

Dr. José M^a Calvete Escarate
Experto en Otorrinolaringología Aeronáutica
Servicio Médico de Iberia, Líneas Aéreas de España

6 – AUDICIÓN Y VUELO

INTRODUCCION

El fenómeno auditivo lleva consigo dos etapas sucesivas de características absolutamente distintas. La primera es el proceso de transmisión vibratoria que concluye cuando las células ciliadas del Órgano de Corti reciben el estímulo. Se trata de un proceso esencialmente mecánico.

La segunda es el proceso de percepción, que se inicia en la base de dichas células ciliadas, y que mediante los mecanismos bioeléctricos de la transmisión nerviosa, a través del nervio estatoacústico y de las vías centrales, llegan a la corteza cerebral donde se realiza la interpretación de los mensajes.

La repercusión de la actividad aeronáutica sobre la audición tiene dos vertientes:

- a - Por un lado los efectos nocivos que el exceso de energía acústica puede tener sobre los distintos elementos de la transmisión del sonido
- b - El elemento enmascarante que sobre la recepción de los mensajes verbales entre los miembros de la tripulación o entre la tripulación y las torres de Control aéreo ejerce un ambiente ruidoso en cabina.

1 - ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA

1.1.- Oído Externo y Medio

Oído externo – El oído externo tiene una doble función: La protección del oído medio, especialmente del tímpano y una, aunque debil, amplificación del sonido en determinadas frecuencias.

Pabellón de la oreja: En el hombre carece, prácticamente, de movilidad. Movilidad muy importante en distintas especies animales para localizar con exactitud las fuentes del sonido. Sin embargo juega un papel relevante en la captación y refuerzo de las ondas sonoras que son “barridas” hacia el conducto auditivo externo (c.a.e.) por los relieves cartilagosos que lo integran. El pabellón amplifica fundamentalmente frecuencias vecinas a los 5.000 – 6.000 Hz. La influencia sobre la audición de la adecuada morfología de dicho pabellón, se demuestra en las pérdidas totales o parciales del mismo o si experimentalmente se borran los relieves con cera.

Conducto auditivo externo – Transmite el sonido, actuando como resonante en las frecuencias medias – graves, de acuerdo con la longitud del mismo. La amplificación es máxima, alrededor de 20 dB, para frecuencias comprendidas entre los 2.000 – 3.000 Hz. Por medio de los pelos de su entrada, así como por la secreción ceruminosa de sus glándulas, se

efectúa un filtrado de las impurezas que el aire pudiera contener, protegiendo así a la delicada membrana timpánica. Por ésta razón no se debe limpiar uno mismo el conducto auditivo con objetos como palillos, horquillas. El exceso de cerumen, caso de producir tapones, deberá ser extraído por el especialista.

Oído medio: El papel de las estructuras del oído medio es doble:

- Transmitir y ampliar el estímulo vibratorio desde la membrana timpánica al Órgano de Corti.
- Proteger las delicadas formaciones neuroepiteliales del oído interno.

El papel de transmisión y amplificación del sonido en el oído medio es indispensable, ya que cuando una onda sonora pasa de un medio aéreo a uno líquido, pierde 999 milésimas de su potencia. Esta pérdida se produciría fatalmente, si el estímulo sonoro pasase directamente del ambiente exterior, a las células ciliadas del oído interno sumergidas en la endolinfa. Es por esta razón por la que los peces poseen unas estructuras del oído medio mucho más simples que los animales terrestres al no cambiar el medio de propagación del sonido.

Tímpano : Vibra bajo los estímulos de energía sonora, con desplazamientos muy pequeños. Esta vibración no se realiza de manera uniforme por toda la superficie de la membrana, siendo el lugar de máximo desplazamiento el cuadrante póstero – inferior. No obstante los desplazamientos de otras zonas del tímpano varían en función de la frecuencia. A partir de la frecuencia de 3.000 Hz, p.ej. La máxima amplitud vibratoria se da en el cuadrante póstero – superior. Por todo esto, cuando existen perforaciones de la membrana, estas tienen distinta repercusión sobre la audición según la zona donde se asientan (supuesto el mismo tamaño).

Cadena de huesecillos: **Martillo, yunque y estribo.** Esta cadena vibra en bloque, y debido a los mecanismos de suspensión tiene una extremada sensibilidad. La diferencia entre las superficies del tímpano y de la ventana oval aumenta considerablemente la presión al nivel de la platina del estribo. Se han hecho estimaciones que relacionan ambas superficies, dándose valores comprendidos entre 19/1 a 27/1. La amplificación global que suponen estos valores, proporciona ganancias entre 27 y 35 dB.

Músculos del oído medio: El reflejo acústico se desencadena por la estimulación acústica adecuada, traducándose por la contracción *bilateral* del **músculo del estribo**. La contracción refleja del **músculo del martillo** no está todavía bien definida. Como el reflejo acústico aparece por sonidos intensos, se ha pensado que jugaría un papel de protección del oído interno frente a los mismos. Debido al tiempo de latencia en la aparición del reflejo, no aporta protección contra ruidos de impacto, además presenta una fatigabilidad que limita la duración de su función protectora frente a ruidos intensos prolongados

(Figura 1)

La caja del tímpano: Las estructuras descritas, se encuentran situadas en un espacio lleno de aire que es la **caja del tímpano**. Podemos reconocer en ella tres zonas:

Receso epitimpánico

Mesotímpano

Receso hipotimpánico

Entre el primero y el segundo existe un estrechamiento que puede conducir a retención de exudados en situaciones inflamatorias. Hay otro estrechamiento anatómico en la zona de

transición entre el ático y el antro mastoideo (el *aditus ad antrum*) que puede quedar cerrado en inflamaciones, especialmente las crónicas, en las que aparezca tejido de granulación.

Para que todo el conjunto tímpano-osicular vibre con la precisión, rendimiento y delicadeza que debe hacerlo, es necesario que a ambos lados del sistema exista la misma presión. Esto se consigue con el correcto funcionamiento de la **trompa de Eustaquio**. Dicha estructura poniendo en comunicación la rinofaringe con la caja timpánica, permite, que dentro de ciertos límites, sea cual fuere la presión en el exterior (presión atmosférica), sea la misma que en el interior de dicha caja.

La descripción de los mecanismos de apertura, de los músculos que intervienen en ello, así como las particularidades de todo su funcionamiento se verán en otro apartado de este libro.

La patología de oído medio más frecuente en el medio aeronáutico es precisamente la que se deriva de las alteraciones de funcionamiento de dicha trompa. Bien por deficiencias de la misma, o porque la situación ambiental rebasa, con sus modificaciones, las posibilidades de funcionamiento de la misma.

La vía descrita tímpano-osicular para la transmisión del sonido es la fundamental, pero éste, llega también a las estructuras del oído interno a través de la vibración de los huesos del cráneo. Esta transmisión ósea tiene mucha importancia en cómo nos escuchamos a nosotros mismos cuando hablamos, ya que lo hacemos por las dos vías. Dado que las frecuencias graves se transmiten mejor por éste camino óseo, nuestra propia voz la percibimos con una tonalidad más grave que quien nos escucha. Es también la causa de no reconocer nuestra propia voz al ser grabada en un registro sonoro, que al oírla nos parece más atiplada.

1.2. Oído Interno

El oído interno o **laberinto**, incluido en el espesor del hueso temporal, consta de dos aparatos receptores funcionalmente distintos:

- El *vestíbulo* y los *conductos semicirculares* (órganos periféricos vestibulares), también denominado **laberinto posterior**. (Se estudiarán en el apartado de Sentido de equilibrio y vuelo)
- El *caracol* (órgano acústico o coclear) llamado también **laberinto anterior**.

Morfológicamente podemos distinguir un laberinto óseo y uno membranoso. El primero está constituido por la cápsula laberíntica. Las *ventanas redonda* y *oval* representan las comunicaciones del laberinto con la caja del tímpano, estando cerrada por hueso (platina del estribo) la oval, y por una membrana, la ventana redonda.

Líquidos laberínticos: La *perilinf*a y la *endolinf*a juegan un doble papel fisiológico

(**Figura 2**)

- El primero es el de participar en la puesta en funcionamiento de las células ciliadas, cocleares y vestibulares para la transmisión de la señal mecánica
- El segundo es el participar en la transformación de esta señal en un mensaje nervioso para la puesta en funcionamiento de los fenómenos moleculares entre los líquidos y las células ciliadas.

Existe una relación entre función auditiva y la homeostasis de los líquidos del oído interno.

Endolinfa – Líquido rico en potasio y pobre en sodio, polarizado positivamente en relación con la sangre y con la perilinfa. Dentro de la cóclea es posible diferenciar la *cortilnfa* que ocupa los espacios extracelulares del órgano de Corti, y la linfa subtectorial que está contenida en el espacio comprendido entre la membrana tectoria y la superficie cuticular de las células ciliadas. Las concentraciones de Na y K de la cortilnfa son similares a las de la perilinfa, y las de la linfa subtectorial similares a las de la endolinfa.

Formación de la endolinfa– El líquido precursor de la endolinfa es la perilinfa y no el plasma. La secreción de la endolinfa está localizada en ciertos segmentos del epitelio laberíntico (estría vascular, células oscuras).

Esquemáticamente, el epitelio coclear tiene tres estructuras: La *membrana de Reissner*, la *estría vascular* y el *Organo de Corti*.

Cada una de estas estructuras, de forma independiente y coordinada, colabora en la homeostasis de la endolinfa.

La membrana de Reissner interviene en el mantenimiento de la composición electroquímica de la endolinfa.

Está bien establecido que la estría vascular es la responsable de la secreción de la endolinfa. La cuestión que queda por resolver totalmente es la existencia de una eventual regulación hormonal de dicha secreción.

El Organo de Corti juega un papel cierto en la homeostasis de los líquidos. Los canales de transducción, canales catiónicos no específicos, estimulados casi permanentemente por la estimulación sonora, son el lugar de movimientos de K.

Perilnfa - Tiene una composición similar a la de un líquido extracelular. El catión principal es el Na y el anión el Cl, la concentración proteínica es baja. Hay diferencia de composición entre la perilnfa de la *rampa vestibular* y *timpánica*. La concentración de K, proteínas y glucosa, es mayor en la perilnfa vestibular que en la timpánica. Y esto es así a pesar de que ambas rampas se comunican en el *helicotrema*,

La perilnfa timpánica tiene una composición muy próxima al líquido cefalorraquídeo.

Formación de la perilnfa - La perilnfa puede proceder de dos fuentes diferentes. De un lado el plasma puede ser el precursor por medio de la red vascular capilar particularmente desarrollada en el revestimiento tisular de la rampa vestibular. De otro lado la perilnfa puede proceder del LCR, teniendo en cuenta que los espacios subaracnoideos y la espira basal de la rampa timpánica comunican por el acueducto coclear.

Laberinto anterior (Caracol)

Anatomía - El caracol, situado en el peñasco del hueso temporal, consta macroscópicamente, de una envoltura ósea, y en su interior, una estructura cartilaginosa, entre ambas los líquidos perilinfáticos.

Veamos la estructura del *caracol membranoso*: El caracol o cóclea forma dos vueltas y media de espira, arrolladas alrededor de un eje óseo de forma cónica (*el modiolo*) , dispuesto horizontalmente, y cuya base está orientada hacia el conducto auditivo interno y su punta hacia la caja del tímpano, donde forma un pequeño relieve.

En el modiolo vemos el *ganglio espiral*, con las fibras nerviosas que se unen para formar el *tronco del nervio coclear*.

La lámina espiral ósea forma un saliente óseo que se extiende en forma espiroidea desde la base a la punta, presentando unos canalículos que están ocupados por las fibras nerviosas que se dirigen *al Organo de Corti*.

El *conducto coclear* óseo contiene el conducto coclear membranoso relleno de endolinfa. Por encima se encuentra la *rampa vestibular*, por debajo la *rampa timpánica*, ambas conteniendo perilinfa.

Separando la rampa timpánica por un lado, y las rampas vestibular y conducto coclear por otro, se encuentra la *lámina espiral ósea* y la *lámina basilar*.

Separando la rampa vestibular y conducto coclear: la *membrana de Reissner*.

La pared lateral del conducto coclear forma la *estría vascular*, con numerosos vasos (zona de producción de endolinfa), y limitando lateralmente con el *ligamento espiral*.

Los espacios perilinfáticos del caracol (rampa vestibular y timpánica) comunican entre sí a nivel de la punta del caracol (*Helicotrema*), así como con el espacio perilinfático del vestíbulo, donde se encuentra el *utrículo* y el *sáculo*.

El **Organo de Corti**, situado en el conducto coclear es la estructura que transforma la energía mecánica del sonido, en eléctrica. Desde ahí esta energía caminará por vías nerviosas hasta los centros cerebrales.

(**Figura 3**)

El órgano de Corti descansa sobre la membrana basilar. Consta de una serie de células de sostén; pilares internos y externos que limitan el túnel interno (perilinfa). Arriba porción superior del sistema de sostén (tonofibrillas). Abajo, filamentos de sostén de las células falángicas (*células de Deiters*), las cuales sostienen las células sensoriales, *células ciliadas internas* y *externas*. Las primeras están dispuestas en una sola hilera y cada una de sus células se asocia con una sola fibra nerviosa aferente (estas fibras representan el 95 % de todas las fibras de la *pars coclearis* del VIII par). Las células ciliadas externas forman entre tres y cinco hileras, estando unidas en grupos de varias células con una sola fibra nerviosa aferente (representan el 5 % de todas las fibras del nervio auditivo)

(**Figura 4**)

El espectro de frecuencias comprendido entre los 18 y 20.000 Hz queda representado en las células sensoriales del Órgano de Corti a lo largo de toda la membrana basilar, de forma que las frecuencias agudas se localizan en la espira basal de la cóclea, en tanto que los tonos graves se proyectan en la proximidad del helicotrema al nivel de la espira apical. Esta disposición constituye la disposición tonotópica de la cóclea (Fig. 5).

(**Figura 5**)

1.3.- Fisiología del Oído interno

La concepción de la fisiología del oído interno se ha modificado considerablemente después de los años 80 por el descubrimiento de varios hechos:

- Las otoemisiones acústicas.
- Las propiedades contráctiles de las células ciliadas externas.
- La amplificación coclear.
- Los canales iónicos de las células ciliadas.

Propiedades fisiológicas de las **células ciliadas internas (CCI)**:

Estas son las células neurosensoriales propiamente dichas, que aseguran la transformación del impulso mecánico en influjo nervioso codificado, el cual es interpretado a nivel de los centros auditivos cerebrales

En su polo apical se encuentran los estereocilios dispuestos en hileras de talla decreciente desde el exterior al interior.

Cada CCI responde dependiendo de la frecuencia del sonido estimulante, relacionado con su posición sobre la membrana basilar. La actividad eléctrica de éstas células reposa en la puesta en funcionamiento de un cierto número de canales iónicos, probablemente en el apex de los estereocilios, por los movimientos de deflexión engendrados por una estimulación.

Los cambios de potencial son el origen de la liberación de un neurotransmisor (tipo glutamato ?), que es excitotóxico si se libera en exceso. Así se puede concebir, que una sobreestimulación sonora o una anoxia celular pueda provocar, por la liberación excesiva de glutamato, lesiones neurotóxicas de las terminaciones aferentes.

Propiedades fisiológicas de las **células ciliadas externas (CCE):**

Las CCE son tres veces más numerosas que las CCI, se disponen en tres hileras a lo largo del túnel de Corti. El apex de éstas CCE está cubierto de estereocilios situados perpendicularmente a la placa cuticular. La parte apical de los cilios más largos se implanta en la membrana tectorial, y la solidez de esta implantación varía de la base al apex.

Contrariamente a las CCI no son células sensoriales propiamente dichas, salvo quizás para estímulos sensoriales intensos, superiores a los 90 dB. Tienen por el contrario un papel efector importante gracias a sus contracciones rápidas y sus contracciones lentas.

Hay mediciones que permiten apreciar la frecuencia de resonancia de los cilios de las CCE, teniendo en cuenta su acoplamiento con la membrana tectorial. Esta frecuencia de resonancia varía de la base al apex.

La rigidez de los estereocilios es muy sensible a condiciones fisiopatológicas, en particular a los traumatismos sonoros. Después de una estimulación excesiva, la "restitutio ad integrum" de la función ciliar, solo es posible dentro de unos ciertos límites.

Es posible registrar dos componentes eléctricos superpuestos en las CCE:

- Un componente continuo reproduciendo la envoltura de la estimulación acústica.
- Un componente alternativo reproduciendo su frecuencia.

Uno de los mayores progresos de la fisiología auditiva, ha sido demostrar que las CCE poseían una actividad mecánica. Estos movimientos del cuerpo celular a lo largo de su eje mayor son de dos tipos:

Una contracción - elongación con una constante de tiempo muy corta (10 a 100 microsegundos).

Una contracción - elongación más lenta, de hasta 1 segundo. Esta contractilidad lenta puede estar controlada por el sistema eferente.

El conocimiento de estas propiedades de las CCE han permitido comprender la fisiología de los potenciales cocleares, que se pueden registrar con electrodos colocados en el promontorio, la ventana redonda o en las rampas vestibular o timpánica de la cóclea. Hay que hacer la salvedad, de que estos potenciales microfónicos cocleares aunque producidos fundamentalmente por las CCE no son exclusivos de estas.

1.4. - Vías y Centros Nerviosos

Se describe un estudio simplificado de las vías y centros nerviosos. Su complejidad, su descripción y estudio pormenorizado se saldría de los propósitos de este tema.

Una vez que las fibras tanto aferentes, desde las CCI y CCE, como las eferentes de las CCE, se reúnen y llegan al **ganglio de Corti o ganglio espiral**, de ahí formando parte del **VIII par craneal**, entran en el tronco cerebral y lo hacen a nivel de la fosita lateral del

bulbo. A nivel protuberancial se encuentran los **núcleos cocleares dorsal y ventral**. Las fibras que salen de éstos núcleos son directas y cruzadas y hacen estación en el complejo de la **oliva superior**, desde ahí van por el **lemnisco lateral de la Cinta de Reil**, a los **tubérculos cuadrigéminos inferiores** (en el hombre no ha sido comprobada con seguridad dicha estación). Las neuronas de estos centros emiten proyecciones que, llegan a los **cuerpos geniculados internos**.

Las neuronas de estos centros se proyectan formando las **radiaciones acústicas**, sobre las áreas correspondientes de la **corteza cerebral (Áreas de Brodmann, 41, 42 y 22)**, situadas en la primera circunvolución temporal

(**Figura 6**)

2.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SONIDO

Al **sonido** lo podríamos definir como "vibraciones mecánicas y ondas de un medio elástico en el ámbito de frecuencias de la audición humana. Las vibraciones se originan por movimientos de vaivén de partículas. Cuando este movimiento ocurre uniformemente se habla de vibración armónica.

Desde el punto de vista físico, cabe destacar dos aspectos perfectamente diferenciados según sea el receptor de la onda sonora. Si el receptor es un micrófono, existen unas leyes físicas bien determinadas que ligan entre sí los procesos de generación, propagación y recepción de una perturbación acústica, relacionándolas con unas determinadas **magnitudes y unidades físicas**. Sin embargo, si el receptor, es el oído humano, la medida del sonido ya no se efectúa mediante unas sencillas ecuaciones, sino que el complicado proceso de interpretación sonora se relaciona con el fenómeno físico a través de determinados procesos y **magnitudes psicofisiológicos**.

2.1.-Magnitudes características

Velocidad del sonido: Es la velocidad a la que se propagan las perturbaciones en un medio elástico. La velocidad del sonido, depende de la masa y elasticidad del medio a través del cual se transmite.

Frecuencia: Es el número de ciclos completos que ocurren en la unidad de tiempo. La unidad es el ciclo/s o **Hertzio (Hz)**. La frecuencia nos indica el **tono** de un sonido y nos ayuda a diferenciar los tonos de baja frecuencia (graves) de los de alta frecuencia (agudos).

El oído humano sólo es capaz de ser estimulado por sonidos cuya frecuencia está comprendida entre aproximadamente 20 y 20.000 Hz. Los de frecuencia inferior se llaman **infrasonidos** y los de frecuencia superior a los 20.000 Hz, se conocen como **ultrasonidos**.

Periodo: Es el inverso de la frecuencia y es el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo medido en segundos.

Oscilación periódica: La producción, propagación y detección de una onda acústica, generalmente están relacionadas con el establecimiento de una oscilación periódica. El caso más simple es el del movimiento armónico simple. En este caso, al sonido resultante se le denomina **tono puro**. Si se suman dos o más tonos, las presiones sonoras se pueden sumar dando curvas más complejas.

Longitud de onda: Se define como la distancia que recorre un frente de onda en un periodo completo de oscilación. Se relaciona con la velocidad del sonido y la frecuencia.

Presión sonora: Es la variación de la presión atmosférica producida en un punto como consecuencia de una onda sonora que se propaga a través del aire.

Se le representa por la unidad de medida **Pascal**. Antes se utilizaba el **milibar** (μbar) = dina/cm^2 . $0,1 \text{ Pa} = 1\mu\text{bar}$

Para que las variaciones de presión sean audibles, deben estar comprendidas entre $2 \times 10^{-4} \mu\text{bar}$ de presión mínima y $200 \mu\text{bar}$ de presión máxima (máxima presión sin que aparezca dolor).

El nivel de presión sonora en acústica recibe el nombre de **decibelio** (dB). Es una magnitud logarítmica determinada por la fórmula: $\text{dB} = 10 \log. \text{Intensidad sonora} / \text{intensidad del sonido de referencia}$. Expresa pues relaciones de presión sonora de dos sonidos diferentes.

El punto de referencia en audiometría es el umbral de audición en el hombre para la frecuencia de 1000 Hz. Para desencadenar una sensación sonora próxima al umbral con una frecuencia de 1000 Hz se necesita una presión sonora de $20 \mu\text{Pa}$. Esta presión sonora corresponde al valor medio obtenido en jóvenes normooyentes y constituye el punto de referencia para la determinación física o absoluta del umbral de audición tonal en decibelios.

Más sencillo para representar el umbral de audición para tonos puros resulta el empleo del umbral relativo de audición. El punto de referencia ya no es la presión sonora absoluta, sino la subjetivamente audible a nivel del umbral de audición: decibelios.

La presión sonora es una magnitud directamente mensurable con el **sonómetro** y por ello la más utilizada.

Intensidad sonora: La energía sonora que atraviesa la unidad de superficie, perpendicularmente a la dirección de propagación en la unidad de tiempo.

Potencia sonora: Es la energía sonora que se propaga a través de un espacio definido, en la unidad de tiempo. Se mide en **watios**.

Banda de octava:

La unidad audiométrica escogida es la **octava**, que indica bien los aumentos de sensación de altura del oído humano. La octava está unida al Hz por una relación logarítmica. Se puede decir que la sensación de altura crece como el logaritmo (de base dos) de la frecuencia.

Ejemplo:	64	128	256	512	etc.
O sea:	2^6	2^7	2^8	2^9	etc.

En la práctica las octavas de la serie de los **ut** o **DO** se escogen como punto de investigación: el Do_1 (64 Hz); el Do_2 (128 Hz); el Do_3 (256 Hz) etc.

O más simplemente, la serie del 1000 que es como están calibrados los audiómetros actuales: 125, 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000 Hz.

2.2.- Magnitudes psico-fisiológicas

Siempre que en el aire se propaga una onda acústica, el oído humano es capaz de percibirla como sensación sonora. Para que esto ocurra la citada perturbación debe cumplir las siguientes condiciones:

- Sus frecuencias componentes deben estar comprendidas entre aproximadamente 20 y 20.000 Hz.
- Su intensidad debe estar comprendida entre 10^{-12} y $1 \text{ W}/\text{m}^2$ (0 y 120 dB).

Como se ha visto, una vibración acústica, se caracteriza por su forma de onda, frecuencia y amplitud. En términos subjetivos estos conceptos corresponden respectivamente, al timbre, tono o altura e intensidad del sonido o sonoridad.

El único término que hasta ahora no habíamos definido era el **timbre**. Se trata de un sonido o tono fundamental unido a sus armónicos. Este elemento, es el que nos permite diferenciar una misma nota dada por diferentes instrumentos musicales. Percibimos claramente la diferencia entre un Mi emitido por una flauta y el producido por un violín.

Magnitudes físicas

Presión o intensidad (amplitud)
Frecuencia
Armónicos (forma de onda)

Magnitudes psico - físicas

Intensidad sonora (sonoridad)
Tono o altura
Timbre

En general, estos dos tipos de magnitudes no tienen una relación biunívoca, sino que por ejemplo, la sonoridad depende fundamentalmente de la intensidad física del sonido, pero también de la frecuencia y forma de onda.

Las curvas que unen puntos de igual sensación sonora para cada estímulo, nivel de intensidad - frecuencia, en el caso de los tonos puros. Este conjunto de curvas se conoce con el nombre de **curvas isofónicas**.

El **fon**: por definición los fonos, son las intensidades subjetivamente iguales a los valores en dB en la frecuencia 1000. Tan sólo en esta frecuencia el fon es igual al dB. En los graves resulta netamente inferior.

Otra unidad utilizada es el **son**, que es la sensación de intensidad originada por un sonido de 1000 Hz. a una potencia de 40 dB por encima del umbral.

Redes de ponderación

Con objeto de simplificar la medida del sonido de forma que se tenga en cuenta la respuesta del oído humano, se introduce en los instrumentos de medida una ponderación frecuencial que ajusta la respuesta del aparato de medida a la de un oído humano. Así en el cuadro que se muestra a continuación veremos como en la escala utilizada más frecuentemente que es la denominada A, a cada banda de frecuencias se la da una ponderación (suma o resta de dB) según la nocividad que sobre el oído humano ejerce dicha banda de frecuencias. A los dB así medidos se les denomina dB (A).

Frecuencias (Hz)	Valor teórico (escala A)
31,5	- 39,4
63	- 26,2
125	- 16,2
250	- 8,7
500	- 3,3
1000	- 0
2000	+ 1,2
4000	+ 1,0
8000	- 1,1

Indices de ruido

El carácter esencialmente variable en el tiempo de la mayoría de los ruidos obliga a definir índices que permitan asignar un valor representativo de la respuesta humana a dicha variación temporal. El más utilizado es el **nivel continuo equivalente** (Leq), que se define como el nivel sonoro medido en dB (A), de un ruido continuo que a lo largo de un periodo de tiempo determinado tiene la misma energía que el ruido de nivel variable que se quiere evaluar, durante el mismo periodo de tiempo.

Tipos de ruido

El ruido es un sonido o un conjunto de sonidos que se producen en ausencia de toda armonía regular. Bajo el punto de vista físico se trataría de "una vibración acústica errática, intermitente o estadísticamente aleatoria".

Pialux ha propuesto una definición clínica: "sensación auditiva de tipo e intensidad variable pero de carácter desagradable, en relación con la actividad humana, pudiendo ocasionar reacciones nocivas a nivel del organismo y particularmente del aparato auditivo".

Atendiendo a su duración y cambio de nivel, los tipos más usuales de ruido son:

- **Ruido continuo:** Cuando su nivel varía en función del tiempo lentamente sobre pequeños márgenes.
- **Ruidos fluctuantes:** El nivel en función del tiempo, varía de forma aleatoria, sobre un margen más o menos grande.
- **Ruidos transitorios:** Su nivel comienza y termina dentro de un periodo de tiempo (p.ej. ruido de un sobre vuelo de avión).
- **Ruidos de impacto:** Su nivel varía bruscamente dentro de un periodo de tiempo muy corto (disparo, golpe de prensa etc.).

3. RUIDO EN AVIACIÓN

3.1.- Ruido de Motores y Ruido de Cabina

a).- Ruido de motores

En aviación, al pasar de los aviones propulsados por motores de hélice, a los propulsados por turborreactores, subió el nivel de ruido, particularmente en las proximidades de los aeropuertos bajo las rutas de aproximación y despegue.

La mayor fuente de ruido en un avión son los motores, pero hay también otras que no deben ser ignoradas. Es el caso del ruido aerodinámico (aun sin llegar al estampido sónico) y el ruido de los componentes de los múltiples sistemas funcionales. El principal, las Unidades de potencia auxiliar (APU), que afectan fundamentalmente a los trabajadores de la carga y descarga de las aeronaves.

El ruido de un motor de reacción que es el que se oye principalmente en tierra procede de dos zonas principales: la zona de escape, y la zona del compresor. El **ruido de escape** es el de mayor nivel y está producido por las fluctuaciones de presión de la corriente turbulenta de salida de gases a alta velocidad cuando choca con la atmósfera en calma. Se general altas frecuencias en las proximidades de la tobera de escape, y bajas frecuencias en el chorro ya alejado de dicha tobera. El **ruido del compresor**, se genera principalmente en los álaves del rotor y los del estator, es un ruido de alta frecuencia que se oye de forma muy acusada delante del motor y aunque este ruido aumenta con las revoluciones del compresor, en general

queda enmascarado por el mayor nivel de ruido del escape. No obstante el ruido del compresor predomina en regímenes que requieren poco empuje del motor, como ocurre en las operaciones de aproximación y aterrizaje.

b) - . Ruido en cabina

El ruido en cabina procede fundamentalmente del **ruido aerodinámico** y es el que se oye principalmente dentro del avión durante el vuelo de crucero. Se genera básicamente en la capa límite alrededor de la superficie del ala y del fuselaje del avión así como de la configuración del morro de la aeronave, por efecto de la viscosidad del aire.

En el interior de los aviones el criterio para la limitación de los niveles de ruido es el del nivel de interferencia de conversación, y es un valor que corresponde al valor medio aritmético de los niveles de presión sonora medidos en las tres bandas de octava de 500 - 1000 Hz; de 1000 - 2000 Hz y de 2000 - 4000 Hz, que son las fundamentales para la conversación humana.

Veamos las intensidades medidas en las cabinas de distintos modelos de aviones, así como las variaciones de intensidades en los distintos momentos de la operación aeronáutica. Lo ideal es que no se sobrepasen los 65 - 70 dB (A), sin embargo veremos que normalmente este parámetro es rebasado, sin llegar, salvo en cortos momentos, a los 80 dB, intensidad, que como marca la frontera no solo de una correcta comprensibilidad de la palabra sino de la nocividad en el órgano auditivo.

Avión	Parking	Despegue	Ascenso	Crucero	Descenso	Reversa
MD87	75dB	80dB	72dB	70dB	69dB	78dB
B757	74dB	75dB	74dB	74dB	73dB	74dB
A300	63dB	68dB	72dB	73dB	70dB	76dB
A320	69dB	74dB	74dB	73dB	72dB	78dB
B727	64dB	70dB	80dB	80dB	78dB	70dB
B747	64dB	74dB	72dB	74dB	76dB	78dB

Los datos obtenidos lo son en las mismas condiciones en cuanto a velocidades y potencias del avión.

Con emisiones de radio tipo instrucciones de control al mismo tiempo, el nivel de ruido se incrementa de 6 a 10 dB. Igualmente los niveles de ruido se incrementan cuanto mayor es la velocidad del avión.

3.2.- Influencia del Ruido en el órgano auditivo

Efectos auditivos

El aparato auditivo está calculado para soportar sin sufrimiento y por un tiempo adecuado estímulos vibratorios de características determinadas en cuanto a frecuencia e intensidad. Cuando se rebasan los límites tolerables aparecen a nivel de la cóclea las lesiones del llamado trauma sonoro. Trauma que en ocasiones se produce de forma aguda y lo más frecuentemente de forma prolongada.

Se considera que el ruido afectará al órgano auditivo cuando rebase intensidades de 80 db (A). (En determinadas legislaciones el nivel se sitúa en los 90 dB(A)). Durante periodos de 8 o más horas al día.

Las frecuencias agudas son más nocivas que las frecuencias graves.

Veremos a continuación las distintas fases por las que pasa el oído cuando es sometido al ruido :

(**Figuras 7-8**)

Adaptación auditiva - Se ponen en marcha los mecanismos protectores de la transmisión de los sonidos intensos sobre las células sensoriales auditivas:

a) El reflejo del oído medio atenúa de 10 a 20 dB los sonidos de más de 80 dB justo en la frecuencia de 4000 Hz. Este reflejo necesita 100 milisegundos para ponerse en funcionamiento, y no protege en el caso de ruidos de impacto.

b) Además, hay mecanismos centrales que activan el control aferente que disminuye la sensibilidad de las células sensoriales.

Fatiga auditiva - Es reversible y consiste en una elevación temporal del umbral de audición (ETS). El tiempo de recuperación es tanto mayor cuanto mayor es el nivel de sonido y su duración.

Muchas hipótesis intentan explicar esta fatiga: agotamiento metabólico e igualmente alteración del penacho ciliar de las células ciliadas internas, toxicidad por exceso de liberación de los neurotransmisores glutaminérgicos entre las células ciliadas internas y la protoneurona auditiva.

Dos parámetros permiten detectar la fatiga auditiva:

- a) El nivel máximo de déficit y la frecuencia donde se sitúa.
- b) El tiempo de recuperación

La mayor parte de las normas actuales hacen referencia a la ETS que es la medida del déficit inducido por una exposición dada, dos minutos después del fin de la estimulación.

Sordera - Cuando el nivel del sonido es muy elevado o su duración es muy prolongada, la fatiga auditiva ya no se recupera. Se produce una elevación permanente de los umbrales de audición (EPS). Se instala definitivamente el **trauma acústico**.

Los estudios realizados con el microscopio electrónico ponen de manifiesto las lesiones celulares con anomalías de contacto membrana tectorial - cilios de las células ciliadas externas (CCE). Los cilios se aglutinan, se retuercen e incluso desaparecen. La placa cuticular se hace más gruesa, los cuerpos celulares se hipertrofian y la célula puede llegar a desintegrarse. Cuando los ruidos son muy intensos, las lesiones también alcanzan los cilios de las células ciliadas internas (CCI).

Efecto de enmascaramiento. Se denomina en enmascaramiento el aumento del umbral de percepción o pérdida de la sonoridad de una señal como consecuencia de presentar simultáneamente en el oído un segundo estímulo. En general llamamos señal a la frecuencia que queremos oír y máscara o sonido enmascarante al sonido introducido con el objeto de modificar la percepción de la señal.

Si la señal y la máscara tienen frecuencias muy diferentes, el oído los percibe como tonos diferenciados, siendo la sonoridad total la suma de las sonoridades. En éste caso el nivel mínimo de intensidad necesario para percibir la señal no se ha modificado por la presencia de la máscara, por lo que decimos que no ha habido enmascaramiento.

Cuando las frecuencias de señal y máscara están muy próximas entre si, se produce una elevación del umbral liminar, o una pérdida de sonoridad, en el momento de introducir la máscara, diciéndose entonces que hay enmascaramiento.

Efectos extra - auditivos

Alteraciones del sueño

Efectos cardiovasculares

Aumento de la frecuencia respiratoria

Alteraciones del equilibrio hormonal (variaciones de concentración de catecolaminas).
Juegan un papel importante en la generación stress.

Provoca disminución de la atención y concentración mental, así como alteraciones del comportamiento, incrementándose la agresividad especialmente en personas predispuestas.

Signos clínicos y fases audiométricas

Las alteraciones audiométricas muestran una **sordera de tipo perceptivo coclear**. Aparece por esto el fenómeno denominado "**reclutamiento**", que no es patognomónico de esta afección, pero sí muy frecuente.

Reclutamiento o recruitmen : Es el refuerzo desproporcionado de la sensación auditiva al aumentar la intensidad. Son oídos hipoacúsicos para intensidades normales, pero que oyen igual o mejor que el sano a intensidades por encima del umbral. Tienen así mismo un umbral mínimo muy preciso y un umbral diferencial más pequeño.

Es un fenómeno que no está muy claro, pero que debe estar relacionado con la distinta función de las CCI y CCE, y por lo tanto con la codificación de la sensación subjetiva de intensidad.

Fase I o fase de sordera latente - Pueden aparecer acúfenos de tonalidad aguda, intermitentes, rara vez permanentes. Las molestias auditivas se traducen en disturbios de la audición en ambiente ruidoso, y a veces en fenómenos de distorsión cuando se escucha música.

El audiograma muestra un escotoma en la frecuencia de 4000 Hz (en numerosas ocasiones es más precoz en la frecuencia de los 3000 Hz) que rebasan los 30 dB.

Fase II o fase de sordera debutante - Se agravan los síntomas funcionales. El escotoma perceptivo se extiende a la frecuencia de 2000 Hz. Se producen claras alteraciones de la inteligibilidad en ambiente ruidoso

Fase III o fase de sordera confirmada - La pérdida auditiva se amplía a las frecuencias de 1000 y 8000 Hz, y rebasando los 30 dB de pérdida. Los acúfenos son frecuentes. La inteligibilidad de la palabra se hace evidente con los consiguientes problemas en la percepción de la palabra. "Se oye pero no se entiende".

Fase IV o fase de sordera grave - Todas las frecuencias, incluidos los 500 Hz, se deterioran, con lo que la comprensión de la palabra es difícil; el disturbio social es muy importante.

4.- COMUNICACIÓN EN CABINA

Comunicación es la transmisión de un mensaje o de una información desde un emisor a un receptor.

Existe una comunicación verbal y no - verbal, evidentemente en éste apartado vamos a considerar la comunicación verbal.

Cuando dos o más personas actúan dentro de un medio limitado como es la cabina de mando, todas las comunicaciones, tanto verbales como no - verbales tienen unos efectos recíprocos importantes entre los tripulantes; además de que factores ajenos propiamente al sistema humano, como es la máquina y el entorno pueden afectar decisivamente a aquellas.

Las **condiciones físicas de la cabina** como son el nivel de ruido, vibraciones, baja humedad ambiental, cambios de presión que condicionan la fisiología de la trompa de Eustaquio, son elementos que hay que tener muy en cuenta.

Es tan importante la comunicación entre los miembros de la tripulación, que fallos en la misma son responsables en muchos casos, del 65 % de los accidentes en los que el responsable de los mismos son errores humanos.

Los sentidos, especialmente la vista y oído, son aquellos por los que recibimos mayor cantidad de información. Si por cualquier circunstancia dichos sentidos se ven perturbados, pueden ser muy importantes las distorsiones de la realidad que tratamos de percibir.

Ruido y comunicación

Puede obtenerse un índice del efecto de interferencia del ruido, conocido como nivel de interferencia de la palabra (**NIP**), tomando la media aritmética de los niveles de presión sonora en las tres bandas de octavas: 600/1200 Hz; 1200/2400 Hz; y 2400/4800 Hz.

A partir de este índice puede determinarse la posibilidad de comunicarse mediante la palabra.

Nivel de interferencia de la palabra (dB)	Distancia para fiabilidad (m)	
	Voz normal	Gritando
55	1	7,5
71	0,15	1,2
83	-	0,3

Así mismo hay que tener en cuenta que disponemos de un mecanismo reflejo, por el cual a partir de los 55 dB (A) de ruido ambiental, vamos elevando el nivel de la voz a medida que lo hace el nivel de ruido. Si la conversación "no es vital" (Fig. 8), aumentamos al nivel de 3 dB por cada 10 dB de aumento del ruido, si consideramos que la comprensión ha de ser máxima (Fig. 9), aumentamos a razón de 5 dB por cada 10 dB de aumento del ruido, llegando a gritar con ruidos ambientales de 82 dB(A), si el que escucha está a más de metro y medio.

(Figuras 9 y 10)

Como en muchas ocasiones el vehículo de la palabra no es solamente directo sino a través de telefonía o altavoces se han elaborado curvas de criterio de ruido (**CR**), partiendo de las cuales puede determinarse lo adecuado de un entorno.

En el caso de que la intercomunicación sea, pues, por teléfono o por radio, la capacidad del ruido de producir interferencia va a depender fundamentalmente de su nivel y del espectro de frecuencia. Así el nivel acústico y la ganancia del amplificador del teléfono van a determinar cuan potente tendrá que ser la voz del que habla para que el nivel sonoro en el receptor sea suficiente, mientras que el espectro de frecuencia influirá en la inteligibilidad de dicho mensaje.

La capacidad de interferencia del ruido sobre este sistema de comunicación se determina mediante el cálculo del denominado **SIL** (Speech Interference Level). Este nivel nos indicará la intensidad que debe tener la señal (mensaje) en el oído receptor para que la inteligibilidad sea correcta, en ese medio y con un nivel de ruido determinado.

Cuando un piloto rebasa los límites de audición fijados en las normas médicas, antes de proceder a la retirada de su licencia de vuelo, se deben realizar pruebas de comprensión de la palabra en las condiciones reales existentes en la cabina de mando.

Existen factores, como es el caso del fenómeno de "reclutamiento" en las hipoacusias producidas por el ruido, que provocan, como ya explicamos, que por encima de determinado nivel de sonido, el paciente recupera su audición normal, cosa que puede ocurrir a determinados niveles de ruido ambiental en dicha cabina.

5.- REQUISITOS AUDITIVOS (NORMAS JAR - FCL)

Clase 2 - (piloto privado)

- a) La audición deberá comprobarse en todos los reconocimientos. El solicitante será capaz de comprender correctamente la conversación ordinaria estando a una distancia de 2 metros y de espaldas al examinador.
- b) Si ha de añadirse a la(s) licencia(s) aplicable(s) una habilitación de vuelo instrumental, se requiere que en el primer reconocimiento para la habilitación se realice una prueba auditiva con una audiometría tonal pura que deberá repetirse cada cinco años hasta cumplir 40 años y cada dos años posteriormente.

1 - No deberá haber pérdida de audición en ambos oídos, cuando se comprueban por separado de más de 20 dB (H) en cualquiera de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz, o de más de 30 dB(H) a 3000 Hz.

2 - El solicitante o titular de una habilitación de vuelo instrumental cuya pérdida de audición esté dentro de 5 dB(H) de los límites establecidos en el anterior, en dos o más de las frecuencias comprobadas, deberá pasar una audiometría tonal pura anualmente como mínimo.

3 - El solicitante con hipoacusia puede ser evaluado como apto, en los reconocimientos de revalidación o renovación, si demuestra una habilidad auditiva satisfactoria a una prueba de discriminación verbal de acuerdo con el párrafo 2 del Apéndice 16 a la subparte C.

Clase 1 - (Piloto Comercial - PLTA - Mecánico de a bordo)

- a) La audición deberá comprobarse en todos los reconocimientos. El solicitante entenderá correctamente con cada oído la conversación cuando se compruebe estando a una distancia de 2 metros y de espaldas al médico examinador.
- b) La audición será comprobada con audiometría tonal en el reconocimiento inicial y en los posteriores de revalidación o renovación cada cinco años hasta que cumpla 40 años y cada dos años a partir de entonces.
- c) En el reconocimiento inicial para un certificado médico de Clase 1, no deberá haber pérdida de audición en ambos oídos, comprobándolos por separado, de más de 20 dB (HL) en cualquiera de las frecuencia 500, 1000 y 2000 Hz, o de más de 35 dB (HL) a 3000 Hz. El solicitante cuya pérdida de audición esté dentro de 5 dB (HL) de estos límites en dos o más de estas frecuencias anteriores deberá pasar anualmente, por lo menos, una audiometría tonal.
- d) En los reconocimientos de revalidación o renovación, no deberá haber pérdida de audición en ambos oídos, comprobándolos por separado, de más de 35 dB(HL) en cualquiera de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz, o de más de 50 dB(HL) a 3000 Hz. El solicitante cuya pérdida de audición esté dentro de 5 dB(HL) de estos límites en dos o más de estas frecuencias comprobadas deberá pasar anualmente, por lo menos, una audiometría tonal.
- e) En la revalidación o renovación, los solicitantes con hipoacusia podrán ser calificados como aptos por la AMS si en una prueba de discriminación verbal se demuestra una habilidad auditiva satisfactoria (ver párrafo 2 del Apéndice 16 a la subparte B).

BIBLIOGRAFÍA

- 1 - Physiologie de l'audition - **M. Erminy** y otros. EMQ. ORL. 20-030-A-10 (1995)
- 2 - Otorrinolaringología. **Walter Becker - Naumann - Pfaltz** (1986)
- 3 - El ruido como agente contaminante en la industria. **Varios autores**. Congreso Mutua Accidentes de Zaragoza (1987)
- 4 - Surdit  professionnelle. **JF Gouteyron. JB Nottet. JP Diard**. EMQ. ORL. 20-185-F-10 (1995)