de la música es mucho menos crítica que la de la palabra. Después de una exposición no muy larga a niveles muy altos, por ejemplo durante 2 horas a 100 dBA, se produce una *hipoacusia temporaria*, es decir que después de unas horas de descanso auditivo desaparece, volviendo la audición a niveles normales. Sin embargo, la calidad de la audición poco después de la exposición es un fiel reflejo de lo que será la audición después de unos años de someter reiteradamente el oído a estos niveles. En otras palabras, la hipoacusia sigue, a largo plazo y de forma irreversible, evolución similar que al principio se da temporariamente.

Recordando lo visto en el capítulo II, el nivel sonoro continuo equivalente se determinará según:

$$L_{Aeq} = 10 \times \lg \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \times L_{A,i}} \times t_i \right]$$

Donde: t: tiempo de muestreo
 Li: nivel sonoro presente durante el tiempo ti
 n: cantidad de lapsos

Ejemplo de cálculo simplificado de una jornada de trabajo de 8 hs (Giménez de Paz, 2007).



Valores anteriores tabulados:

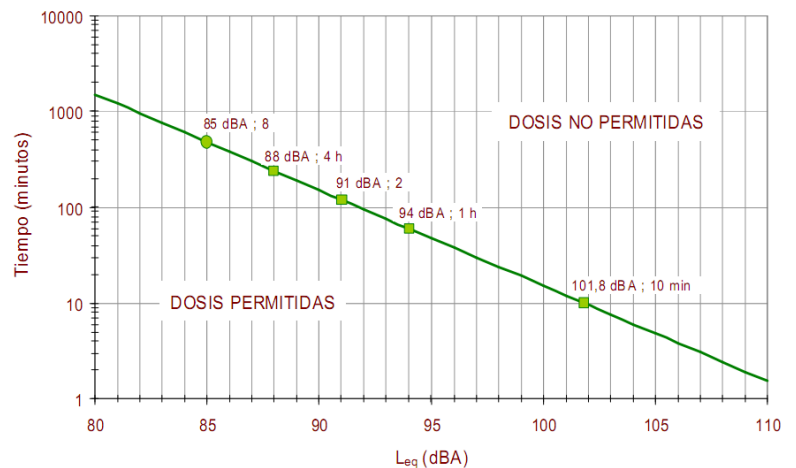
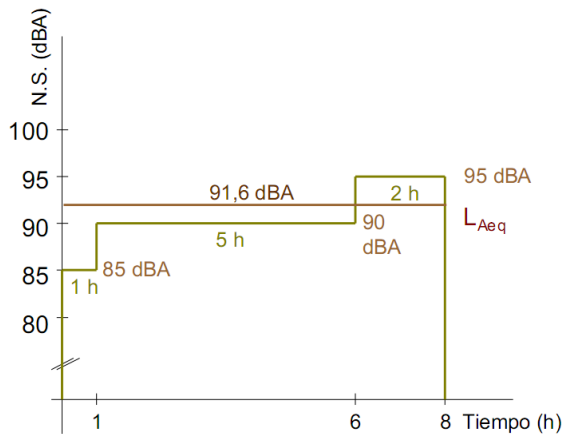
Durante t_i	Con un nivel L_i
1 h	85 dBA
5 h	90 dBA
2 h	95 dBA

$$L_{Aeq} = 10 \times \lg \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \times L_{A,i}} \times t_i \right]$$

$n = 3$; $t = 8$ h

$i=1 \Rightarrow t_1 = 1$; $L_1 = 85$; $i=2 \Rightarrow t_2 = 5$; $L_2 = 90$; $i=3 \Rightarrow t_3 = 2$; $L_3 = 95$

$$\begin{aligned} L_{Aeq} &= 10 \lg \left[\frac{1}{8} (10^{8,5} \times 1 + 10^{9,0} \times 5 + 10^{9,5} \times 2) \right] = \\ &= 10 \lg \left[\frac{1}{8} (316\,227\,766 + 5\,000\,000\,000 + 6\,324\,555\,320) \right] = \\ &= 10 \lg \left[\frac{1}{8} (11\,640\,783\,086) \right] = 10 \lg [1\,455\,097\,886] = 10 \times 9,162 \dots = \\ L_{Aeq} &= 91,6 \text{ dBA} \end{aligned}$$



Dosis, D

La dosis se obtiene de:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{t_i}$$

donde Los n tiempos T_i son en los que estuvo presente el nivel sonoro L_i y t_i los permitidos para esos mismos L_i

Los T_i se miden y los t_i se calculan. Los t_i se obtienen en horas y fracciones de horas.

$$t_i = 8 \times 10^{0,1(85-L_i)}$$

Inversamente, dato el tiempo t de exposición al ruido, se puede calcular el L_{Aeq} máximo permitido para esa exposición de manera de no superar el equivalentemente permitido de 85 dBA para 8 hs

$$L_{Aeq} = 85 - 10 \log (t / 8) \quad \text{dBA}$$

Repetición del ejemplo anterior

Durante t_i	Con un nivel L_i
1 h	85 dBA
5 h	90 dBA
2 h	95 dBA

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{t_i}$$

$n = 3$

$i=1 \Rightarrow T_1 = 1; t_1 = ?; \quad i=2 \Rightarrow T_2 = 5; t_2 = ?; \quad i=3 \Rightarrow T_3 = 2; t_3 = ?$

Valores anteriores tabulados:

Durante t_i	Con un nivel L_i
1 h	85 dBA
5 h	90 dBA
2 h	95 dBA

$$D = \sum_{i=1}^3 \frac{T_i}{t_i}$$

$$t_1 = 8 \times 10^{0,1(85-85)}$$

Con: $t_2 = 8 \times 10^{0,1(85-90)}$

$$t_3 = 8 \times 10^{0,1(85-95)}$$

Durante t_i	Con un nivel L_i
1 h	85 dBA
5 h	90 dBA
2 h	95 dBA

$$t_1 = 8 \times 10^{0,1(85-85)} = 8 \times 1 \dots = 8 \text{ h}$$

$$t_2 = 8 \times 10^{0,1(85-90)} = 8 \times 0,32 = 2,53 \text{ h}$$

$$t_3 = 8 \times 10^{0,1(85-95)} = 8 \times 0,1 \text{ h} = 0,8 \text{ h}$$

$$D = \frac{1}{8} + \frac{5}{2,53} + \frac{2}{0,8} = 0,125 + 1,976 + 2,5 = 4,6$$

Resumen de resultados:

$$L_{Aeq} = 91,3 \text{ dBA} > 85 \text{ dBA, y}$$

$$D = 4,6 > 1$$

Ambos superan los máximos permitidos por nuestra legislación:

85 dBA y $D = 1$ respectivamente.

Vinculación de las ecuaciones

$$L_{Aeq} = 85 + 10 \lg(D)$$

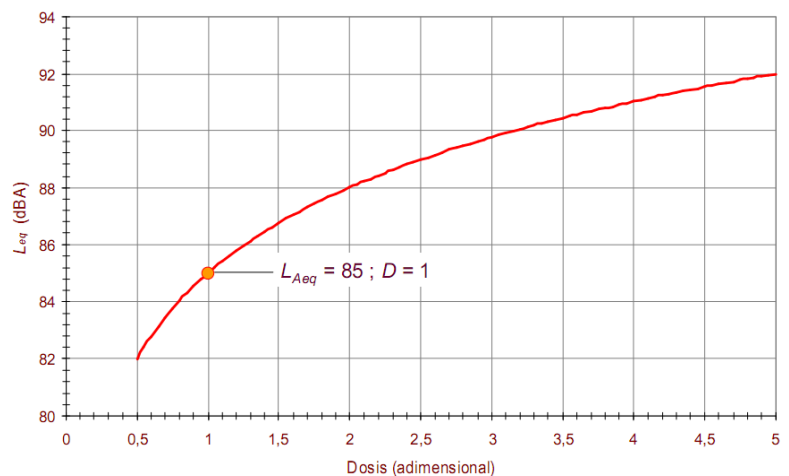
$$D = 10^{0,1(L_{Aeq}-85)}$$

En el ejemplo, con $D = 4,6$

$$\begin{aligned} L_{Aeq} &= 85 + 10 \lg(4,6) = \\ &= 85 + 10 \times 0,663 = \\ &= 85 + 6,63 = 91,6 \text{ dBA} \end{aligned}$$

Coincidente con el valor anterior, salvo por redondeos.

VINCULACION ENTRE L_{eq} Y DOSIS



Efectos clínicos no auditivos

Se han descrito numerosos efectos clínicos (efectos que se manifiestan a través de síntomas o patologías) no auditivos del ruido. Entre ellos pueden citarse la *hipertensión arterial pasajera*, las *taquicardias*, las *cefaleas*, el *nerviosismo*, *trastornos del sueño*, el *estrés*, la *reducción del rendimiento físico* y la *pérdida de la concentración y de la atención*. También hay *variaciones del ritmo respiratorio*, *disminución de la secreción salival* y del *tiempo de tránsito intestinal*. Por último, se producen *afecciones de la garganta* como resultado de forzar la voz. A partir de estudios epidemiológicos se han comprobado incrementos significativos en la incidencia de *ataques cardíacos*, *neurológicos*, *digestivos* y *endócrinos*, los cuales llegan a ser hasta 4 veces más frecuentes en la población expuesta a ruidos muy intensos, como sucede en las zonas aledañas de los aeropuertos.

Los sonidos intensos inciden también en el *sentido del equilibrio*, a través de dos mecanismos. El primero son las vibraciones intensas que se producen en el órgano sensor del equilibrio, que está muy próximo al oído interno y comunicado con él. El segundo es la interferencia entre las señales nerviosas de los dos sistemas, dado que los respectivos nervios están muy próximos. Esto repercute en el control del equilibrio, llegando a producirse *mareos* e *inestabilidades ante la exposición prolongada a sonidos muy intensos* (por ejemplo ante la escucha de música excesivamente fuerte, lo cual suele suceder en locales bailables).

Efectos no clínicos.

El primer efecto es la *molestia*. A modo de criterio general, puede afirmarse que el nivel de confort auditivo se da hasta los 70 a 80 dBA, dependiendo del *tipo de sonido*, la *motivación para escucharlo*, y las *características personales de quien lo escucha*. Por encima de 120 dBA se percibe dolor además de un sonido ensordecedor. El ruido puede provocar algunos cambios de conducta como *nerviosismo*, *irritabilidad*, *estados de ansiedad*, *conductas agresivas*, *reacciones impulsivas*, *falta de tolerancia*, etc. lo que puede manifestarse durante la tarea a realizar como en sus relaciones interpersonales. Ante una situación de ruido intenso los individuos reaccionan en formas diferentes de acuerdo a sus personalidades.

En relación con la *eficiencia en el trabajo*, se observa que la misma *se reduce ante un ruido repentino o inusual*, pero al volverse éste repetitivo el individuo se acostumbra y recupera la eficiencia. Esto es especialmente cierto para el caso de los trabajos manuales o que no requieren una gran elaboración intelectual. Las *tareas intelectuales se ven más afectadas por el ruido que las físicas*. Uno de los efectos más notorios del ruido o los sonidos intensos es la *interferencia a la palabra*, lo cual crea dificultades para la comunicación oral. Esto a su vez lleva a las personas a elevar la voz, forzando sus cuerdas vocales. Por otra parte, por encima de los 90 dBA desaparece la alta fidelidad, ya que las propias distorsiones del oído impiden una escucha fiel de la música. Dichas distorsiones son, en parte, resultado de una contracción muscular refleja dentro del oído medio que actúa como mecanismo de protección del sistema auditivo. Otra razón es que los sonidos de nivel tan elevado enmascaran mucho más a los sonidos más débiles, con lo cual desaparece toda sutileza. Esto muestra lo inútil de llevar el nivel sonoro muy por encima de este valor.

3.7 Resumen

A continuación se sintetizan los conceptos fundamentales de la unidad III:

- El *oído humano* puede dividirse anatómicamente en tres partes principales: el oído externo, el oído medio y el oído interno.
- El oído interno es la parte más importante de todo el oído. Se encuentra detrás del oído medio y es una cavidad en el *hueso pétreo*, llena de líquido. El hueso pétreo tiene una función protectora. La relevancia del oído interno se debe a que en él se produce la transducción de vibraciones sonoras a impulsos nerviosos.
- El *umbral de audibilidad* de un oído sano está definido en 20 μPa , valor que equivale a 0 dB_{SPL}.
- La *audiometría* es el estudio médico básico que permite evaluar en forma rápida el estado del oído.
- El *audiómetro* es el equipamiento electromédico utilizado para realizar las audiometrías tradicionales y de rango extendido.

- Los órganos que forman parte del sistema de fonación humana y que constituyen el denominado tracto vocal son: los pulmones, la laringe, la faringe, la cavidad nasal y la cavidad bucal
- El grado de *inteligibilidad de la palabra* está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral.
- El hombre atribuye los siguientes cuatro *aspectos* o *factores subjetivos* del sonido: *sonoridad, tono, timbre y duración*.
- Una forma de entender el funcionamiento del sistema auditivo es suponer que contienen una serie o banco de filtros pasa banda sobrelapados conocidos como filtros auditivos. El ancho de banda de cada filtro auditivo se denomina *banda crítica*.
- Las patologías del sistema auditivo pueden afectar el oído externo, el medio y el interno, siendo algunas de ellas reversibles y otras irreversibles.
- El *efecto Doppler*, es el aparente cambio de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador.
- La *direccionalidad* se refiere a la capacidad de localizar la dirección de donde proviene el sonido. Permite, por ejemplo, ubicar visualmente una fuente sonora luego de escucharla.
- La *espacialidad* nos permite asociar un sonido con el ambiente en el cual el sonido se propaga, y estimar, por ejemplo, las dimensiones de una habitación o una sala sin necesidad de recurrir a otro sentido como la visión.
- El *efecto precedente* es el fenómeno de audición espacial que ocurre cuando dos sonidos similares se presentan desde diferentes lugares separados por un breve retardo de tiempo. La persona escucha sólo un sonido que ubica según la dirección del sonido que le llegó primero. Sin embargo, bajo ciertas condiciones el sistema auditivo puede percibir las dos señales como separadas

Bibliografía

- Arias, C., y Ramos, O. A. 2003. Audición espacial en ambientes reverberantes: aspectos teóricos relevantes. *Interamerican Journal of Psychology*, 37(2): 373-382.
- Basso, G. 2006. Percepción auditiva. Editorial Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires, Argentina.
- Beranek, L. L. (1961), "*Acústica*". MIT, USA, Edición en castellano Editorial Panamericana.
- Blauert, J. 1997. "*Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*". MIT Press, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA.
- Brown, C., y May, B. 2005. Comparative Mammalian Sound Localization. En R. R. Fay y A. N. Popper (Eds.), *Sound Source Localization*: 124-178. Springer, NY.
- Carrión Isbert, A. (2001), "*Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*", UPC, España
- Coleman, P. D. 1962. Failure to Localize the Source Distance of an Unfamiliar Sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(3): 345-346.
- Everest F. A. (2001). "*The Master Handbook Of Acoustics*", (4th Ed), McGraw-Hill, USA.
- Ferreyra, S., Hüg M., Jasá V. J., Lucchino F. (2004), Apunte del Seminario: "*Introducción a la Acústica y Psicoacústica*", CINTRA, UTN-FRC.
- Ferreyra, S., Miretti, G., Barrera, F. (2009), "*Acústica: Campo de Acción del Ingeniero Civil*". Apunte del Seminario de grado para la FCEfYN de la UNC. CINTRA, UTN, FRC.
- Fletcher, H. and Munson, W.A. (1933). "Loudness, its definition, measurement and calculation", *Journal of the Acoustic Society of America* Vol 5, pp 82-108.
- Fletcher, H. (1940). Auditory patterns. *Review of Modern Physics*, 12, pp 47-65.

- Franks, John R.; Stephenson, Mark R.; Merry, Carol J., eds. (1996). *Preventing Occupational Hearing Loss - A Practical Guide*. National Institute for Occupational Safety and Health. pp 88. Harris C. M. (1999), "Noise and Vibration Control Engineering", McGraw-Hill, 3st Edition, USA.
- Gimenez de Páz, J.C.(2007) , Ruido Para los posgrados de higiene y seguridad industrial. Editorial Nobuko, Bs As.
- Glasberg, B. R., & Moore, B. C. J. (1990). "Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data," *Hear. Res.* 47, 103–138.
- Grantham (1995). Spatial Hearing and Related Phenomena. En B. C. J. Moore Ed., *Hearing, Handbook of perception and cognition* (2nd ed.): pp 297-345. Academic Press, San Diego, CA.
- Kinsler y Frey. (1962), "Fundamental of Acoustics". John Wiley & Sons, Inc.
- Kuhn, G. F. 1977. Model for the interaural time differences in the azimuthal plane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(1): 157-167.
- Nave, Carl R. (2006). "Threshold of Pain". *HyperPhysics*. SciLinks. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/sound/intens.html>. Retrieved 2009-06-16.
- Maa D.Y. (1941), The Flutter Echoes. *Journal of Acoustical Society of Americas*. Vol 13, nº2, pp 170.
- Miles, R. N. 1984. Sound field in a rectangular enclosure with diffusely reflecting boundaries. *Journal of Sound and Vibration*, 92(2): 203-226.
- Mills, A. W. 1958. On the Minimum Audible Angle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 30(4): 237-246.
- Mills, A. W. 1960. Lateralization of High-Frequency Tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Mills, A. W. 1960. Lateralization of High-Frequency Tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32: 132-134.
- Mills, A. W. 1972. Auditory localization. IE J. V. Tobias (Ed.), *Foundations of Modern Auditory Theory* Vol. 2: 301-345. Academic Press, NY.
- Miyara F. (1999), "Acústica y Sistemas de Sonido". Editorial UNR, Rosario. Argentina.
- Miyara F. (2000), Introducción a la psicoacústica. Rosario, Argentina
- Moore B. C. J. y Glasberg B. R. (1983), Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *Journal of the Acoustical Society of America* 74: pp 750-753.
- Moore, B. C. J., y Glasberg, B. R. 1996. A Revision of Zwicker's Loudness Model. *Acta Acustica united with Acustica*, 82(2): 335-345.
- Moore, B. C. J. (2003). *An Introduction to the Psychology of Hearing*. N. Y.: Academic Press. 5ª edición.
- Moore, J. K., Perazzo, L. M., y Braun, A. (1995). Time course of axonal myelination in the human brainstem auditory pathway. *Hearing Research*, 87(1-2): 21-31.
- Moorer, J. A. 1979. About This Reverberation Business. *Computer Music Journal*,
- Olson Harry F. (1957), "Acoustical Engineering". Van Nostrand Company.
- Patterson, R. D. (1976). Auditory filter shapes derived with noise stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*. 59(3): 640-654.
- Perrott, D. R., y Saberi, K. (1990). Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(4): pp 1728-1731.
- Perrott, D. R., Saberi, K., Brown, K., y Strybel, T. Z. (1990). Auditory psychomotor coordination and visual search performance. *Perception & Psychophysics*, 48(3): 214-226.
- Philips. Inc. (1991) "Audífonos". Ed. Philips. New York., 1991
- Robinson D. W. et al. (1956), "A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones", *Br. J. Appl. Phys.* 7 pp.166–181.
- Roederer J. G. (1997) "Acústica y Psicoacústica de la Música" Ricordi.
- Strutt, J. W. (Baron Rayleigh), "Theory of sound", 2nd Edition, Dover Publications, 1945
- Serra, M. R., Biassioni, E. C., Ramos, O., Arias, C., Verzini, A., Hinalaf, M., Pérez Villalobo, J., Hüg, M., Ferreyra, S., Bermejo, F. (2008), "Apunte del Seminario: Investigación Interdisciplinaria en Acústica", CINTRA, UTN-FRC, Argentina, 2008.
- Schooneveldt, G.P., & Moore, B.C.J. (1989). Comodulation masking release (CMR) as a function of masker bandwidth, modulator bandwidth, and signal duration. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 85(1): pp 273-281.

Normas

ANSI (1994), "Acoustical Terminology". Editorial American National Standard Institute. New York.

- 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 4066:2008 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.
- 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.
- ISO 226:2003, Acoustics - Normal equal-loudness-level contour