

Fisiología del Sistema Auditivo

En este capítulo se examina la estructura y funcionamiento del oído, con el fin de lograr una mejor comprensión de los fenómenos y modelos psicoacústicos. Se estudia la anatomía y la fisiología del aparato auditivo, haciendo énfasis en aquellas partes y estructuras del mismo más importantes para el desarrollo de modelos perceptuales.

III.1.- El sentido de la audición y el sistema auditivo

La generación de sensaciones auditivas en el ser humano es un proceso extraordinariamente complejo, el cual se desarrolla en tres etapas básicas:

- **Captación y procesamiento mecánico** de las ondas sonoras.
- **Conversión de la señal acústica (mecánica) en impulsos nerviosos**, y transmisión de dichos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro.
- **Procesamiento neural** de la información codificada en forma de impulsos nerviosos.

La captación, procesamiento y transducción de los estímulos sonoros se llevan a cabo en el oído propiamente dicho, mientras que la etapa de procesamiento neural, en la cual se producen las diversas sensaciones auditivas, se encuentra ubicada en el cerebro. Así pues, se pueden distinguir dos regiones o partes del sistema auditivo: **la región periférica**, en la cual los estímulos sonoros conservan su carácter original de ondas mecánicas hasta el momento de su conversión en señales electroquímicas, y **la región central**, en la cual se transforman dichas señales en sensaciones.

En la región central también intervienen **procesos cognitivos**, mediante los cuales se asigna un contexto y un significado a los sonidos [1]; es decir, permiten reconocer una palabra o determinar que un sonido dado corresponde a un violín o a un piano.

El presente trabajo se limita a estudiar y utilizar solamente los aspectos perceptuales del sistema auditivo; esto es, aquellos que son independientes del contexto y del significado y que, en buena parte, se localizan en la región periférica.

III.1.1 Región periférica del sistema auditivo

El oído o región periférica se divide usualmente en tres zonas, llamadas **oído externo**, **oído medio** y **oído interno**, de acuerdo a su ubicación en el cráneo, como puede verse en la Fig.III.1.

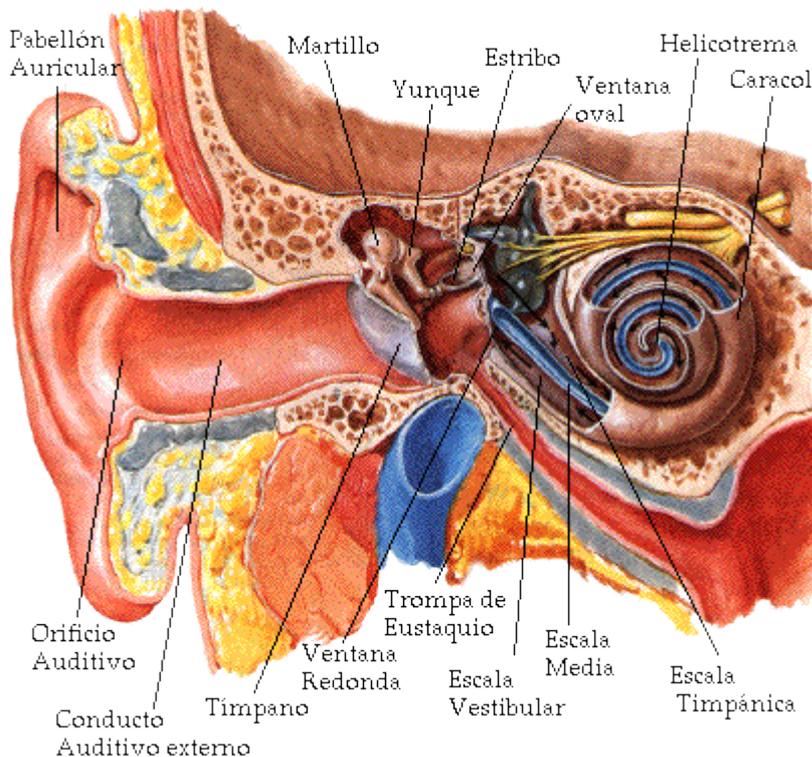


Fig.III.1. Anatomía del oído humano.

Los estímulos sonoros se propagan a través de estas zonas, sufriendo diversas transformaciones hasta su conversión final en impulsos nerviosos. Tanto el procesamiento mecánico de las ondas sonoras como la conversión de éstas en señales electroquímicas son procesos no lineales [2] [3], lo cual dificulta la caracterización y modelado de los fenómenos perceptuales.

En las siguientes secciones de este capítulo se estudia la anatomía y funcionamiento de estas tres zonas del oído, así como la propagación y procesamiento del sonido a través de las mismas.

III.2 Oído externo

III.2.1 Anatomía y funcionamiento

El oído externo (Fig. III.1) está formado por el **pabellón auricular u oreja**, el cual dirige las ondas sonoras hacia el conducto auditivo externo a través del orificio auditivo. El otro extremo del conducto auditivo se encuentra cubierto por la **membrana timpánica** o tímpano, la cual constituye la entrada al oído medio. La función del oído externo es la de recolectar las ondas sonoras y encauzarlas hacia el oído medio. Asimismo, el conducto auditivo tiene dos propósitos adicionales: proteger las delicadas estructuras del oído medio contra daños y minimizar la distancia del oído interno al cerebro, reduciendo el tiempo de propagación de los impulsos nerviosos [3].

III.2.2 Respuesta en frecuencia y localización de las fuentes de sonido

El **conducto auditivo** es un "tubo" de unos 2 cm de longitud, el cual influye en la respuesta en frecuencia del sistema auditivo. Dada la velocidad de propagación del sonido en el aire (aprox. 334 m/s), dicha longitud corresponde a **1/4 de la longitud de onda de una señal sonora de unos 4 kHz**. Este es uno de los motivos por los cuales el aparato auditivo presenta una mayor sensibilidad a las frecuencias cercanas a los 4 kHz, como se verá en el siguiente capítulo.

Adicionalmente, el **pabellón auricular, junto con la cabeza y los hombros, contribuye a modificar el espectro de la señal sonora**. Las señales sonoras que entran al conducto auditivo externo sufren efectos de difracción debidos a la forma del pabellón auricular y la cabeza, y estos efectos varían según la dirección de incidencia y el contenido espectral de la señal; así, se altera el espectro sonoro debido a la difracción [4]. Estas alteraciones, en forma de "picos" y "valles" en el espectro, son usadas por el sistema auditivo para determinar la procedencia del sonido en el llamado "plano medio" (plano imaginario perpendicular a la recta que une ambos tímpanos) [1] [5].

III.3 Oído medio

III.3.1 Anatomía

El oído medio (Fig. III.2) está constituido por una cavidad llena de aire, dentro de la cual se encuentran tres huesecillos, denominados **martillo, yunque y estribo**, unidos entre sí en forma articulada. Uno de los extremos del martillo se encuentra adherido al tímpano, mientras que la base del estribo está unida mediante un anillo flexible a las paredes de la **ventana oval**, orificio que constituye la vía de entrada del sonido al **oído interno**.

Finalmente, la cavidad del oído medio se comunica con el exterior del cuerpo a través de la **trompa de Eustaquio**, la cual es un conducto que llega hasta las vías respiratorias y que permite igualar la presión del aire a ambos lados del tímpano.

III.3.2 Propagación del sonido y acople de impedancias

Los sonidos, formados por oscilaciones de las moléculas del aire, son conducidos a través del conducto auditivo hasta el tímpano. Los cambios de presión en la pared externa de la membrana timpánica, asociados a la señal sonora, hacen que dicha membrana vibre siguiendo las oscilaciones de dicha señal.

Las vibraciones del tímpano se transmiten a lo largo de la **cadena de huesecillos**, la cual opera como un **sistema de palancas** [6] [3], de forma tal que la base del estribo vibra en la **ventana oval** (ver la Fig. III.2). Este huesecillo se encuentra en contacto con uno de los fluidos contenidos en el oído interno; por lo tanto, el tímpano y la cadena de huesecillos actúan como un mecanismo para transformar las vibraciones del aire en vibraciones del fluido.

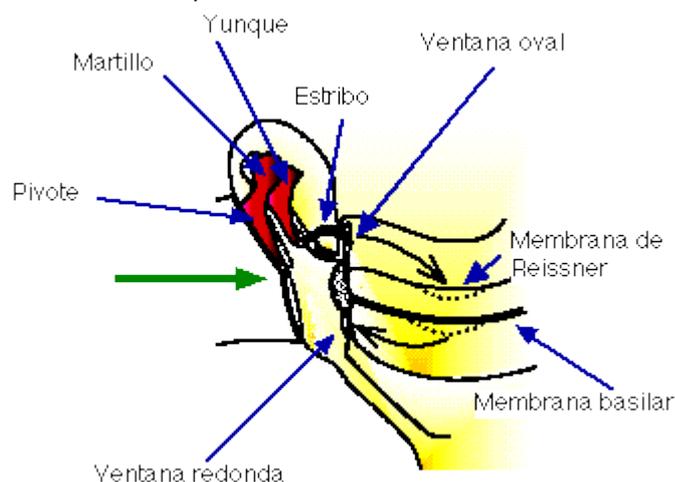


Fig. III.2. Propagación del sonido a través del oído medio e interno.

Ahora bien, para lograr que la transferencia de potencia del aire al fluido sea máxima, debe efectuarse un **acoplamiento entre la impedancia mecánica característica del aire y la del fluido**, puesto que esta última es mucho mayor que la primera.

Un equivalente mecánico de un transformador (el acoplador de impedancias eléctricas) es, precisamente, una palanca [3]; por ende, **la cadena de huesecillos actúa como acoplador de impedancias**. Además, la relación entre las superficies del tímpano y de la base del estribo (en la ventana oval) introduce un efecto de acoplamiento adicional, lográndose una transformación de impedancias del orden de 1:20 [4], con lo cual se minimizan las pérdidas por reflexión.

El máximo acoplamiento se obtiene en el rango de frecuencias medias, en torno a 1 kHz [3]. En la Fig. III.3 se representa en forma esquemática la transmisión del sonido del oído externo al interno, a través del oído medio.

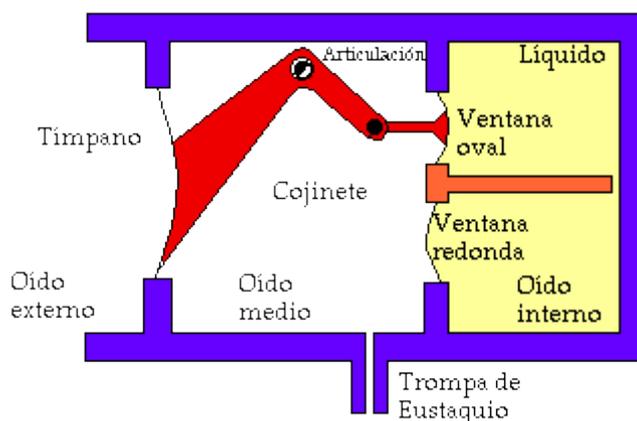


Fig. III.3. Esquema de la propagación del sonido a través del oído medio.

III.3.3 Reflejo timpánico o acústico

Cuando se aplican sonidos de gran intensidad (> 90 dB SPL) al tímpano, los músculos tensores del tímpano y el estribo se contraen de forma automática, modificando la característica de transferencia del oído medio y disminuyendo la cantidad de energía entregada al oído interno.

Este "**control de ganancia**" se denomina **reflejo timpánico** o auditivo, y tiene como propósito proteger a las células receptoras del oído interno frente a sobrecargas que puedan llegar a destruirlas. Este reflejo no es instantáneo, sino que **tarda de 40 a 160 ms en producirse** [6].

El reflejo timpánico debe ser tomado en cuenta en cualquier modelo matemático del procesamiento del sonido en el aparato auditivo, siempre que se trabaje con sonidos de gran intensidad [7], puesto que es un mecanismo no lineal que introduce un término cuadrático en la relación entrada-salida del oído medio [4].

III.3.4 Respuesta en frecuencia combinada del oído externo y el oído medio

El conjunto formado por el oído externo y el oído medio forman un sistema cuya respuesta en frecuencia es de tipo pasabajos [1], como se muestra en la Fig. III.4. En el intervalo cercano a los 4 kHz se observa un pequeño efecto de ganancia, debido a las características del conducto auditivo.

Esta respuesta sólo es válida cuando el sistema se comporta de modo lineal; es decir, cuando la intensidad del sonido no es muy elevada, para evitar que actúe el reflejo timpánico.

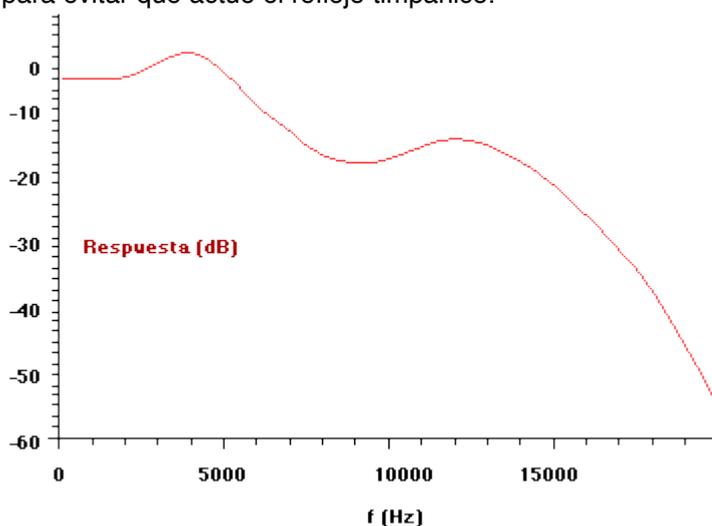


Fig. III.4. Respuesta en frecuencia combinada del oído externo y el oído medio

III.4 Oído interno

El oído interno representa el final de la cadena de procesamiento mecánico del sonido, y en él se llevan a cabo tres funciones primordiales: **filtraje de la señal sonora, transducción y generación probabilística de impulsos nerviosos** [8].

III.4.1 Anatomía

En el oído interno se encuentra la **cóclea o caracol**, la cual es un conducto rígido en forma de espiral (ver la Fig. III.1) de unos 35 mm de longitud, lleno con dos fluidos de distinta composición.

El interior del conducto está dividido en sentido longitudinal por la **membrana basilar y la membrana de Reissner**, las cuales forman tres compartimientos o escalas (Fig. III.5). La **escala vestibular** y la **escala timpánica** contienen un mismo fluido (perilinf), puesto que se interconectan por una pequeña abertura situada en el vértice del caracol, llamada **helicotrema**. Por el contrario, la **escala media** se encuentra aislada de las otras dos escalas, y contiene un líquido de distinta composición a la perilinfa (endolinfa).

La base del estribo, a través de la ventana oval, está en contacto con el fluido de la escala vestibular, mientras que la escala timpánica desemboca en la cavidad del oído medio a través de otra abertura (ventana redonda) sellada por una membrana flexible (membrana timpánica secundaria).

Sobre la membrana basilar y en el interior de la escala media se encuentra el **órgano de Corti** (Fig. III.6), el cual se extiende desde el vértice hasta la base de la cóclea y contiene las **células ciliares** que actúan como transductores de señales sonoras a impulsos nerviosos. Sobre las células ciliares se ubica la **membrana tectorial**, dentro de la cual se alojan las prolongaciones o cilios de las células ciliares externas.

Dependiendo de su ubicación en el órgano de Corti, se pueden distinguir dos tipos de células ciliares: internas y externas. Existen alrededor de **3500 células ciliares internas y unas 20000 células externas** [6]. Ambos tipos de células presentan conexiones o sinapsis con las fibras nerviosas aferentes (que transportan impulsos hacia el cerebro) y eferentes (que transportan impulsos provenientes del cerebro), las cuales conforman el nervio auditivo. Sin embargo, la distribución de las fibras es muy desigual: más del 90% de las fibras aferentes inervan a las células ciliares internas, mientras que la mayoría de las 500 fibras eferentes inervan a las células ciliares externas [6] [3]. El propósito de ambos tipos de células y de la distribución de las conexiones nerviosas se estudia más adelante, en la sección III.6, "Mecanismo de transducción".

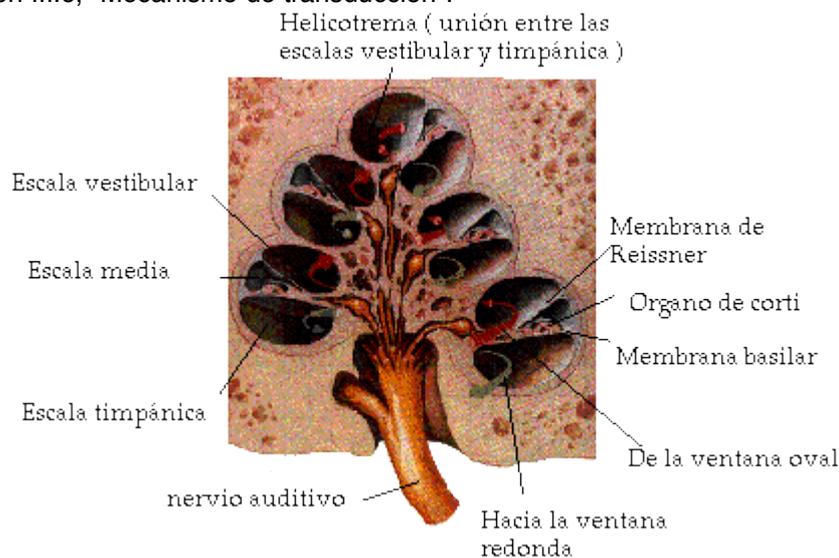


Fig. III. 5. Corte transversal de la cóclea o caracol.

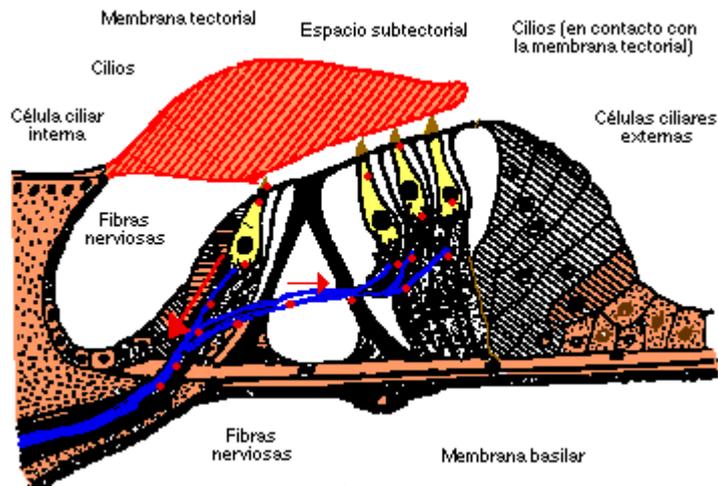


Fig. III.6. Órgano de Corti.

III.4.2 Propagación del sonido en la cóclea

Las oscilaciones del estribo (ver la Fig. III.2) provocan oscilaciones en el fluido de la escala vestibular (perilinf). La **membrana de Reissner**, la cual separa los fluidos de la escala vestibular y la escala media, es sumamente delgada y, en consecuencia, los líquidos en ambas escalas pueden tratarse como uno solo desde el punto de vista de la dinámica de los fluidos [3]. Así, las oscilaciones en la perilinfa de la escala vestibular se transmiten a la endolinfa y de ésta a la membrana basilar (Fig. III.7); la membrana basilar, a su vez, provoca oscilaciones en el fluido de la escala timpánica.

Puesto que tanto los fluidos como las paredes de la cóclea son incompresibles, es preciso compensar el desplazamiento de los fluidos; esto se lleva a cabo en la membrana de la ventana redonda, la cual permite "cerrar el circuito hidráulico" [9].

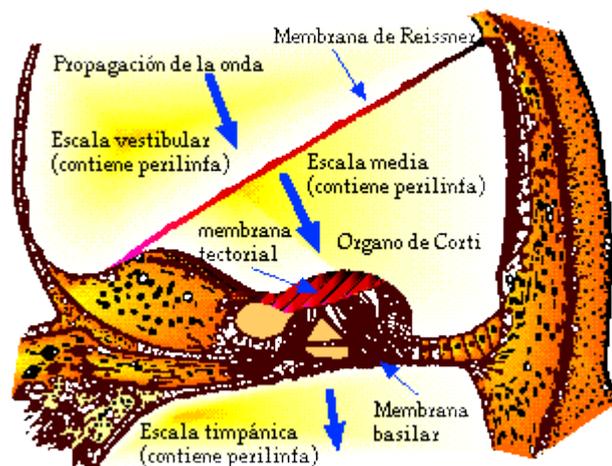


Fig. III.7. Corte transversal de un conducto de la cóclea.

La propagación de las oscilaciones del fluido en la escala vestibular a la timpánica no sólo se lleva a cabo a través de la membrana basilar; para sonidos de muy baja frecuencia, las vibraciones se transmiten a través de la abertura situada en el vértice de la cóclea (helicotrema).

En conclusión, **el sonido propagado a través del oído externo y medio llega hasta la cóclea, donde las oscilaciones en los fluidos hacen vibrar a la membrana basilar y a todas las estructuras que ésta soporta.**

III.5. La cóclea como analizador en frecuencia

La membrana basilar es una **estructura cuyo espesor y rigidez no es constante**: cerca de la ventana oval, la membrana es gruesa y rígida, pero a medida que se acerca hacia el vértice de la cóclea se vuelve más delgada y flexible.

La rigidez decae casi exponencialmente con la distancia a la ventana oval; esta variación de la rigidez en función de la posición afecta la velocidad de propagación de las ondas sonoras a lo largo de ella [5] [9], y es responsable en gran medida de un fenómeno muy importante: la **selectividad en frecuencia del oído interno.**

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

