

X Jornadas de historia y filosofía de la Ingeniería, la Ciencia y la Tecnología

Sobre la evolución del mecanismo de la audición*

Agradezco al Comité de Enseñanza del Instituto de la Ingeniería de España y a la Universidad Politécnica de Madrid, la invitación a participar en el X aniversario de estas Jornadas, y en particular aceptarme un tema sobre el sentido de la Audición, que en principio puede parecer un tanto alejado de la ingeniería. Para centrarle en su aspecto ingenieril, que lo tiene y mucho, he señalado en el título se trata del Mecanismo de la Audición, que si bien a veces es interpretado como el proceso auditivo en si, en nuestro caso hace especial referencia al aspecto mecánico envuelto en la captación y conducción de energía acústica del medio, para su interpretación por el sentido de la audición.

El factor histórico a que hace mención las Jornadas, queda reflejado, en parte, en el proceso evolutivo del tal Mecanismo en los seres vivos, hasta llegar al que disponen los mamíferos y en particular el ser humano.

Empezaremos pues por analizar someramente el sistema auditivo del hombre actual, para extraer la parte mecánica del órgano periférico, el oído, y analizar a continuación, a la luz de la evolución de las especies, el cómo y la línea directriz seguida, que considero y se demuestra conlleva un trasfondo ingenieril.

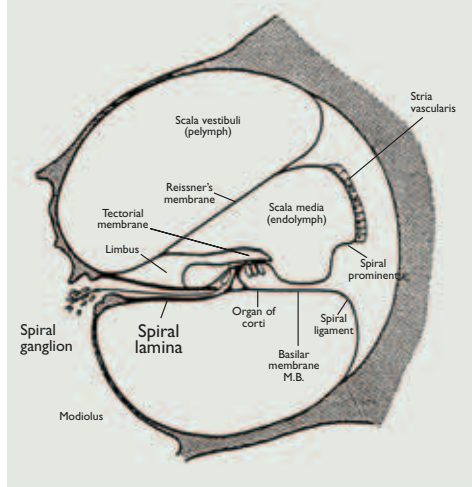


Andrés Lara Sáenz

Dr. Ing. ICAI, Master of Electrical Engineering, Master of Science, lic. C. Información Prof. Investigación. Ex Director Centro Investigación Físicas L.Torres Quevedo. Fundador y Director Emérito, Instituto de Acústica CSIC. Presidente de Honor Soc. Española de Acústica.

(*) Conferencia pronunciada en el Instituto de la Ingeniería de España, Junio 2004

Figura 1. Estructura del Conducto Coclear, Órgano de Corti



El sistema auditivo del hombre actual

El proceso auditivo, como todos saben, envuelve un complejo sistema, por el que los seres vivos y en particular el ser humano, detecta y percibe "sonidos". Pero en realidad lo que sabemos es poco y reciente, si entendemos por saber el conocer con rigor científico todo el proceso.

Hasta bien entrado el siglo XIX no hemos tenido un verdadero conocimiento de la anatomía del sistema. Sabíamos que, como en el caso de otros sentidos, disponemos de un órgano periférico, el oído, que en su parte externa capta y canaliza las ondas sonoras transmitidas por el aire, las transforma en vibraciones mecánicas a través del Oído medio, y las convierte y codifica en señales neuronales en el oído interno, señales que son enviadas por el nervio acústico al cerebro, donde excitan la sensación sonora, que denominamos Sonido. La interacción de esta sensación con otras funciones mentales y motoras, como memoria, emoción, temor etc, da lugar a la interpretación de la sensación, lo que constituye la percepción de la imagen sonora, a nivel psíquico. (En determinados casos, como sonidos intempestivos e intensos, la sensación va acompañada de reacciones motoras reflejas, gestos faciales, parpadeo, encogimiento de hombros, movimientos de cabeza, etc.).

Los grandes fisiólogos a partir del siglo XIX, Hemholtz, Corti, Reisner, Claudius, Hensen, etc., cuyos nombres han quedado inmortalizados en la terminología especializada, nos dieron luz sobre la anatomía y fisiología de la audición. En cuanto a los avances psico-acústicos recientes, destacan las contribuciones de Fletcher (Sonoridad, En-

mascamiento, Bell Laboratories, N.J.) E. Zwicker (Sicoacustica, univ. Tec. Munich) y Von Bekesy (Características y Dinámica del Oído medio y la Membrana Basilar), este último, premio Nobel de medicina 1962.

En la figura de la introducción, se distinguen las tres partes del oído, la disposición de la cadena de huesecillos del oído medio, la cavidad del oído medio, la trompa de Eustaquio que la comunica con la epifaringe, la ventana oval, que da entrada al Caracol, donde se aloja el oído interno.

El caracol forma parte de un conjunto óseo que contiene a su vez el órgano periférico del equilibrio o laberinto, principalmente constituido por tres canales semicirculares trirectangulares que comparten el mismo líquido linfático con el caracol, y en los que flotan unas concreciones calcáreas u otolitos. Por efecto inercial los otolitos rozan con las paredes interiores excitando terminales nerviosos que informan al cerebro de la posición y dirección de los movimientos. En la imagen de la introducción se destaca la estructura ósea común, con tres protuberancias (ampulla, utrículo y sáculo), que se corresponden con la posición de los mazos de fibras nerviosas que surgen del laberinto. Este órgano aparecerá ligado a lo largo de la evolución con el órgano auditivo, incluso precediéndole por su importancia en la vida submarina.

A Corti le debemos principalmente el análisis anatómo-fisiológico del oído interno. La disposición de los terminales ciliados de las células del nervio auditivo y su distribución a lo largo de la Membrana Basilar, divisoria que recorre longitudinalmente el Caracol, Figura 1. Es en esta estructura celular u órgano de Corti, donde tiene lugar la transducción de la energía mecánica que transportan las ondas sonoras, en potenciales eléctricos, que propagados a través de las conexiones neuronales que forman el nervio auditivo, llegan finalmente a las áreas de la corteza cerebral donde excitan las sensaciones sonoras, en ambos hemisferios, Figura 2. Las fibras del nervio auditivo, junto con las del equilibrio, constituyen el, llamado anatómicamente, octavo par craneal.

Von Bekesy ("Experiments in hearing", 1960) es el investigador que más ha aclarado la estructura y la dinámica de la Membrana Basilar. Con técnicas experimentales originales, sobre huesos temporales de cadáveres, y con modelos mecánicos, primero en Budapest (Royal Hungarian Institute for Research in Telegraphy and Telephony, 1924-46), después en Estocolmo (1947), y finalmente, en el

Figura 2. Esquema simplificado del proceso estímulo acústico-percepción sonora

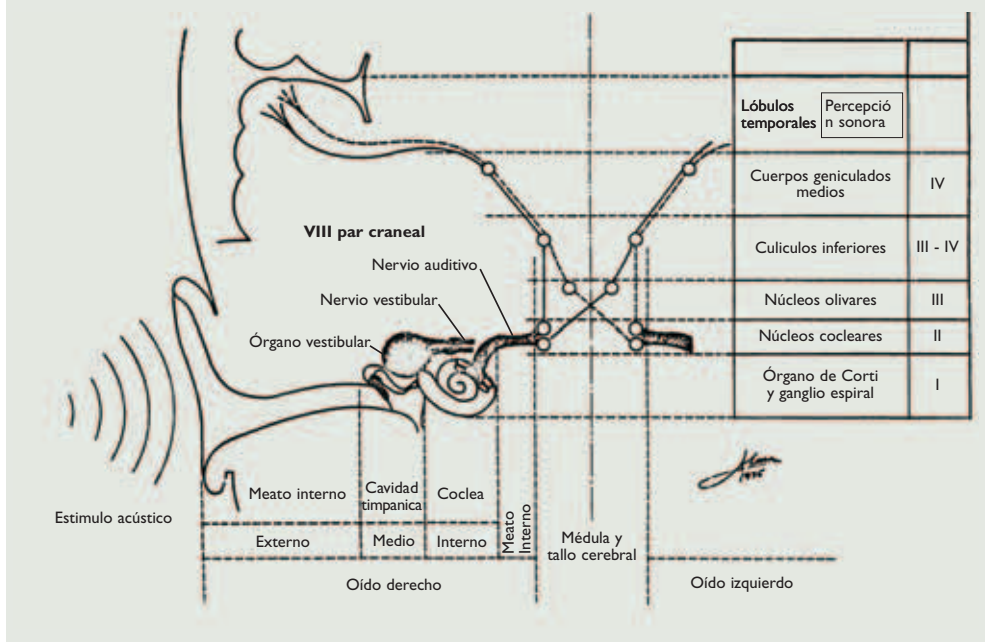
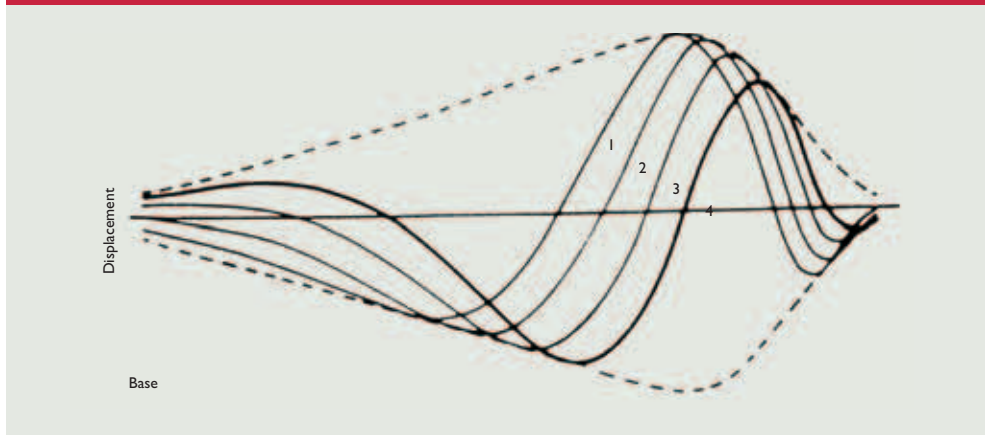


Figura 3. Avance de las ondas progresivas en la M.B.

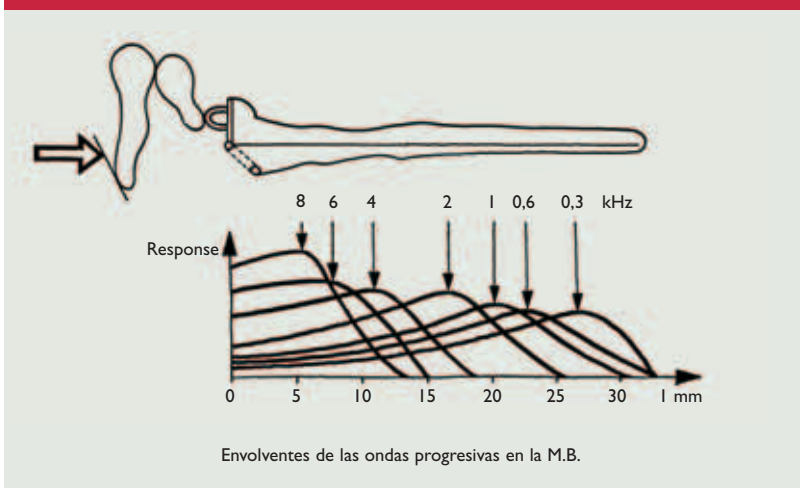


laboratorio de Psico-acústica de la Universidad de Harvard, explicó la respuesta hidrodinámica del oído interno a la excitación vibracional a través de la ventana oval, describiendo las ondas progresivas a lo largo de la divisoria, que hacen ondular la M.B. de forma similar a una bandera flameante, Figura 3. Los experimentos de Bekesy confirmaron y aclararon la teoría resonante de Helmholtz, ("The Sensation of Tone", 1860) de distribución tonotópica de los terminales del nervio auditivo, a lo largo de la Membrana Basilar, formando a modo de un teclado de "notas" que resuenan a distintas frecuencias, desde las altas en las proximidades de la ventana oval, hasta las bajas conforme se aproxima el ápice. El oído interno actúa como un analizador de Fourier que

responde a las componentes tonales de las señales sonoras. Los desplazamientos verticales del órgano de Corti, establecen rozamiento con la Membrana Tectoria, protuberancia gelatinosa que se apoya de forma mecánicamente independiente sobre los terminales ciliosos del órgano de Corti, generando impulsos eléctricos neuronales que codificados son transmitidos por el nervio auditivo. La Figura 4 muestra esquemáticamente la distribución de frecuencias a lo largo de la M.B. correspondiente a los máximos de las envolventes de las ondas progresivas.

Dejamos aquí esbozada la transducción mecano-eléctrica que se opera en el oído interno y vamos a nuestro tema, Cómo ha evolucionado el órgano periférico de la audi-

Figura 4. Caracol desenrollado.



Envolturas de las ondas progresivas en la M.B.

ción, en su misión de transmitir al oído interno la energía acústica que transportan las ondas sonoras.

La audición en el medio marino

La Tierra es viejísima, dataciones recientes se mueven en dígitos de miles de millones de años. Teniendo en cuenta que la vida media del hombre actual es del mismo orden en segundos, si reducimos a un año la existencia de la tierra, ¡la vida de un hombre sería de un solo segundo! La vida en la Tierra se data del orden de mil millones de años, y la aparición de los homínidos, nuestros ancestros, en unos 6 millones de años.

Se tratan de escalas de tiempo enormes, y aparte de las especies que en sus distintas etapas han perdurado hasta la actualidad, solo tenemos vestigios de seres anteriores a través de fósiles. La Paleontología colabora con la Geología, y lo mismo puede decirse de técnicas debidas a otras ciencias como la Biología, Bioquímica, Biología Molecular etc. que han venido a ayudar en el estudio de la Tierra y de la vida en la misma, tanto en profundidad como en extensión.

Partiendo de la iniciación de la vida hace aproximadamente mil millones de años, con la síntesis de aminoácidos y sustancias orgánicas (Miller 1953), los primeros seres pluricelulares invertebrados marinos, como por ejemplo las actuales medusas, disponen de un tejido nervioso sin cerebro ni ganglios que le permite reacciones reflejas necesarias para su supervivencia. Tienen un tejido nervioso de fibras anulares, dispuestas en el domo, en donde se distribuyen diametralmente varias vejigas, en las que flotan concreciones calcáreas, a modo de otolitos, que por efecto inercial si-

túan el centro de gravedad e informan sobre la posición y movimientos propios.

La lamprea uno de los peces vertebrados mas simples, dispone ya de dos canales semicirculares del órgano del equilibrio.

Los peces no tienen oído medio ni externo. El oído interno está situado detrás de los ojos. Tiene dos cavidades óseas el sáculo y la lagena, revestidas de tejido nervioso y donde se detectan frecuencias de hasta 7000 Hz. Los peces con espina dorsal, los teleostos, como por ejemplo la Carpa actual, disponen además de unas líneas laterales, con terminales nerviosos apropiadas para percibir perturbaciones elásticas de bajas frecuencias. El órgano de equilibrio está muy desarrollado y cuenta con los tres canales semicirculares. Existe homología entre los arcos branquiales de los peces amandibulados con los huesos que sirven de articulación de las mandíbulas presentes en los vertebrados.

A nivel cerebral, se distinguen en los peces, el cerebro anterior; donde se genera la sensación del olfato, el cerebro medio, donde se localiza la visión y el posterior; correspondiente al equilibrio y audición.

La supervivencia en el medio marino, ha contado fundamentalmente con el "sentido" auditivo y el de equilibrio en un medio en el que las ondas electromagnéticas son muy atenuadas y en donde la iluminación y por tanto la visión está muy limitada, sobre todo en profundidad.

Las ondas elásticas, generadas por la actividad en el propio medio, transmiten buena parte de su energía a las distintas especies, cuya constitución y órganos sensibles tienen una densidad del orden de la del líquido en que viven.

El gran problema se plantea cuando la vida pasa a la tierra firme, a la atmósfera terrestre, con la aparición de los anfibios y los reptiles. A ellos les toca resolver una serie de problemas fundamentales, como son por un lado la respiración, y la visión, que ahora juega un papel preponderante por los grandes espacios iluminados y su alto alcance. El ojo ha de sufrir alteraciones sobre todo en la parte óptica en un medio con un poder refringente muy distinto.

Han de desarrollar miembros de locomoción y sobre todo y en materia de nuestro interés han de ser capaces de captar la energía acústica de las ondas elásticas, que ahora se propagan en un medio mucho menos denso con una impedancia muy distinta de la propia de recepción. (Los actuales anfibios soportan las amenazas que le ciernen sobre las aguas dulces).

A nivel cerebral en los reptiles las funciones sensitivas predominante son la de la visión y la audición.

Centrándonos en nuestro problema, en estas especies se inicia un proceso evolutivo de generación del oído externo y medio, de forma que adapten la alta impedancia del líquido del oído interno a la baja impedancia del aire.

Este proceso adaptativo es fundamental, para ello baste recordar lo que en ingeniería significa la impedancia y el papel que esta juega en las transmisiones de energía entre sistemas.

Transmisión de energía: acoplamiento de impedancias

Esta parte que sigue es una concesión a los alumnos de la Universidad Politécnica de Madrid, que siguen estas Jornadas, como asignatura electiva, con sus créditos correspondientes.

El concepto de impedancia, propuesto por el Físico inglés Heaviside en 1886 para definir la "resistencia" que un circuito eléctrico formado por Resistencia R y Autoinducción L , presenta a una tensión eléctrica alterna sinusoidal $V(\omega)$. Posteriormente fué ampliado a un circuito con capacidad C , de acuerdo con la conocida expresión, para conexión en serie,

$$Z(\omega) = R + j \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \Omega_e$$

La impedancia condiciona la respuesta del circuito, la corriente eléctrica, como extensión de la Ley de Ohm.

Generalizando, en cualquier sistema análogo, bien sea eléctrico, mecánico o acústico, etc. las respectivas impedancias miden las respuestas a las correspondientes excitaciones. A mayor impedancia menor respuesta y viceversa.

En las analogías electroacústicas, y salvo casos excepcionales como los resonadores de Helmholtz en bajas y medias frecuencias, los sistemas a considerar son continuos, en los que la respuesta se propaga en forma de "onda". La presión acústica p y la velocidad de vibración u , con una propagación en medios elásticos de constantes ρB , son análogas a la tensión V , y corriente eléctrica I en líneas eléctricas uniformes con constantes L y C , por unidad de longitud, y a los vectores E H del campo electromagnético, propagándose en el espacio de constantes $\mu\epsilon$.

Las variables de campo acústico, eléctrico o electromagnético, son la excitación y la

respuesta, su producto la potencia transmitida, su cociente la impedancia de onda, y la inversa de la raíz del producto, la velocidad de propagación:

En la onda acústica

$$W = p u \quad (\text{N/m}^2 \cdot \text{m/s} = \text{w/m}^2)$$

y para ondas planas,

$$Z_o = p/u = \sqrt{\frac{\rho}{B}} = \rho c \quad \Omega_A \quad (\text{N} \cdot \text{s/m}^3) \text{ Rayls}$$

en que ρ ($\text{kg/m}^3 = \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)

es la densidad del medio,

$$B = \frac{dV/V}{P} \quad (\text{m}^2/\text{N})$$

el módulo de elasticidad de volumen y

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho B}} \quad (\text{m/s})$$

la velocidad de propagación de ondas compresionales. En el aire $\rho = 1,21$ y

$$B = \frac{1}{\gamma P_o} = \frac{1}{1,4 \times 10^5}$$

resultando $c \cong 340 \text{m/s}$.

El producto ρc , función de las características mecánicas (ρB) del medio, constituye su impedancia característica, y condiciona la respuesta del medio a la excitación.

En el aire esta impedancia vale

$$Z_o = 1,21 \cdot 340 = 410 \text{ Rayls},$$

en que L y C son la inductancia y capacitancia por unidad de longitud

$$L \left[\frac{H}{m} = \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right] \text{ y } C \left[\frac{F}{m} = \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \right]$$

y en el agua

$$Z_o = 1000 \cdot 1500 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Rayls}.$$

Como vemos las impedancias del aire y del agua son muy distintas en magnitud, una relación

$$r = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{410} \cong 4000$$

Esta es prácticamente la relación entre la impedancia del aire y la que presenta el oído interno.

La impedancia característica en líneas eléctricas (sin pérdidas) es análogamente

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \Omega_e$$

y la velocidad de propagación

$$c = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ m/s}$$

En la propagación de ondas electromagnéticas transversales (TEM)

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \Omega_e \text{ y } c = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}} \text{ m/s}$$

donde μ es la permeabilidad y ϵ la permitividad del medio.

En el aire

$$\mu \cong \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right] \text{ y } \epsilon \cong \epsilon_o = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[\frac{\text{F}}{\text{m}} \right]$$

resultando

$$z_o = 120 \pi \Omega_e \text{ y } c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Siguiendo con nuestro tema ingenieril, sabemos en electrotecnia, que un generador entrega a su carga la máxima potencia cuando la impedancia de la carga es igual a la del generador:

Para calcular la transmisión de energía acústica entre dos medios, en función del desacople r ; hacemos uso del Teorema de Thevenin, descrito en la teoría de redes eléctricas y aplicable por analogía al campo de la acústica.

El teorema establece que todo circuito activo lineal, puede sustituirse por un dipolo, formado por la tensión en vacío, en serie con una impedancia igual a la propia del circuito.

En el caso de ondas acústicas a través de toda superficie del espacio la onda transporta una energía

$$W = p \cdot u = p^2/Z_o$$

El dipolo análogo equivalente, tendrá una presión acústica en vacío, igual al doble de la

de onda, ya que por ser la presión un escalar, y la carga acústica correspondiente a la situación de vacío, una superficie totalmente rígida, la presión incidente y la reflejada son iguales y se suman sobre la superficie. El dipolo equivalente se completa con la impedancia de onda $p c$ que coincide con la característica del medio, Z_o .

El circuito acústico equivalente es pues el de la Figura 5, en que Z_c representa la carga del oído interno.

Del propio circuito se deduce directamente la potencia W_2 entregada a la carga

$$W_2 = p_c \cdot u_c = Z_c u_c^2 = Z_c \left(\frac{2p}{Z_o + Z_c} \right)^2 = \frac{4p^2 Z_c}{(Z_o + Z_c)^2}$$

y el rendimiento de la transmisión, dividiendo por la potencia propagada por la onda

$$W_1 = \frac{p^2}{Z_o}$$

resulta, en función de $r = \frac{Z_o}{Z_c}$

$$\alpha_T = W_2/W_1 = \frac{4r}{(1+r)^2}$$

expresión recíproca, válida tanto para r como para $1/r$; que da el coeficiente de transmisión entre dos medios en función de su relación de impedancias, independientemente del sentido de la transmisión y cuyo máximo es para $r=1$ (acoplamiento perfecto).

En nuestro caso con $r \cong 4000$, la expresión se simplifica

$$\alpha_T = \frac{4}{r} = \frac{4}{4000} = 0,1\%$$

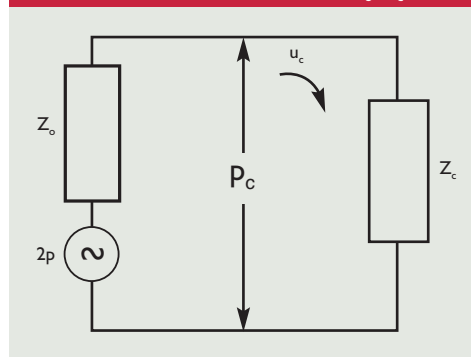
Esta bajísima transmisión, que supone una atenuación de $10 \log 1000 = 30 \text{ dB}$, del orden de la de un tabique divisorio en viviendas, nos da idea del problema de los anfibios en cuanto a adaptar su oído a la atmósfera terrestre.

Aparición del oído medio

¿Cómo enfrentan los anfibios este y los otros muchos problemas apuntados? Pues a base de metamorfosis y mutaciones en un largo proceso evolutivo de adaptación al medio, que en unos casos fracasa, en otros da lugar a los reptiles y algunos de ellos vuelven a la vida marina como en el caso de los delfines y ballenas, que presentan oídos externos atrofiados.

Ya en los peces vertebrados, el hueso que sirve de soporte de la mandíbula con la caja craneana es homólogo del estribo

Figura 5. Dipolo equivalente de transmisión acústica entre dos medios (Z_o, Z_c)



de los primeros vertebrados terrestres. Observamos aquí una primera correspondencia entre huesos mandibulares y la formación del oído medio. Los anfibios en estado larvario respiran con branquias, cuyos arcos servirán de base de muchas de las adaptaciones. Es de notar la increíble relación entre los arcos branquiales y las posteriores mandíbulas de los antecesores de los reptiles, con lo que serán posteriormente los 3 huesecillos de los mamíferos y en particular del Hombre.

Los reptiles suceden a los anfibios, algunos de cuyos descendientes como los Dinosaurios desaparecen con las convulsiones geológicas.

La mandíbula de los reptiles consta de varias piezas. Una rama carnívora de los reptiles, da lugar a los mamíferos. En el paso a los mamíferos ya sólo existe la mandíbula inferior, los restantes huesos de la mandíbula superior evolucionan convirtiéndose en los huesos del oído medio de los mamíferos.

El lagarto del desierto representa un estadio intermedio del desarrollo del oído medio, en el que aparece, Figura 6 (Weber), la membrana timpánica y un hueso alargado en forma de columna, la columela, que transmite directamente las vibraciones a la ventana oval.

Cuando desaparece la mandíbula superior la articulación se convierte en estribo. El hueso cuadrado de la mandíbula superior en yunque, y el articular de la mandíbula inferior en el martillo.

Aparecen así los tres huesecillos del oído medio, que se conservaran a lo largo de las distintas ramas en las que evolucionarán los mamíferos, tanto aéreas, aves, como terrestres, llegando a los actuales descendientes de los simios y de los homínidos, que alumbran al hombre en sus distintas etapas, Hábíl, Erecto, Sapiens...

En cuanto al cerebro, en los mamíferos se desarrolla la corteza cerebral, con circunvalaciones relacionadas con la memoria y el aprendizaje, y el cerebro posterior da lugar al cerebelo que coordina la complejidad creciente de los movimientos.

La cerebralización (Teilhard de Chardín), en las distintas etapas del hombre, desarrolla la capacidad de pensamiento y transmisión de ideas, con la culminación del habla, necesariamente ligada a la audición, que diferencia al ser humano de todo el resto de los seres vivos.

Aquí sería oportuno traer a colación la frase atribuida al Cardenal Mendoza, "Traerme un mono que hable y lo bautizo".

Figura 6. Oído medio del lagarto del desierto

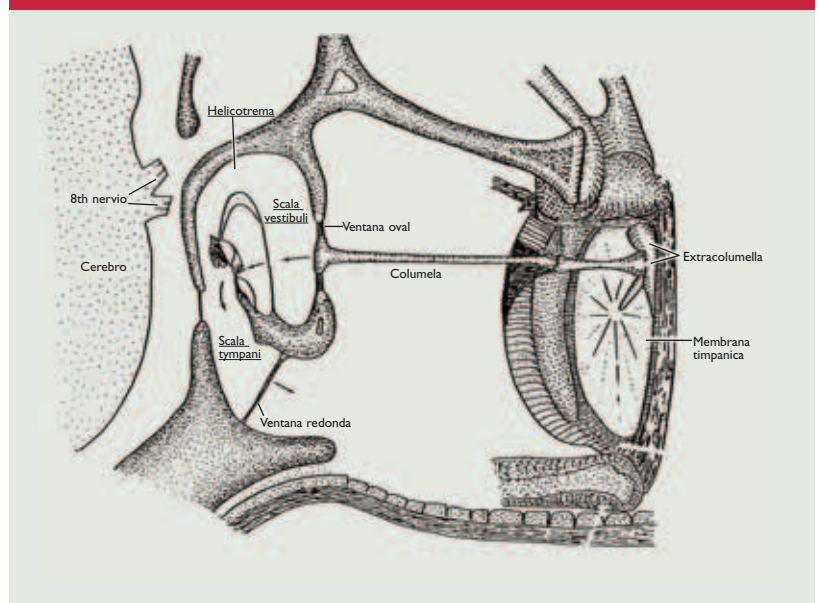
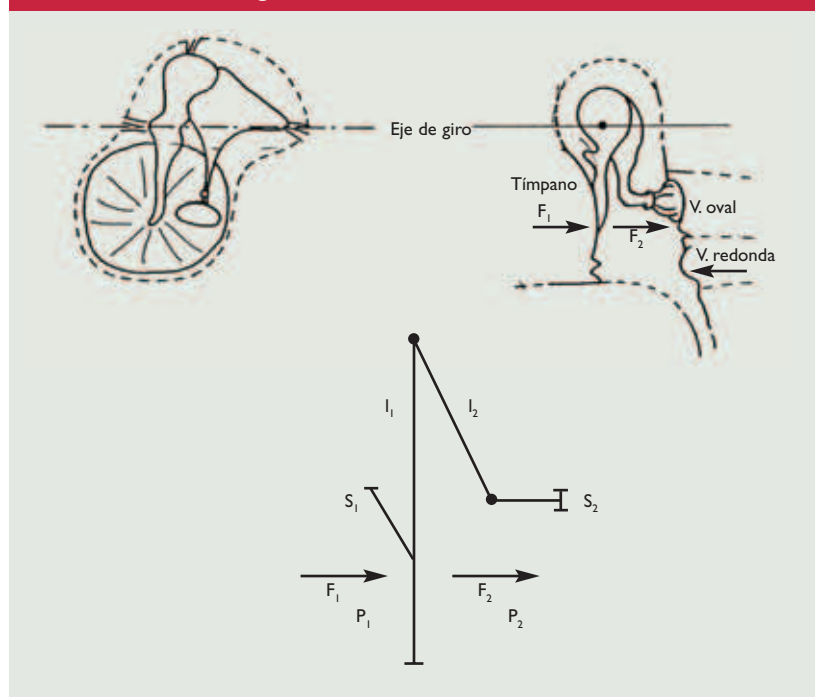


Figura 7. Mecánica del oído medio

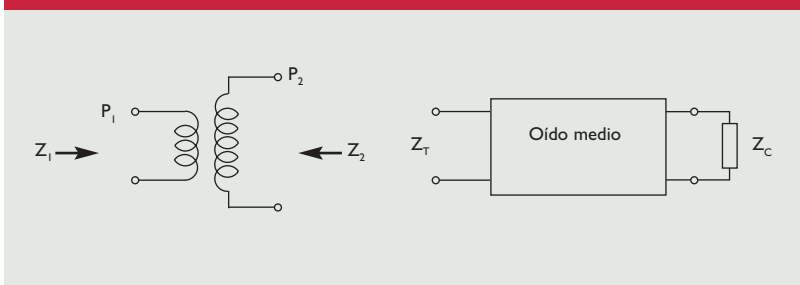


El oído medio, transmisor eficaz de energía

Constituido ya el oído medio en los mamíferos, procede analizar cuanto se ha ganado en el proceso de adaptación de impedancias con su aparición. En las Figura 7, presentamos el esquema del oído medio actual y el esquema mecánico correspondiente.

La cadena de huesecillos, forman una palanca de primer género, que suponen una amplificación de fuerzas $F_2 / F_1 = l_1 / l_2 = 1,3$

Figura 8. El oído medio, transformador de impedancias



lo cual unido a la ganancia de presión por la mayor superficie, útil, de la membrana timpánica respecto a la ventana oval, $S_1 / S_2 = 17$, da un aumento de presión acústica entre ambas membranas.

$$\frac{F_2/S_2}{F_1/S_1} = p_2/p_1 = 1,3 \cdot 17 = 22$$

Esta ganancia de presión, si bien no supone ningún aumento de energía entre ambas membranas, ¡faltaba mas! (¡algunos libros de medicina hablan de ganancia de energía!), si supone una reducción de la impedancia de carga, ventana oval (secundario), vista desde el tímpano (primario), considerando la cadena oscilar junto con las membranas timpánicas y oval, como un transformador de adaptación de impedancias. Figura 8, con una relación de transformación de impedancias de aproximadamente 500.

En efecto igualando (teóricamente sin pérdidas) las energías en el primario y secundario, se obtiene

$$W_1 = \frac{P_1}{Z_1} = W_2 = \frac{P_2}{Z_2}$$

$$Z_1 = \frac{Z_2}{(p_2/p_1)^2} = \frac{Z_2}{22^2} = \frac{Z_2}{500}$$

La Figura 8 incluye el esquema que representa el cuadripolo que constituye el oído medio, como transformador de impedancias, que hace aparecer la impedancia que presenta el tímpano, como 500 veces inferior a la del oído interno.

$$Z_T = \frac{1,5 \cdot 10^6}{500} = 3000 \Omega_A$$

Con esta reducción el desacoplo final de impedancias entre la que presenta el tímpano Z_T y la propia de la onda en el aire es,

$$r = \frac{3000}{410} \approx 7,3$$

Para este desacoplo, el coeficiente de transmisión de energía es ahora

$$\alpha_T = \frac{4 \cdot r}{(1+r)^2} = \frac{4 \cdot 7,3}{(1+7,3)^2} \approx 0,42$$

es decir, se transmite del orden del 40% de la potencia que propaga la onda acústica en el aire, en lugar del 0,1% que se transmitiría sin la función acopladora del oído medio.

En relación con la pérdida en dB, ahora se pierden solo $10 \log 1/0,42 \approx 4$ dB, en lugar de los 30 dB de la conexión directa, es decir la presencia del oído medio supone una recuperación de energía del orden de 26 dB, un factor de 4000.

Vemos pues como el proceso evolutivo por el que aparece el oído medio, al paso de la vida marina a terrestre, sigue una increíble línea ingenieril de adaptación de impedancias para la mejora de la transmisión de la energía que transportan las ondas acústicas en el aire al órgano transductor mecano eléctrico alojado en el oído interno, responsable del envío de señales neuronales a los centros de interpretación de las sensaciones sonoras. Esta suerte de milagro, de base ingenieril, no hace sino confirmar, desde un punto de vista, que comparto, la presencia de un Creador que ordena la evolución, ("la búsqueda a tientas, el azar dirigido" de Teilhard), y da sentido trascendente a nuestra vida. ■

Bibliografía

- Barnett y otros: *Un siglo después de Darwin*, Alianza Ed., Madrid 1971.
- Bekesy, George Von: *Experiments in Hearing*, McGraw Hill N.Y., 1960.
- Cuenot, Claude Elliot F.G. y otros: *Evolución, Marxismo y Cristianismo, Estudio sobre la síntesis de Teilhard de Chardin*, Plaza y Janes Ed., 1974.
- Fletcher, H.: *Speech and Hearing in Communications*, Robert E. Krieger, Huntington N.Y., 1972.
- García Pozuelo R.: *Los escalones intermedios de la cadena evolutiva*, Ed. Enfoque.
- Goudot-Perrot A.: *Cibernética y Biología*, Ed. Oiko-Tau, Barcelona, 1970.
- Gould Stephen: *El oído reptiliano de los mamíferos*.
- Heaviside, O. *Electrical Papers*, Mac. Millan N.Y. 1892.
- Lara Sáenz A.: *El mecanismo de la Audición, Evolución y Problemática*, Discurso de ingreso Academia Nacional de Ciencias Argentina, miscelánea n° 62, 1980.
- Lara Sáenz A.: *La impedancia en las Transmisiones de Energía*, ídem Academia Nacional de Ingeniería, Argentina, 1982.
- Lara Sáenz A.: *El Oído Medio Acoplador de Impedancias*, Revista Nacional de Audioprotesistas A.N.A. n° 25, 1987.
- Lara Sáenz A.: *On the Generalized Impedance Concept, Analogies and Acoustics Applications*, Proceedings Institute of Acoustics, London, 1995.
- Thevenin M.L. Sur a nouveau theoreme d'electricite dynamiques Comptes Rendus, Acad. Science Paris, 1883.
- Weber, E. *The reptile ears*, Princeton University Press, 1978.