

BIOFÍSICA DE LA AUDICIÓN

OBJETIVOS

Interpretar los cambios biofísicos de la señal sonora. Analizar los mecanismos de la fonación. Identificar el trauma acústico e interpretar un audiograma.

SONIDO Y AUDICIÓN

Sonido

La compleja estructura del sistema auditivo de los mamíferos comienza en el receptor y se extiende, mediante diversas vías y centros, en el tronco cerebral y el tálamo hasta llegar a la corteza auditiva. Presenta además conexiones con la formación reticular, el colículo superior y el vermis cerebeloso. Este sistema sensorial se compone, por lo tanto, de múltiples conjuntos neuronales con profusas intercomunicaciones desde el nivel más inferior hasta la corteza cerebral. Funcionalmente esta complejidad está en la base de los diversos procesamientos que realiza, tales como la discriminación de las frecuencias de sonidos y de su intensidad y la localización de las fuentes sonoras en el espacio, además de participar en funciones superiores como el aprendizaje y el desarrollo del habla en los seres humanos, del canto en las aves, de la música, es decir, de la comunicación en general.

Es necesario conocer aspectos de la física del sonido para comprender los fenómenos que ocurren en el sistema auditivo.

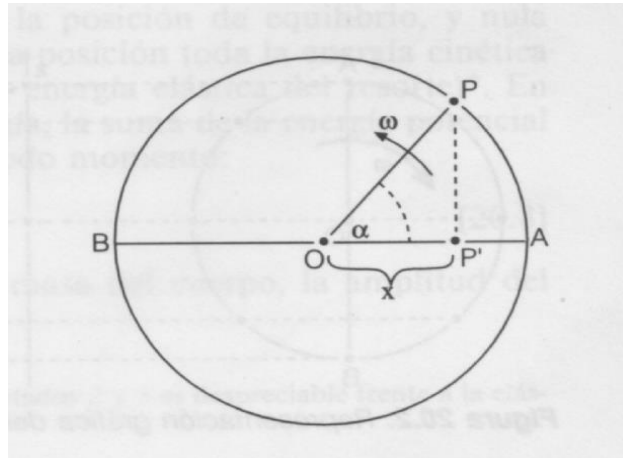
Características físicas

El **sonido** es el fenómeno físico que estimula el sentido del oído, es un movimiento oscilatorio, armónico o no, que se propaga por diferentes medios materiales (no se propaga en el vacío).

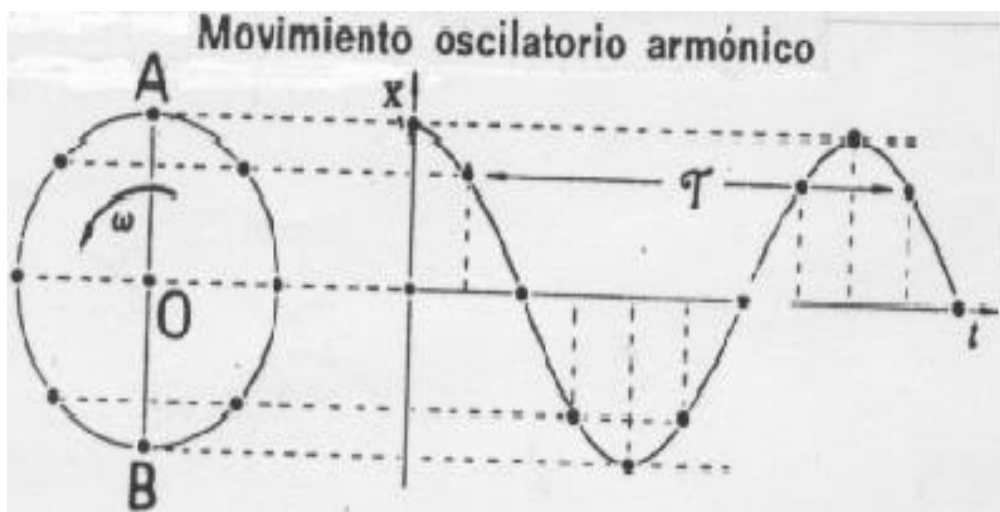
Su frecuencia es de 20 a 20.000 ciclos / s y la definición de sonido está dada en función del umbral de frecuencia del oído del ser humano. Sonidos con frecuencias superiores se llaman ultrasonidos y sonidos con frecuencias inferiores son infrasonidos.

Movimiento oscilatorio armónico: Es el movimiento que describe sobre un diámetro la proyección de un punto que realiza un movimiento circular uniforme, siguiendo una circunferencia a la cual pertenece dicho diámetro.

En la siguiente figura, el punto P efectúa un movimiento circular uniforme de velocidad angular ω , y mientras recorre la circunferencia su proyección P' realiza un **movimiento vibratorio armónico** sobre el diámetro AB efectuando repetidamente el recorrido A, O, B, O, A.



El **movimiento oscilatorio armónico** se puede graficar representando la elongación (ordenadas) en función del tiempo (abscisas), como se muestra en la siguiente figura, para lo cual, por razones de claridad, hemos dispuesto verticalmente el diámetro AB.



A diferencia de la visión, nuestro sistema auditivo está siempre abierto al mundo, lo que implica una recepción continuada de estímulos y de informaciones sonoras de las que no podemos sustraernos.

Gran parte de nuestra experiencia está relacionada con el sonido, que constituye un estímulo importante y necesario, a la vez que es canal de comunicación con el medio que nos rodea.

Según su procedencia, sus características e incluso, según nuestras circunstancias en el momento en que los percibimos, los sonidos pueden resultarnos suaves y agradables murmullos, es decir que las vibraciones tienen una frecuencia regular; o estrepitosos y agresivos que son los ruidos y donde las vibraciones que se producen tienen una frecuencia irregular.



Ondas de sonido



Ondas de ruido

La diferencia fundamental entre "**sonido**" y "**ruido**" está determinada por un factor subjetivo: "**ruido es todo sonido no deseado**".

Un mismo sonido, como la música por ejemplo, puede ser percibido como agradable, relajante o estimulante, enriquecedor o sublime, por la persona que decide disfrutarla, o bien como una agresión física y mental por otra persona que se ve obligada a escucharla a pesar de su dolor de cabeza, o por aquella otra que ve perturbado su descanso.

En síntesis, la transmisión del sonido se produce mediante **ondas**, que son oscilaciones periódicas alrededor de una posición de equilibrio. Este fenómeno es básicamente transferencia de energía de un lugar a otro sin transferencia de materia.

Puede ser una **oscilación** de moléculas de aire, como en el caso del **sonido** que viaja por la atmósfera, de moléculas de agua (como en las olas que se forman en la superficie del mar) o de porciones de una cuerda o un resorte. En todos estos casos, las partículas oscilan en torno a su posición de equilibrio y sólo la energía avanza de forma continua.

Estas ondas se denominan **mecánicas** porque la energía se transmite a través de un medio material, sin ningún movimiento global del propio medio. Las únicas

ondas que no requieren un medio material para su propagación son las ondas **electromagnéticas**; en ese caso las oscilaciones corresponden a variaciones en la intensidad de **campos** magnéticos y **eléctricos**.

Tipos de ondas

Las ondas se clasifican según la dirección de los desplazamientos de las partículas en relación a la dirección del movimiento de la propia onda.

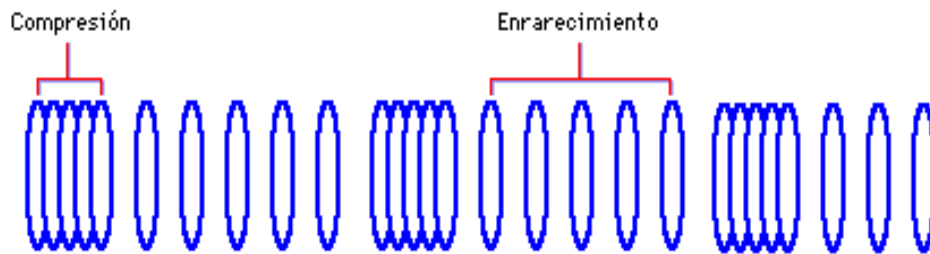


Figura 1: onda longitudinal

Si la vibración es paralela a la dirección de propagación de la onda, la onda se denomina longitudinal (ver figura 1).

Una onda longitudinal siempre es mecánica y se debe a las sucesivas compresiones (estados de máxima densidad y presión) y enrarecimientos (estados de mínima densidad y presión) del medio.

Las **ondas sonoras** son un ejemplo típico de esta forma de movimiento ondulatorio.

Otro tipo de onda es la onda transversal (ver figura 2), en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.



Figura 2: onda transversal

Del mismo modo, si tiramos una piedra a un estanque, una serie de ondas transversales se propaga desde el punto de impacto.

Una onda de sonido es una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos del aire. Cada molécula individual transmite la energía a las moléculas vecinas,

pero una vez que pasa la onda de sonido, las moléculas permanecen más o menos en la misma posición.

Propiedades de las ondas

Longitud de onda

En una onda transversal, la **longitud de onda** es la distancia entre dos crestas o valles sucesivos. En una onda longitudinal, corresponde a la distancia entre dos compresiones o entre dos enrarecimientos sucesivos.

Frecuencia

Es el número de vibraciones por segundo y se mide en Hertz, que es el número de ciclos por segundo.

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ ciclo/seg.}$$

Velocidad de propagación

Es igual a su longitud de onda multiplicada por su frecuencia.

$$V = f \cdot \lambda$$

V= velocidad de la onda en m/s

f= frecuencia en Hertz (Hz)

λ = longitud de onda en metros

Amplitud

En una onda mecánica, su amplitud es el máximo desplazamiento de las partículas que vibran. En una onda electromagnética, su amplitud es la intensidad máxima del campo eléctrico o del campo magnético.

Comportamiento de las ondas

La velocidad de una onda en la materia depende de la **elasticidad** y **densidad** del medio. En una onda transversal a lo largo de una cuerda tensa, por ejemplo, la velocidad depende de la tensión de la cuerda y de su densidad lineal o masa por unidad de longitud.

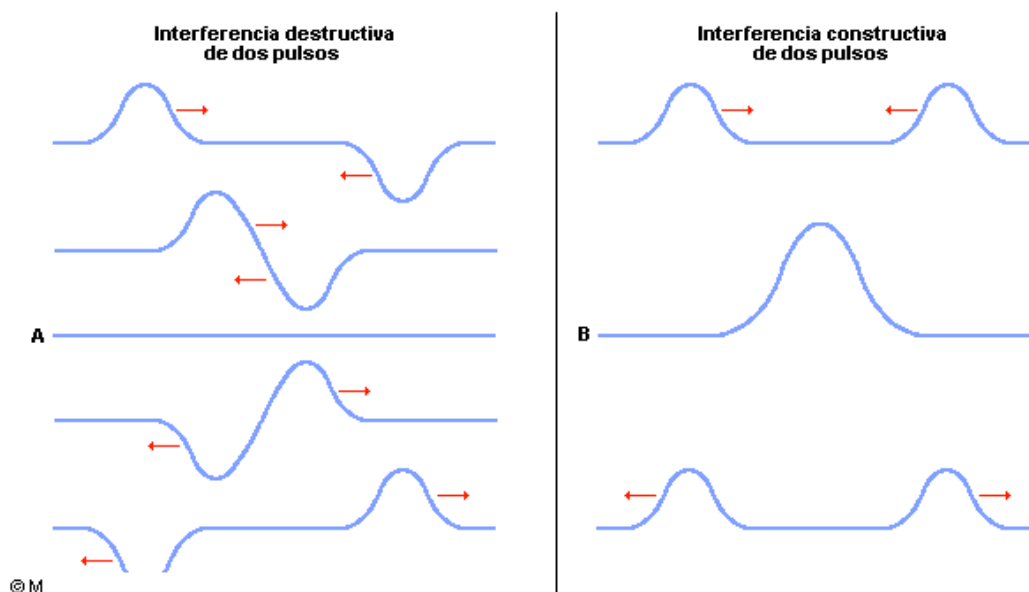
La velocidad puede duplicarse cuadruplicando la tensión, o reducirse a la mitad cuadruplicando la densidad lineal. La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío (entre ellas la luz) es constante y su valor es de aproximadamente

300.000 km/s. Al atravesar un medio material esta velocidad varía sin superar nunca su valor en el vacío.

En cambio las ondas sonoras, que necesitan moléculas para propagarse, varían su velocidad entre medios sólidos, líquidos y gaseosos.

Cuando dos ondas se encuentran en un punto, el desplazamiento resultante en ese punto es la suma de los desplazamientos individuales producidos por cada una de las ondas. Si los desplazamientos van en el mismo sentido, ambas ondas se refuerzan; si van en sentido opuesto, se debilitan mutuamente. Este fenómeno se conoce como **interferencia**.

Cuando dos ondas de igual amplitud, longitud de onda y velocidad avanzan en sentido opuesto a través de un medio se forman ondas estacionarias.



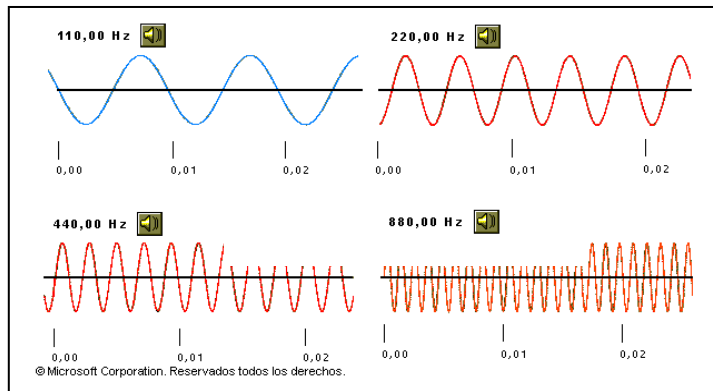
Las ondas estacionarias aparecen también en las cuerdas de los instrumentos musicales. Por ejemplo, una cuerda de violín vibra como un todo (con nodos en los extremos), por mitades (con un nodo adicional en el centro), por tercios. Todas estas vibraciones se producen de forma simultánea; la vibración de la cuerda como un todo produce el tono fundamental y las restantes vibraciones generan los diferentes **armónicos**.

Cualquier sonido sencillo, como una nota musical, puede describirse en su totalidad especificando tres características de su percepción: el **tono**, la **intensidad** y el **timbre**.

Estas características corresponden exactamente a tres características físicas: la **frecuencia**, la **amplitud** y la **composición armónica** ó **forma de onda**.

Frecuencia

Los sonidos agudos, tales como los producidos por un silbato o una flauta, son de altas frecuencias y contienen miles de ciclos por segundo. Los sonidos graves, tales como los producidos por un trueno lejano o una tuba, son de bajas frecuencias y contienen pocos ciclos por segundo.

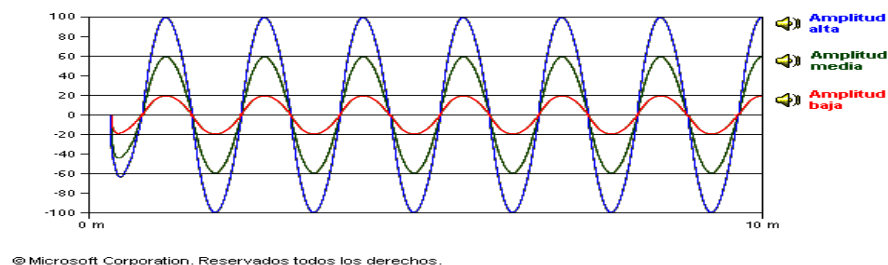


Se observan cuatro sonidos de la misma intensidad (amplitud), pero de frecuencia creciente

Las vibraciones que varían entre los 20 y los 20.000 ciclos por segundo son percibidas por el oído y se las denomina sonidos.

Amplitud

La amplitud de una onda de sonido es el grado de movimiento de las moléculas de aire en la onda y ésta corresponde a la intensidad del enrarecimiento y de la



Se observan tres sonidos de igual frecuencia y de diferente intensidad

compresión que la acompañan. Cuanto mayor es la amplitud de la onda, más intensamente golpean las moléculas el tímpano y más fuerte es el sonido percibido.

La distancia a la que se puede oír un sonido depende de su **intensidad**, que es el **flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación**.

La intensidad de los sonidos se compara con un sonido patrón y se expresa en decibeles (dB).

La escala de decibeles (dB)

Se utiliza una escala cuyos incrementos son, a grandes rasgos, paralelos a los incrementos de la sensación correspondiente. Es decir, los incrementos subjetivos de la intensidad corresponden a incrementos iguales de la presión ejercida y, por lo tanto, de la energía transportada por la onda, independientemente del valor absoluto de presión.

El nivel de intensidad B de un sonido se define como:

$$B = 10 \log I_x / I_0 \text{ (decibeles)}$$

o como:

$$B = \log I_x / I_0 \text{ (Bel)}$$

Donde I_x es la intensidad el sonido e I_0 es el nivel cero de intensidad que se toma como igual a 10^{-16} vatios / cm^2 o 10^{-12} vatios / m^2 . El nivel de intensidad B se expresa en decibeles (dB).

El dB es una magnitud relativa que tiene como referencia a la menor presión o intensidad audible demostrada tras haber realizado esta medición a más de un millón de personas, y que es de $2 \cdot 10^{-4}$ dyn/ cm^2 (P_0) o 10^{-16} W/ cm^2 , respectivamente.

Como el Bel es una unidad relativamente grande para comparar dos sonidos, en la práctica se usa el decibel, que es la décima parte del bel, y que constituye el más pequeño cambio de intensidad que el oído puede apreciar.

Así si un sonido tiene una intensidad:

$$I = 10^{-14} \text{ vatios / cm}^2$$

Su nivel de intensidad es:

$$B = 10 \log 10^{-14} / 10^{-16} \text{ db}$$

$$B = \log 10^{-14} / 10^{-16} \text{ (Bel)}$$

$$B = 10 \log 100 \text{ db}$$

$$B = \log 100$$

$$B = 20 \text{ dB}$$

$$B = 2 \text{ Bel}$$

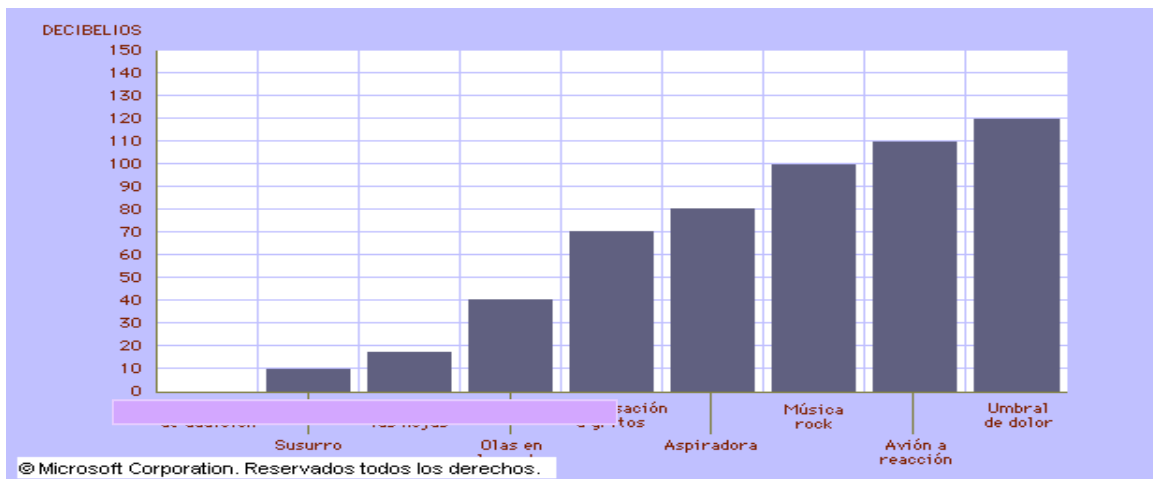
El umbral auditivo es de alrededor de 0 dB para personas jóvenes, en tanto que, en el otro extremo, el nivel doloroso (sonidos muy intensos) se encuentra alrededor de los 120 dB.

Cuanto mayor sea la amplitud, más serán los dB, y más intenso será el sonido (por ejemplo, el zumbido de un avión comparado con el sonido de una respiración suave).

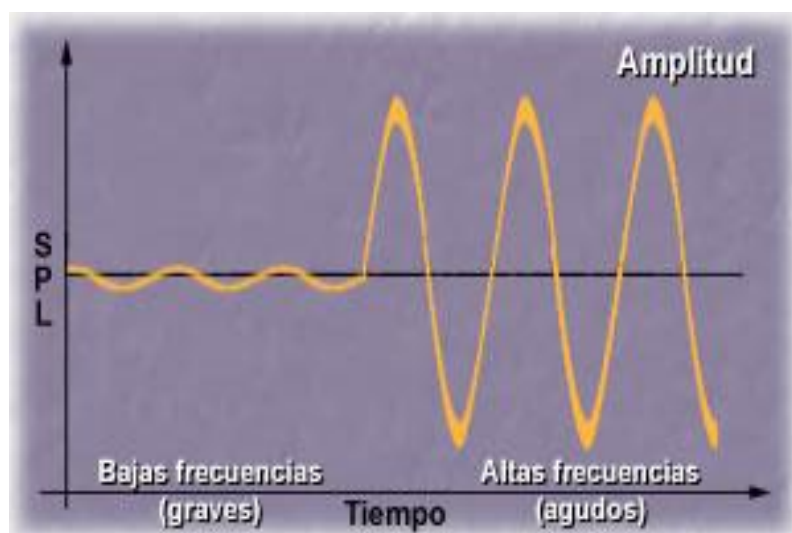
Un adulto sano es más sensible a los sonidos que se encuentran en un rango de frecuencias que va desde los 500 a los 8000 Hz, lo cual se corresponde con las frecuencias de los sonidos del habla.

El sonido más suave (el umbral de audición) que un oído normal puede percibir, se encuentra alrededor de los 0 dB.

El sonido más intenso que puede tolerar (umbral de incomfort) se encuentra entre 120-140 dB.



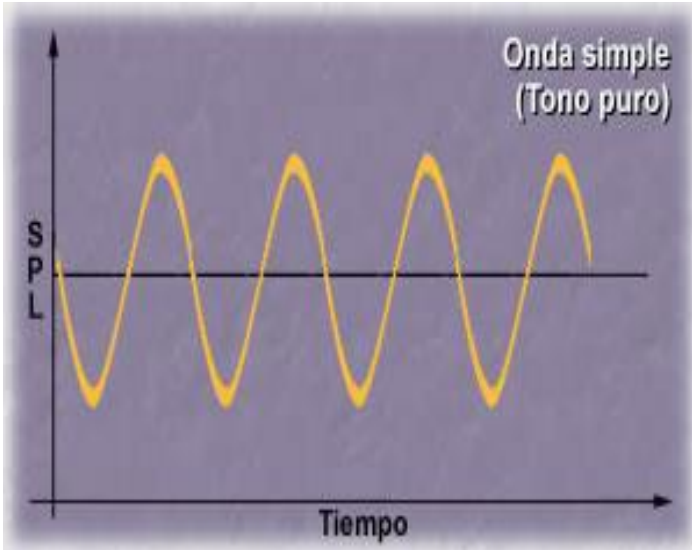
La figura que se presenta a continuación muestra la comparación entre un sonido suave y uno más intenso, de la misma frecuencia. Fíjese que el sonido intenso (de gran amplitud) alcanza puntos más altos de nivel de presión sonora (SPL) que el sonido suave (de menor amplitud). Sonidos muy intensos pueden dañar el oído al igual que si se tratara de un golpe físico.



Timbre

La mayoría de los sonidos naturales no contienen una sola frecuencia de una sola amplitud, sino que contienen muchas frecuencias y cada una de ellas de una distinta amplitud. Esta cualidad del sonido es lo que se llama **timbre**. Es lo que hace que el sonido de un trombón y el de un clarinete sean diferentes incluso si tocan la misma nota.

Esta es una representación de una onda simple con una única frecuencia y una única amplitud. Este es el sonido que puede usted oír cuando hace funcionar un diapasón, o cuando enciende un afinador de guitarra eléctrica. También es conocido como un sonido de **tonos puros**.



Si se toca el **la** situado sobre el **do** central en un violín, un piano y un diapasón, con la misma intensidad en los tres casos, los sonidos son idénticos en frecuencia y amplitud, pero muy diferentes en timbre.

De las tres fuentes, el diapasón es el que produce el tono más sencillo, que en este caso está formado casi exclusivamente por vibraciones con frecuencia de 440 Hz.

Debido a las propiedades acústicas del oído y las propiedades de resonancia de su membrana vibrante, es dudoso que un tono puro llegue al mecanismo interno del oído sin sufrir cambios.

La componente principal de la nota producida por el piano o el violín también tiene una frecuencia de 440 Hz. Sin embargo, esas notas también contienen componentes con frecuencias que son múltiplos exactos de 440 Hz, los llamados tonos secundarios, como 880, 1.320 o 1.760 Hz.

Las intensidades concretas de esas otras componentes, **los llamados armónicos**, determinan el **timbre** de la nota.

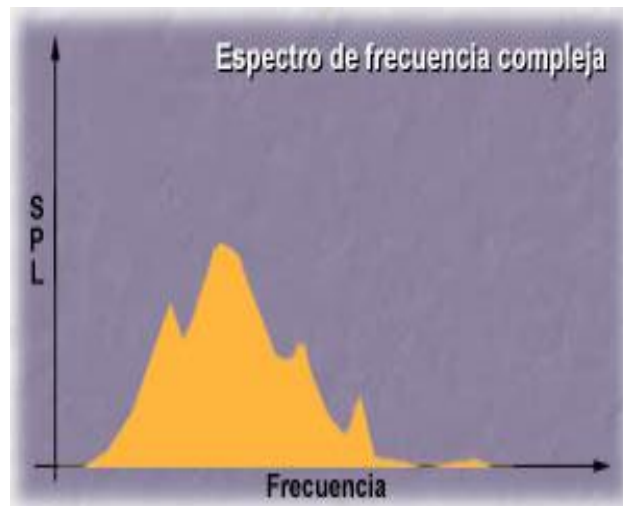
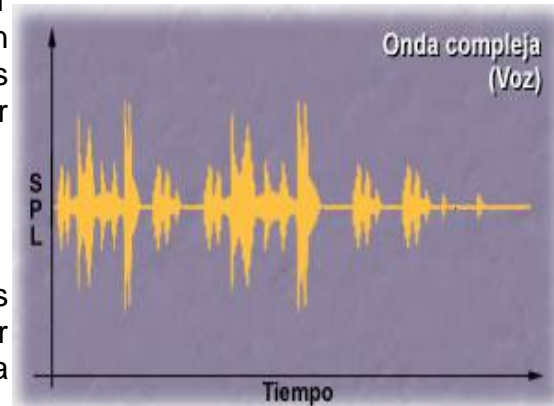
En esta figura se muestra una onda compleja, como la que pudiera crear el habla humana. Fíjese en que es muy difícil extraer conclusiones sobre la señal porque la amplitud cambia constantemente con el tiempo.

El espectro de frecuencia de una onda compleja muestra muchos componentes de frecuencia, cada uno a una distinta amplitud. Este puede ser el espectro de una persona emitiendo una única nota. Al analizar el sonido

de esta manera, podemos lograr la mejor manera de ayudar a las personas con problemas auditivos, amplificando las frecuencias que les ayuden a comprender el habla más fácilmente.

Velocidad del sonido

La frecuencia de una onda de sonido es una medida del número de vibraciones por segundo de un punto determinado. La



distancia entre dos compresiones o dos enrarecimientos sucesivos de la onda se denomina longitud de onda. El producto de la longitud de onda y la frecuencia es igual a la velocidad de propagación de la onda, que es la misma para sonidos de cualquier frecuencia (cuando el sonido se propaga por el mismo medio a la misma temperatura).

Los cambios de presión a densidad constante no tienen prácticamente ningún efecto sobre la velocidad del sonido. En muchos otros gases, la

velocidad sólo depende de su densidad. Si las moléculas son pesadas, se mueven con más dificultad, y el sonido avanza más despacio por el medio. Por ejemplo, el sonido avanza ligeramente más deprisa en aire húmedo que en aire seco, porque el primero contiene un número mayor de moléculas más ligeras. En la mayoría de los gases, la velocidad del sonido también depende de otro factor, el calor específico, que afecta a la propagación de las ondas de sonido.

El sonido se mueve a mayor velocidad en sólidos que en líquidos, y en éstos que en gases. Tanto en los líquidos como en los sólidos, la densidad tiene el mismo efecto que en los gases; la velocidad del sonido varía de forma inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad. La velocidad también varía de forma proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad. Por ejemplo, la velocidad del sonido en agua es de unos 1.500 m/s a temperaturas ordinarias, pero aumenta mucho cuando sube la temperatura. La velocidad del sonido en el cobre es de unos 3.500 m/s a temperaturas normales y decrece a medida que aumenta la

temperatura (debido a la disminución de la elasticidad). En el acero, más elástico, el sonido se desplaza a unos 5.000 m/s; su propagación es muy eficiente.

La velocidad de propagación del sonido en aire seco a una temperatura de 0° C es de 331,6 m/s. Al aumentar la temperatura aumenta la velocidad del sonido; por ejemplo, a 20° C, la velocidad es de 344 m/s.

Refracción, reflexión e interferencias

Son propiedades del sonido, así como la **propagación rectilínea**, ya que el mismo avanza en línea recta cuando se desplaza en un medio de densidad uniforme. Sin embargo, igual que la luz, el sonido está sometido a la **refracción**, es decir, la desviación de las ondas de sonido de su trayectoria original.

El sonido también se ve afectado por la **reflexión**, y cumple la ley fundamental de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Un eco es el resultado de la reflexión del sonido. El sonar se basa en la reflexión de los sonidos propagados en agua. Una bocina es un tubo cónico que forma un haz de ondas de sonido reflejando algunos de los rayos divergentes en los lados del tubo. Un tubo similar puede recoger ondas de sonido si se dirige el extremo ancho hacia la fuente de sonido.

El sonido también experimenta **difracción e interferencia**. Si el sonido de una única fuente llega a un oyente por dos trayectorias diferentes —por ejemplo, una directa y otra reflejada—, los dos sonidos pueden reforzarse; sin embargo, si no están en fase pueden interferir de forma que el sonido resultante sea menos intenso que el sonido directo sin reflexión. Las trayectorias de interferencia son distintas para sonidos de diferentes frecuencias, con lo que la interferencia produce distorsión en sonidos complejos. Dos sonidos de distintas frecuencias pueden combinarse para producir un tercer sonido cuya frecuencia es igual a la suma o diferencia de las dos frecuencias originales.

CUESTIONARIO Y EJERCITACIÓN

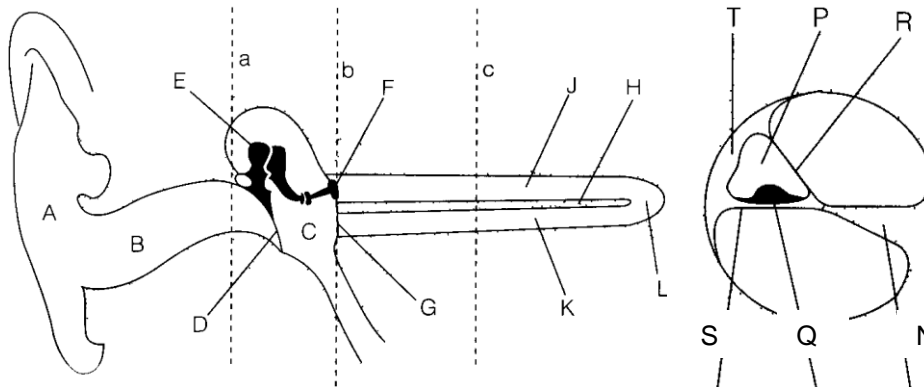
- 1) En el sonido, ¿hay transferencia de materia?. Fundamente su respuesta.
- 2) Las ondas que forman los sonidos, ¿son mecánicas o electromagnéticas?. Justifique su respuesta.
- 3) ¿Cómo se clasifican las ondas según la dirección de los desplazamientos de las partículas en relación a la dirección del movimiento?
- 4) Describa las propiedades de las ondas.
- 5) ¿A que características del sonido corresponden las propiedades anteriormente descritas?
- 6) Explique los fenómenos de reflexión, difracción e interferencia de las ondas sonoras.
- 7) ¿ En qué unidad se expresa el nivel de presión sonora, y como se calcula?
- 8) ¿A cuántos Hertz equivale un sonido que presenta $3,4 \times 10^4$ vibraciones por hora?
- 9) Un joven que se encuentra en un concierto está expuesto a una intensidad de 10^{-3} W/m^2 , ¿a cuantos decibelios corresponde?

- 10) ¿A cuantos Bel equivale un sonido cuya una intensidad es de 10^{-5} W/cm^2 ?
 ¿Pasa el umbral doloroso?
- 11) En una habitación se ubican dos parlantes que emiten sonidos de 60 dB y de 70 dB respectivamente, ¿cuál es el resultado de la suma de ambas intensidades?

¿CÓMO OÍMOS?

El oído humano normal es capaz de detectar, identificar y diferenciar sonidos. Las relaciones entre frecuencia, intensidad, y duración son complejas. En general, un oyente puede detectar diferencias tan pequeñas como 1 Hz en frecuencia, 5 dB en intensidad, y 2-3 ms en el tiempo, debido al mecanismo tan preciso de nuestro sistema auditivo. La fisiología tan particular del oído se ha optimizado para oír los sonidos más comunes e importantes de todos, es decir los sonidos medioambientales y del habla. Durante estos últimos años, se ha modificado la visión anatómica y fisiológica del oído. El siguiente diagrama nos muestra una versión simplificada de la teoría acerca de cómo escuchamos los sonidos.

Anatomía del oído



Representación esquemática del oído: A, pabellón de la oreja, B, conducto auditivo externo, C, caja del tímpano, D, membrana del tímpano, E, martillo, F, estribo y ventana oval, Q, ventana redonda, H, tabique, J, rampa vestibular, K, rampa timpánica, L, helicotrema N, lámina espiral, P, conducto coclear, Q, órgano de Corti, R, membrana de Reissner. S membrana basilar, T, estría vascular

Oído externo. Está constituido por el pabellón de la oreja con sus sinuosidades y el conducto externo que llega hasta la membrana del tímpano. Las diferentes resonancias producidas por las sinuosidades de la oreja aumentan la presión

Resonancia: Cuando a un dispositivo llega un sonido de una frecuencia igual a la propia del sistema, éste entra en vibración aprovechando la energía que le llega. Se dice en tal caso el sistema entra en resonancia. Cuando ocurre esto, el dispositivo acumula la energía que le llega de modo que el sonido se refuerza en él.

sonora sobre el tímpano en las frecuencias de unos 2-7 kHz en el ser humano, lo que mejora la eficiencia del sistema para la transmisión de los sonidos, particularmente a esas frecuencias. Participa también en otras funciones; una de ellas es la de colaborar en la localización de los sonidos en el espacio mediante movimientos exploratorios de las orejas en los animales y movimientos de la cabeza en el ser humano.

Oído medio. Es una cavidad llena de aire que tiene tres pequeños huesos y está comunicada con la rinofaringe por la trompa de Eustaquio. La función de esta comunicación con la faringe es la de igualar la presión del oído medio con la presión en la boca, es decir, con la presión atmosférica. De esta manera, a ambos lados de la membrana timpánica se obtiene la misma presión y por tanto la mejor condición para vibrar frente a un sonido. La deglución, el habla, la prueba de Valsalva, el bostezo, etc., producen la apertura de la trompa de Eustaquio, lo que iguala las presiones y mejora la audición, como ocurre durante los cambios de presión que suceden, por ejemplo, cuando un avión asciende o desciende.

Cuando el sonido pasa de un medio aéreo a un medio acuoso como el del caracol o cóclea, pierde energía. Esto se debe a que los fluidos del oído interno se

Impedancia:	La impedancia acústica es una expresión de la resistencia o dificultad que ofrece un medio a la propagación de las ondas sonoras.
--------------------	---

resisten a desplazarse porque los líquidos tienen mayor inercia y, por lo tanto, se necesita una mayor presión para hacerlos vibrar. El oído medio actúa como un transformador de impedancia acústica que efectúa un acoplamiento de energía entre el aire, de baja impedancia, y los fluidos intracocleares, de mayor impedancia, y reduce así la reflexión de energía que ocurriría de otra manera.

Si la palanca que significa la cadena de huesillos, gran parte de la energía sería reflejada sin producir cambios en el caracol.

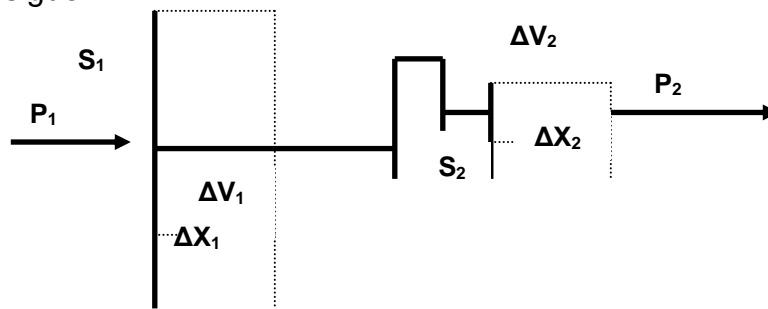
Las vibraciones ocasionadas por el sonido son transmitidas desde la membrana del tímpano al caracol por tres pequeños huesos denominados **martillo, yunque y estribo**. Cuando el martillo es empujado por las vibraciones de la membrana del tímpano, el yunque empuja al estribo que, actuando como un pistón, transmite las vibraciones a los fluidos intracocleares. El estribo está asociado a la membrana de la ventana oval. La palanca ejercida por la cadena de huesillos incrementa la presión en la ventana oval, que se suma a la presión generada en el tímpano, de mayor diámetro, la cual se concentra entonces en una ventana oval de mucho menor diámetro, lo que agrega otro factor de amplificación del sonido. De esta manera se incrementa el sonido entrante para introducirlo en el medio acuoso del oído interno sin mayor pérdida de energía.

La supresión de la cadena de huesecillos aumenta en alrededor de 60 dB, la intensidad más débil que el oído puede captar.

Las ondas de presión que llegan por el conducto auditivo externo ponen en vibración la membrana del tímpano, y sus movimientos son transmitidos a la cadena de huesecillos. Esta cadena hace las veces de una palanca que transmite los desplazamientos de la membrana del tímpano a la ventana oval, reduciendo su amplitud 1,3 veces.

Prácticamente, la membrana del tímpano no refleja la energía recibida, de modo que todo el trabajo que la presión ejerce sobre ella se transmite al pie del estribo.

Los desplazamientos del sistema se hallan representados esquemáticamente en la figura que sigue:



El trabajo que una onda de presión P_1 ejerce sobre la membrana del tímpano viene determinado por:

$$W = P_1 \cdot \Delta V_1$$

y como:

$$\Delta V_1 = S_1 \cdot \Delta X_1$$

resulta:

$$W = P_1 \cdot S_1 \cdot \Delta X_1$$

Por análogas razones, para la base del estribo tenemos:

$$W = P_2 \cdot S_2 \cdot \Delta X_2$$

De las dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$P_2 \cdot S_2 \cdot \Delta X_2 = P_1 \cdot S_1 \cdot \Delta X_1$$

de la cual surge:

$$P_2 = P_1 \cdot S_1 / S_2 \cdot \Delta X_1 / \Delta X_2$$

Como la superficie de la membrana del tímpano es alrededor de 15 veces mayor que la base del estribo y ΔX_1 es 1,3 veces mayor que ΔX_2 , la presión que se ejerce en la ventana oval resulta:

$$P_2 \approx P_1 \cdot 15 \cdot 1,3 \approx 20 \cdot P_1$$

Es decir, el oído medio transmite al oído interno una presión aproximadamente 20 veces mayor que la que recibe. Esta multiplicación es precisamente la adecuada para la transmisión del sonido de un medio compresible como el aire a un medio líquido, prácticamente incompresible.

La transmisión a través del oído medio puede ser controlada por sus músculos. Se trata de dos pequeños músculos estriados que se insertan en los huesillos. El tensor del tímpano o músculo del martillo se inserta en el martillo y esta inervado por el **V** par craneal, el trigémino. El otro músculo, el estapedio o músculo del estribo, se inserta en el estribo y depende del **VII** nervio craneal, el facial. La contracción refleja de estos músculos produce cierta rigidez en la cadena de huesillos y disminuye la conductancia del sonido. La atenuación producida por este reflejo (reflejo de atenuación) es mayor para los sonidos de baja frecuencia y por ello tiende a disminuir el proceso de enmascaramiento, lo cual hace más discernibles las altas frecuencias en un ambiente con gran componente de bajas frecuencias. La contracción de estos músculos puede ser provocada por sonidos de gran intensidad (85 dB o más), por vocalizaciones propias, estimulación táctil de la oreja o movimientos generales del cuerpo, y también se asocia a los fenómenos fásicos del sueño paradójico. Puede servir para reducir la intensidad de los sonidos y proteger al receptor, así como disminuir selectivamente la entrada de estímulos con componentes de bajas frecuencias y gran intensidad. Es tal vez por la acción de este reflejo de atenuación, que bloquea bajas frecuencias, que casi no oímos nuestra voz cuando hablamos. Este reflejo posee una latencia de 50 a 100 ms, por lo que no ofrece protección para sonidos bruscos.

Oído interno: el caracol o cóclea. Sólo una parte del oído interno pertenece al sistema auditivo: el caracol o cóclea, ya que el laberinto es la porción que corresponde al sistema vestibular, con funciones relacionadas con el equilibrio. En los seres humanos, la cóclea o caracol se encuentra tallada en el interior del hueso temporal. Es como un tubo enrollado $2 \frac{1}{2}$ veces que mide aproximadamente 32 mm de largo y 2 mm de diámetro y se encuentra a su vez dividido por membranas (el caracol membranoso) en tres cámaras: **la rampa vestibular** (*scala vestibuli*), separada del conducto coclear (*scala media*) por la membrana de Reissner, y la **rampa timpánica** (*scala tympani*), separada del conducto coclear por la membrana basilar. Sobre la membrana basilar, de gran importancia para el proceso de la audición, se encuentra ubicado el órgano de Corti, que contiene células ciliadas de origen epitelial, los receptores auditivos. Además, y como indica su nombre, la membrana tectoria se apoya como un techo sobre el órgano de Corti.

En el ápice de la cóclea el conducto coclear se encuentra cerrado, mientras que la rampa vestibular y la rampa timpánica se unen por un orificio, el helicotrema. Por tanto, los fluidos de las rampas vestibular y timpánica están en comunicación. En la base de la cóclea, la rampa vestibular se encuentra con la membrana de la ventana oval y la rampa timpánica con la membrana de la ventana redonda.

La membrana de la ventana oval, empujada por los huesillos, genera una onda de presión que se propaga por la perilinfa en la rampa vestibular, asciende hasta el helicotrema y desciende por la rampa timpánica para terminar abombando hacia fuera la membrana de la ventana redonda. El caracol membranoso no es completamente rígido. La membrana basilar, la parte funcionalmente más importante, es flexible y se mueve en respuesta a las ondas de presión generadas

por los sonidos. Primero, es más ancha en el ápex (cinco veces) que en la base de la cóclea, y segundo, su relativa rigidez es mayor en la base que en el ápex (100 veces más rígida).

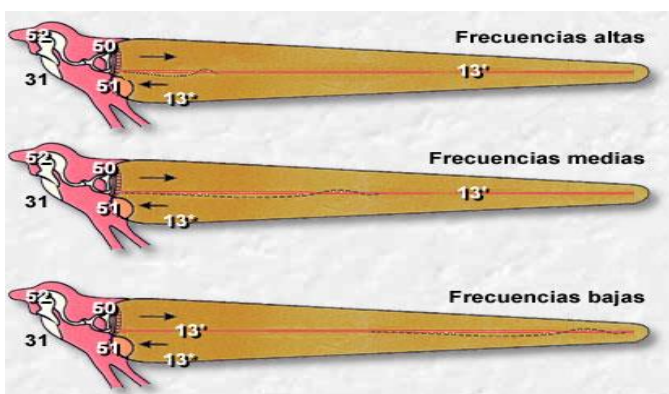
Los movimientos de los líquidos intracocleares generados por los sonidos determinan movimientos de la membrana basilar que comienzan en la base y se propagan hacia el ápex formando una “onda viajera”.

¿Hasta dónde continúa esta “onda viajera”? Eso depende de la frecuencia del sonido que la genera. Si la frecuencia es alta, sonido agudo, la base de la membrana, más rígida, vibrará mucho y disipará la mayor parte de la energía, que, por lo tanto, no se propagará muy lejos. Los sonidos de baja frecuencia, en cambio, generan ondas viajeras que llegan más arriba, hasta la zona donde la membrana basilar es más ancha y menos rígida, hasta disipar toda su energía mecánica.

Estas características de la membrana basilar crean un código para discriminar las frecuencias que componen los sonidos, que se distribuyen a lo largo de esta membrana. La máxima deformación se corresponde con un lugar preciso de la membrana basilar para cada una de las frecuencias del sonido.

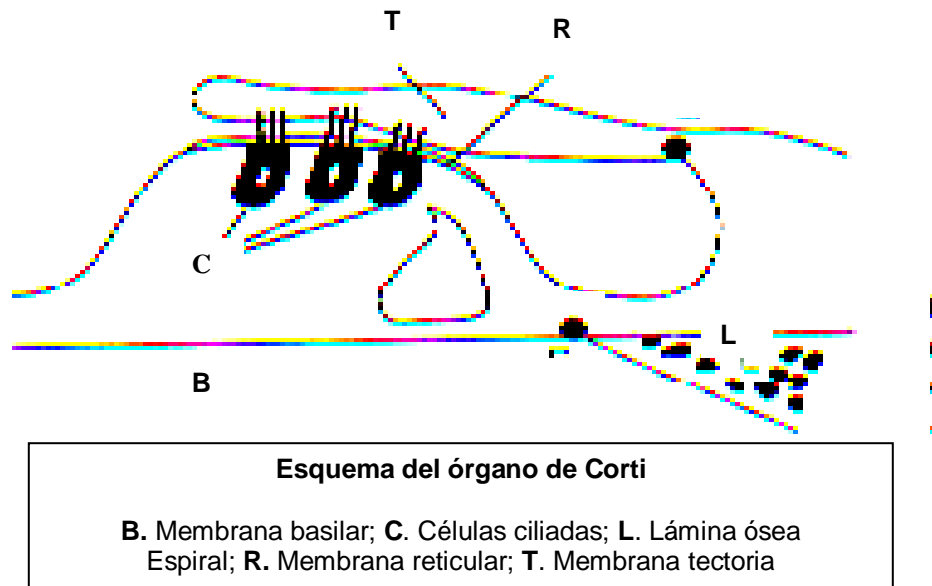
Los sonidos graves, que producen la máxima deformación de la membrana basilar cerca del ápex, tienen su origen en esta parte de la cóclea, en tanto que los sonidos agudos, que producen la deformación máxima en la base, se originan en la región basal de la cóclea; entre ambos extremos se encuentran representados todas las frecuencias audibles.

En los seres humanos jóvenes las frecuencias audibles se extienden entre 16 Hz (en el ápex) y 20000 Hz (en la base).



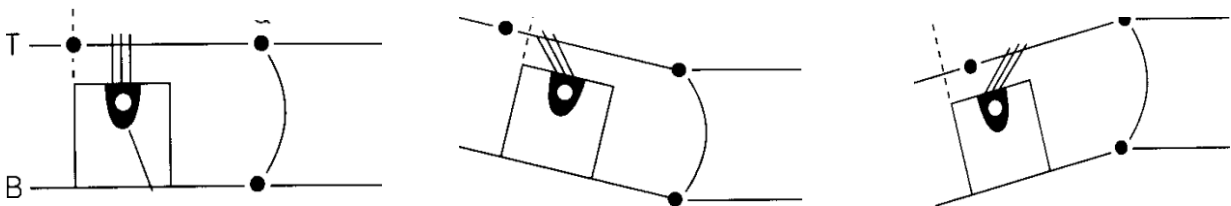
En esta ilustración se muestra la cóclea como si estuviera extendida para poder visualizarla mejor.

Estos movimientos de la membrana basilar determinan cambios en el órgano de Corti que se encuentra apoyado sobre ella, más precisamente cambios en los estereocilios de las células ciliadas.



¿Cómo se transducen los cambios mecánicos de los estereocilios en señales neurales?

Cuando los estereocilios se inclinan en una dirección, la célula se hiperpolariza, en tanto que cuando la inclinación es hacia el lado contrario, se registra una despolarización.

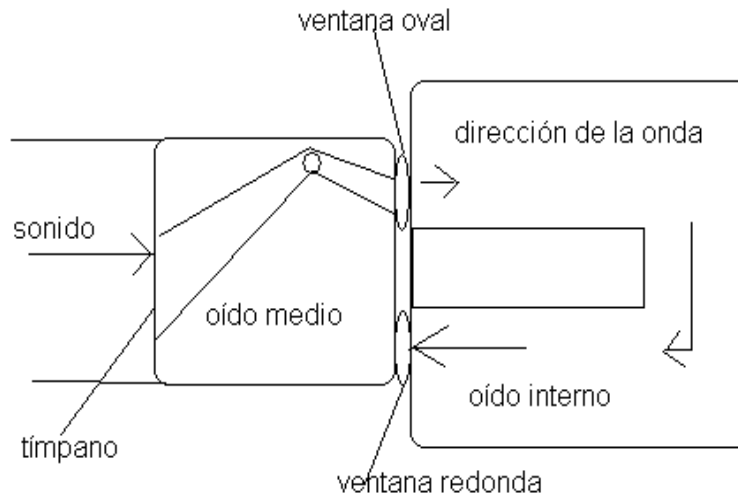


Estas hiperpolarizaciones y despolarizaciones producidas por la inclinación de los estereocilios constituyen el potencial del receptor, que oscila por arriba o por debajo del potencial de reposo cuyos valores son de -45 mV en las células ciliadas internas y de -70 mV en las células ciliadas externas. La diferencia de potencial que se establece entre la endolinfa ($+80$ mV) y el interior de la célula (por ejemplo -45 mV) es de 125 mV, y esa energía puede ser usada para la transducción.

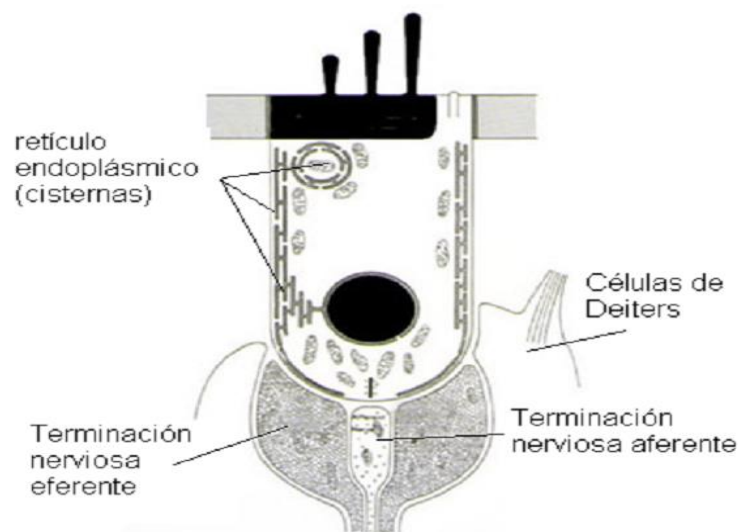
La capacidad de convertir un tipo de energía en otra recibe el nombre de transducción. Al alcanzar las vibraciones el oído interno, movilizan la membrana tectoria y el órgano de Corti por un desplazamiento de la membrana basilar, produciendo así un desplazamiento relativo entre ambas estructuras. Esto hace que los cilios de las células sensoriales se flexionen, desencadenando un potencial bioeléctrico que se transmite hacia la base de las células, donde se

encuentran las sinapsis con las terminaciones nerviosas. Así el oído convierte la energía mecánica del sonido en energía bioeléctrica.

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".



A semejanza del neuroepitelio vestibular, en las células ciliadas del órgano de Corti existen dos tipos de cilios: unos cortos y numerosos (estereocilios) y uno de tamaño mayor (quinocilio) pero que se presenta solo en forma rudimentaria en el órgano de Corti.



La **teoría mecanoeléctrica de Davis** postula que en estado de reposo existe una diferencia de potencial entre ambas superficies de la membrana de la célula ciliada en contacto con la endolinfa, que origina un flujo de corriente a través de la célula, desde su polo apical hasta el basal; este potencial puede generarse en el metabolismo propio de la célula (potencial de membranas) o de otras estructuras vecinas (estría vascular). El desplazamiento de los cilios hace variar la resistencia de la membrana de las células ciliadas a este paso de energía eléctrica.

El desplazamiento de los cilios hacia el quinocilio disminuye la resistencia, entra K^+ a la célula depolarizándola, activando canales de calcio, lo que causa liberación de mediador químico y excitación de la fibra nerviosa. Lo contrario sucede si los cilios se desplazan alejándose del quinocilio (se observa aumento de la resistencia de la membrana).

La sinapsis es activada por mediadores químicos probablemente colinérgicos. La liberación del mediador produce en la terminación nerviosa que contacta con la célula en su base, un estímulo químico que provoca una respuesta eléctrica, que se propaga a lo largo de la membrana del axón como una variación transitoria de polaridad, hasta alcanzar centros nerviosos superiores sin perder su magnitud.

La teoría mecanoeléctrica del funcionamiento de las células ciliadas se basa en el concepto de que la deformación o desplazamiento de los cilios produce un cambio en la impedancia de la membrana celular.

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.

Potenciales eléctricos registrables en la cóclea

Se describen dos tipos de potenciales cocleares:

- a) independientes de estímulos sonoros.
- b) relacionados con el sonido.

En relación con los primeros, si un electrodo adecuado atraviesa las diferentes estructuras del caracol, se puede registrar, cuando penetra en el conducto coclear, un potencial de + 80 mV con respecto a la rampa timpánica, llamado **potencial endococlear**. Se presume que este potencial es generado por secreciones iónicas producidas en la estría vascular.

Cuando el electrodo penetra en la zona del órgano de Corti propiamente dicho, el potencial se hace negativo (- 50 mV). La presencia de estos potenciales es esencial para el funcionamiento normal de las células ciliadas.

Los potenciales relacionados con los sonidos son varios:

1. **El potencial microfónico coclear:** Se obtiene en respuesta a un sonido y es

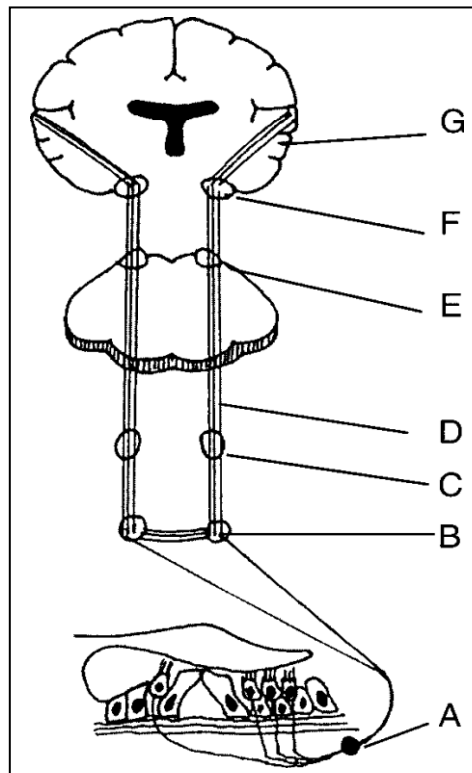
similar al que produce un micrófono, ya que reproduce ciclo a ciclo el sonido estimulante. Se supone que no tiene latencia y su amplitud aumenta paralelamente con la intensidad del sonido. Este potencial puede registrarse desde lejos, por ejemplo, desde la ventana redonda. Pero su origen está en dos generadores diferentes que son las células ciliadas internas y las externas, desde donde un microelectrodo intracelular puede registrar la actividad microfónica.

2. El potencial de suma: Es un cambio de corriente continua producido en la cóclea en respuesta al sonido. Se genera en las células ciliadas externas y también en las internas, y recibe posibles contribuciones de cambios metabólicos de las células de sostén y de la estría vascular.

3. El potencial de acción compuesto del nervio auditivo: Depende de la existencia de un estímulo sonoro. Puede registrarse también en las cercanías del nervio auditivo, por ejemplo desde la ventana redonda. Revela no sólo el grado de excitación de las fibras del nervio auditivo, sino también el grado de sincronización de sus descargas. Cuanto más fibras excitadas y/o sincronizadas, mayor amplitud mostrará este potencial. La amplitud de la onda N1 del potencial de acción compuesto del nervio auditivo es función directa de la intensidad del estímulo y del número de fibras que descargan sincrónicamente.

El camino hacia el cerebro

El sonido se transmite por medio de impulsos electro-químicos generados por los cilios internos y enviados por medio de las fibras de nervios, a través del tronco cerebral hacia la corteza.



VÍA ACÚSTICA
A Órgano de Corti (Ganglio de Corti); **B** Núcleos cocleares; **C** Complejo Olivar Superior; **D** Lemnisco lateral; **E** Colliculus inferior; **F** Cuerpo geniculado; **G** Corteza cerebral.

Los distintos núcleos que se encuentran a lo largo de la ruta hacia la corteza auditiva son los responsables de procesar la información contenida en el sonido. Desempeñan las siguientes funciones:

- Mejoran la señal frente al ruido, disminuyendo el ruido de fondo y enfocando la atención en algunos sonidos (por ejemplo el habla en presencia de ruido).
- Localización (identificando la dirección de la fuente de sonido).
- Procesamiento auditivo tanto de sonidos simples (tonos puros) como complejos, (habla).

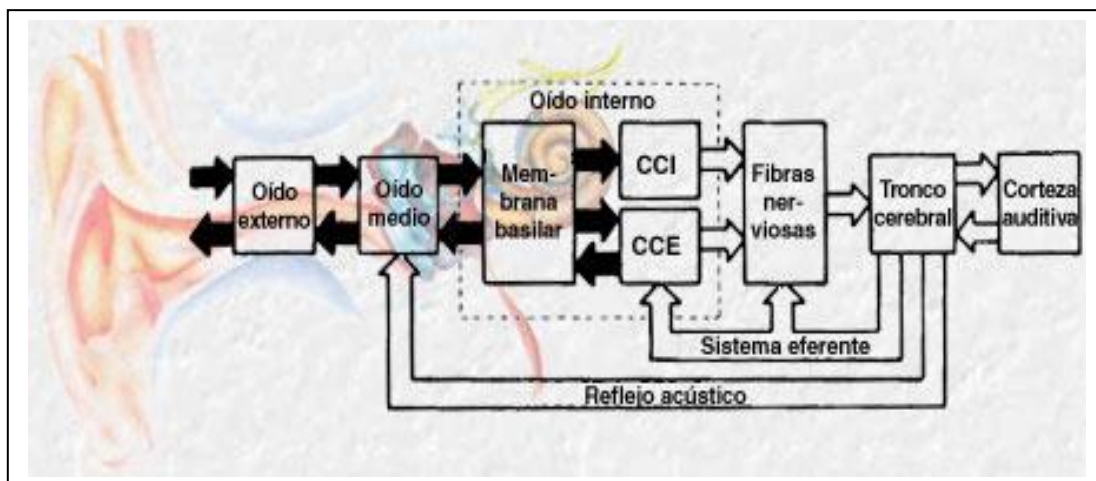
El sonido está organizado por tonos (la frecuencia se determina por su localización en la membrana basilar y en los nervios) a lo largo de todo el sistema nervioso auditivo. La intensidad está codificada por medio del número de fibras nerviosas que se activan y por el ritmo con que se envían los impulsos.

Mecanismos de feedback

El sistema auditivo utiliza varias rutas de feedback para ayudar al oído a adaptarse a distintas situaciones de escucha, tal y como se indica en la figura anterior.

El Sistema Eferente permite al cerebro controlar la sensibilidad del oído por medio de señales de retorno a través de las Fibras Nerviosas Eferentes (EFF). Las EFF controlan los cilios externos de la cóclea para restringir o permitir que las vibraciones alcancen los cilios internos. Este sistema protege el oído en entornos ruidosos a la vez que permite que el oído sea más sensible en entornos tranquilos. También ayuda al oyente a extraer la señal de entre el ruido de fondo.

El tronco cerebral inferior controla el reflejo acústico para reducir la intensidad del sonido bajo ciertas circunstancias. Concretamente, nos protege de los fuertes sonidos que se producen cuando masticamos comida.

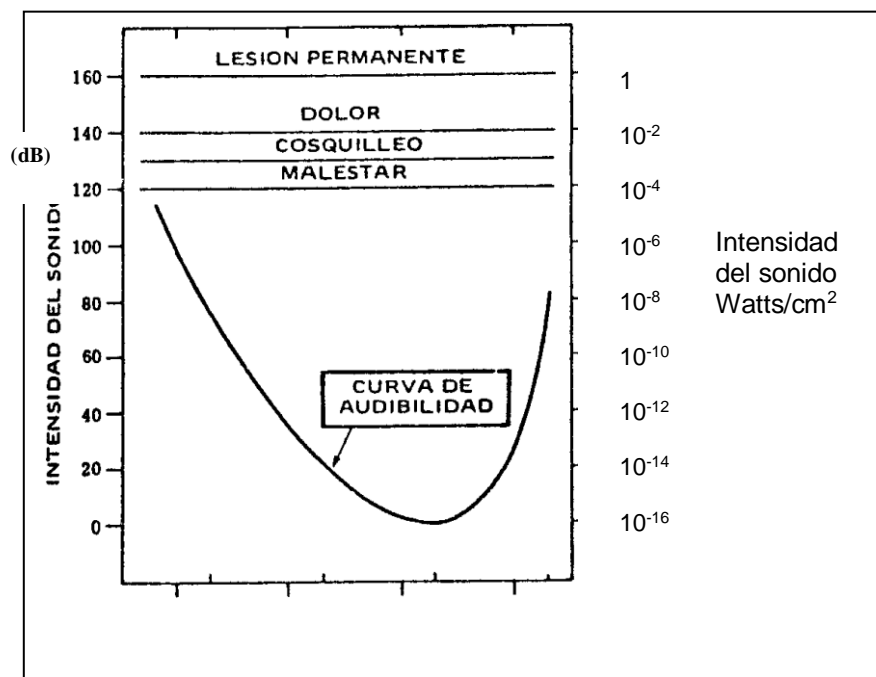


En la última década, se ha descubierto que el oído no sólo procesa sonidos, sino que también produce sonidos (en la figura están representados por flechas negras que apuntan hacia atrás). Estos sonidos (llamados emisiones otoacústicas) se pueden medir, y a veces son audibles, lo cual se piensa que es señal de buena audición. La carencia de determinados tipos de emisiones otoacústicas puede indicar una pérdida auditiva.

Sensaciones de tono

La sonoridad de un sonido es una sensación experimentada por el observador, y, aunque la sonoridad se relaciona con la intensidad del sonido, la relación entre las dos no es sencilla. El oído humano puede percibir ondas transmitidas por el aire si sus frecuencias oscilan entre 20 y 20000 Hz; la gama de intensidades audible por el oído también depende de la frecuencia de la onda. La siguiente figura muestra la gama de frecuencias y sus intensidades que son percibidas como sonido por el oído humano normal; la intensidad de la onda se representa a lo largo del eje y, mientras que la frecuencia de la onda se representa a lo largo del eje x. Una escala muestra las intensidades en vatios/cm². Otra escala muestra las intensidades en función de los cambios de presión en la onda que incide en el tímpano. La curva inferior representa el umbral de audibilidad.

Un punto de esta curva representa el umbral de audibilidad. Un punto de esta curva representa la menor intensidad de un sonido de frecuencia dada que llega a ser audible para el oído. Los puntos situados en la curva superior representan intensidades tan grandes que resultan dolorosas. La región entre las dos curvas representa la escala de audición.



10 100 1000 1000
Frecuencia (Hz)

El oído de las personas mayores es menos agudo, sobre todo en las frecuencias más elevadas. El grado en que un oído sensible puede distinguir entre dos notas puras que difieran ligeramente en intensidad o frecuencia varía en los diferentes rangos de intensidad y frecuencia de los tonos. En sonidos de intensidad moderada situados en el rango de frecuencia para el que el oído es más sensible (entre 1.000 y 2.000 Hz aproximadamente), es posible distinguir una diferencia de intensidad de un 20% (1 decibel) y una diferencia en frecuencia de un 0,33% (alrededor de una vigésima de nota). En este mismo rango, la diferencia entre el sonido más tenue que puede oírse y el sonido más fuerte que puede distinguirse como tal sonido (los sonidos más fuertes se 'sienten', o perciben, como estímulos dolorosos) es de unos 120 decibeles, una diferencia de intensidad de aproximadamente un millón de veces.

Todas estas pruebas de sensibilidad se refieren a tonos puros, como los producidos por un oscilador electrónico. Incluso para esos tonos puros, el oído es imperfecto. Dos notas con frecuencia idéntica pero una gran diferencia de intensidad pueden aparentar una ligera diferencia de tono. Más importante resulta la diferencia en las intensidades relativas aparentes en las distintas frecuencias.

A intensidades altas, el oído es aproximadamente igual de sensible a la mayoría de las frecuencias, pero a bajas intensidades el oído es mucho más sensible a las frecuencias medias que a las extremas.

Por tanto, un equipo de reproducción de sonido que funciona perfectamente parecerá no reproducir las notas más graves y agudas si se reduce mucho la intensidad.

Debido a la dirección de la onda que se propaga (de las altas a las bajas frecuencias) y al incremento en el número de fibras nerviosas que se activan, los sonidos intensos de bajas frecuencias tienden a enmascarar a los sonidos de altas frecuencias. Como consecuencia, cuando estamos en presencia de un constante ruido de fondo (bajas frecuencias), este fenómeno impide o dificulta la percepción de los suaves pero muy importantes sonidos de altas frecuencias, los cuales son indispensables para asegurar la inteligibilidad del habla.

Enmascaramiento

Cuando un sonido débil queda tapado por un sonido más fuerte, se dice que queda enmascarado por él. El sonido fuerte se denomina enmascarador, y el débil enmascarado o señal. El enmascaramiento puede asimilarse a un defecto de audición: el enmascarador aumenta nuestro umbral de audición, es decir incrementa la intensidad que tiene que tener el sonido para que lo podamos oír.

Un sonido intenso y grave puede enmascarar un sonido débil y agudo, pero lo contrario no sucede. Esto se debe al funcionamiento del oído interno. El punto de máxima excitación de la membrana basilar para tonos de baja frecuencia está en

el extremo apical de la cóclea y para tonos de alta frecuencia en el extremo basal. La onda excitada por un tono de alta frecuencia no alcanzará nunca el punto de un tono de baja frecuencia. Por el contrario, para llegar a su punto receptor, las ondas producidas por tonos de bajas frecuencias han de pasar por los puntos receptores de frecuencias mayores. Por tanto, cabe esperar que la excitación de la membrana basilar en estos puntos pueda interferir con la percepción de tonos de alta frecuencia, y esto es lo que sucede precisamente si el tono de baja frecuencia es lo suficientemente intenso.

Hipoacusia

La hipoacusia es la disminución del nivel de audición de una persona por debajo de lo normal.

Actualmente en el mundo nace un niño sordo por cada 1000 nacidos vivos. De los nacidos vivos sanos, uno cada 1000 desarrollará hipoacusia en el transcurso de su vida. Esta alteración afecta de forma especial a las personas que la padecen ya que su integración en la sociedad es muy difícil. Alrededor de un 10% de la población padece problemas de audición. Afecta a todas las edades y sus consecuencias son leves o graves. Un 1% de la población es *sordo profundo*, es decir, tiene una pérdida de audición tan importante que no se beneficia de aparatos de amplificación. Los *duros de oído* o *sordos leves y moderados* pueden beneficiarse, en grado variable, de los audífonos.

Trauma acústico

Hace tiempo, se descubrió que las personas que trabajaban en ámbitos ruidosos, luego de un lapso de años, comenzaban a perder audición. Esto era muy evidente en los operarios de fábricas ruidosas (antes la mayoría lo eran) y en los que manejaban martillos neumáticos.

Simultáneamente se observaba que los tractoristas también sufrían el mismo síndrome (conjunto de síntomas y signos que caracterizan una enfermedad). Sin embargo, en algunos casos, el ruido no era tan intenso como para compararlo con el de una fábrica. Esto llevó a la conclusión de que no era sólo el ruido el factor dañino, sino la vibración que la onda sonora determina.

Actualmente, el tema es conocido, aun cuando todavía socialmente no se han tomado todas las previsiones debidas.

Hoy sabemos que el escuchar música fuerte en un 'boliche bailable' o escuchar walkmans es potencialmente peligroso.

A tal punto, que es posible que ruidos de menor intensidad puedan causar hipoacusias más silenciosas y que se superponen a otras ya conocidas. Este es el caso de la Presbiacusia, la cual es una hipoacusia perceptiva por progresivo deterioro del Órgano de Corti, a partir de los 45 años.

Hoy se discute la posibilidad si las llamadas presbiacusias no incluirían entre sus factores causales, trauma acústico de intensidad menor al de una fábrica.

Sea como fuere, si una persona tiene un deterioro auditivo de tipo perceptivo, producido por cualquier causa, tendrá más posibilidades de incrementar su

deterioro si se expone a ruidos, drogas ototóxicas, trauma craneano, que una persona normal.

La norma ISO 1999, define "déficit auditivo" (hipoacusia) como el aumento permanente del umbral auditivo. Siendo el umbral auditivo el mínimo nivel sonoro audible suficientemente importante como para afectar la inteligibilidad de la palabra (este aumento resulta ser de alrededor de 25 dB para los tonos de frecuencias medias).

Si bien, la exposición al ruido produce daños relacionados con la sensibilidad propia de cada individuo, en la mayoría de los casos se puede correlacionar la intensidad del ruido con la cantidad de años y obtener un porcentaje de déficit. (lo que sigue está relacionado con personas que trabajan 48 horas semanales en ámbitos ruidosos).

Así, una persona que trabajó 10 años, con una intensidad de 90 dB de ruido, podrá tener un 10% de pérdida auditiva.

En cambio si el ruido fue mas intenso, por ejemplo de 115 dB, en 10 años, la pérdida será de 26%.

Hay tres factores que inciden en el trauma acústico:

1. intensidad sonora: particularmente mayores a 90 dB, causan deterioro de las células ciliadas del Órgano de Corti.
2. duración del ruido: en horas por día y durante años.
3. labilidad coclear: entre oídos sanos, siempre hay unos más vulnerables que otros a la misma intensidad sonora. De hecho, si un oído tiene un deterioro previo al trauma acústico, sufrirá más el mismo.

Grados en que se clasifica el avance del trauma acústico

1. La vía ósea tiene umbral elevado en el tono 4.000, con recuperación en el 8.000. En ésta etapa, los acúfenos de tono agudo, particularmente molestos a la noche cuando se halla en silencio y que a la mañana siguiente desaparecen. Responden a irritación de las células ciliadas que se recupera durante la noche. Esto también ocurre los fines de semana, en que la persona no trabaja. El paciente no nota que escucha menos, ya que la elevación del umbral de audición es leve a moderada y en un solo tono, el 4.000, con poco compromiso del área de la palabra (se llama área de la palabra, al área de tonos que utiliza la palabra hablada).

2. La vía ósea tiene umbral elevado en el tono 2.000, más en el 4.000 y el 8.000 no presenta recuperación de umbral, situándose en un mismo nivel que el 4.000. El acúfeno es permanente y no cede de noche ni en los fines de semana. El paciente reconoce escuchar menos.

3. Los tonos a partir del 500 en adelante muestran incremento del umbral de audibilidad. En éste estadio, el paciente sufre particularmente la hipoacusia, más que el acúfeno. Incluso puede experimentar mareos y especialmente alteraciones psicológicas.

La protección sonora de los dispositivos (tapones, auriculares) no es completa y sólo es útil cuando la patología no está instalada. En pacientes afectados de acutrauma (trauma acústico), deberán ser alejados del ámbito ruidoso, ya que tarde o temprano sobrevendrá la pérdida de la audición.

Clasificación y etiología de las hipoacusias

Se distinguen 4 tipos:

- **Transmisión o de conducción**
- **sensorineural**
- **mixta**
- **central**

La **hipoacusia de transmisión o de conducción**, se produce cuando la transmisión del sonido desde el oído externo hasta la ventana oval (límite fisiológico del oído medio con el oído interno) está alterada por cualquier causa. De éste modo, si bien el oído interno sano puede percibir el sonido, no le llega. Puede mejorar con **audífonos** y puede corregirse con tratamiento médico o quirúrgico.

En la **hipoacusia sensorineural** la conducción del sonido hasta la ventana oval es normal, pero existe una lesión a nivel del caracol, nervio auditivo o vías nerviosas centrales. Aquí el sonido es conducido hasta el oído interno, pero falla la percepción. En ellas, lo que falla no es la conducción del sonido, sino que cuando el sonido llega al oído interno, pueden suceder varias posibilidades:

- *Lesión del oído interno:* que el oído interno no tenga capacidad para percibirlo, por una lesión del órgano de Corti.
- *Lesión en el nervio auditivo:* que el oído interno funcione bien, pero el nervio auditivo que lleva la información del oído interno al cerebro, esté dañado.
- *Lesiones cerebrales:* que el oído interno y el nervio funcionen bien pero estén dañados las áreas cerebrales encargadas de procesar la información, o bien lesiones en todos los elementos citados.

La pérdida auditiva es mayor en unas frecuencias que en otras y queda distorsionada la percepción sonora aunque el sonido se amplifique. En este caso, los audífonos no son útiles.

La **hipoacusia mixta** se produce por problemas tanto en el oído externo o medio como en el interno.

La sordera puede ser debida a una enfermedad, a un accidente, o congénita. La exposición continua o frecuente a niveles de sonido superiores a 85 decibelios (dB) puede causar sordera sensorineural progresiva.

Exploración de la audición

Conociendo los diferentes tipos de hipoacusia, de acuerdo a la zona afectada del oído, tenemos que la audición puede ser medida de diferentes maneras.

Pruebas subjetivas

Son llamadas subjetivas porque su resultados depende de la participación del paciente en responder si escucha o no el sonido emitido por distintos mecanismos. De estas pruebas veremos las siguientes:

Acumetría

Son exámenes que se basan en instrumentos simples como los diapasones. Aquí no se utilizan medios electrónicos.

Acumetría con diapasones: El diapasón es un instrumento de acero, que consta de dos ramas iguales y paralelas unidas en un extremo por un mango recto. Ambas ramas entran en vibración al ser golpeadas, generando de este modo un tono puro. Las frecuencias más usadas son 256, 512 y 1024 Hz. No sirven para cuantificar la pérdida de audición, pero son de suma utilidad en el topodiagnóstico de la lesión, ya que nos indican el tipo de hipoacusia que presenta el paciente. Para ello debemos conocer las dos principales pruebas con diapasones para realizar topodiagnóstico.

➤ **Prueba de Rinne:** consiste en comparar la vía ósea (VO) apoyando el mango del diapasón sobre la apófisis mastoidea con la vía aérea (VA), colocando el diapasón a 3 cm. del pabellón auricular. Normalmente el sonido se percibe con mayor intensidad por vía aérea (recordemos que es debido a todos los mecanismos amplificatorios del oído medio). Cuando el paciente oye mejor por vía aérea el Rinne es + (positivo).

VA > VO = RINNE (+) = oído normal

Cuando tenemos una respuesta inversa, el Rinne es negativo. Clínicamente habla de una hipoacusia de conducción, ya que existe alguna patología que anula los mecanismos de amplificación, razón por la cual se escucha mejor por la vía ósea.

VA < VO = RINNE (-) = hipoacusia de transmisión

La patología debe producir una pérdida auditiva de 25 dB o más para que el Rinne sea negativo.

Cuando el paciente oye mejor por la vía aérea que por la vía ósea brevemente o cuando sólo oye por la vía aérea se debe pensar en una hipoacusia de percepción. Esto se llama Rinne (+) acortado.

VA > VO = RINNE (+) acortado = hipoacusia de percepción

Por último cuando las vías aéreas y ósea son percibidas como de igual intensidad se debe pensar en una hipoacusia de conducción de menos de 20 dB de pérdida, este es el **Rinne =**.

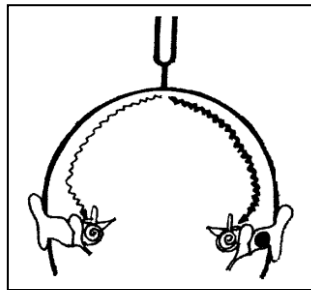
➤ **Prueba de Weber:** se basa en la activación simultánea de la vía ósea en forma bilateral, esto se logra apoyando el mango del diapasón activado en algún lugar central de la calota craneana, especialmente la frente. Realizada la maniobra se le consulta al paciente hacia donde se dirige la sensación sonora, si lateraliza hacia algún oído o si lo percibe más intenso en algún lado.

El Weber es indiferente cuando el sonido es percibido igual con ambos oídos, o se percibe en el medio de la cabeza. Esto significa normalidad o hipoacusia de igual intensidad bilateral ya que ambos oídos fueron estimulados simultáneamente.

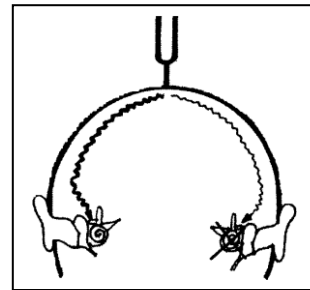
Cuando existe una hipoacusia de percepción el Weber lateraliza al lado sano, ya que la cóclea enferma es incapaz de recibir el sonido en igualdad de condiciones que el otro lado. Weber lateralizado al lado sano = hipoacusia perceptiva contralateral.

En cambio si hay una hipoacusia de conducción, el Weber lateraliza al lado enfermo, debido a que existe una mejor vía ósea absoluta (hay como una especie de retumbe o refuerzo del sonido en el lado taponado o enfermo, por lo cual paradójicamente se oye mejor).

Weber lateralizado al lado enfermo = hipoacusia conductiva homolateral.



Prueba de Weber que lateraliza hacia el lado enfermo. Hipoacusia conductiva contralateral (en el esquema por tapón de cera)



Prueba de Weber que lateraliza hacia el lado sano. Hipoacusia perceptiva

Audiometría

Es una técnica que se emplea para medir la audición. Los audiómetros, instrumentos para efectuar dicha medición, son utilizados por especialistas del oído, nariz y garganta, otorrinolaringólogos (ORL), técnicos auditivos que trabajan en departamentos de ORL de hospitales y otros centros, médicos generales y todos aquellos relacionados con las pruebas de audición y el diagnóstico selectivo de la sordera, en especial en los niños. El audiómetro es un instrumento sencillo que produce tonos puros de varias frecuencias determinadas que pueden ser escuchados a través de auriculares. La persona que está siendo examinada se suele encerrar en una cabina insonorizada que elimina los ruidos externos y está provista de un interruptor (ver Fig). Cada oído se estudia de forma independiente.

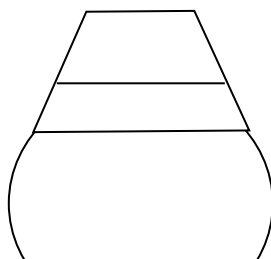


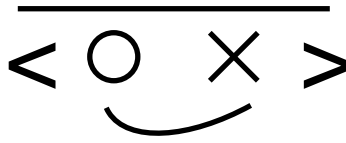
En esta imagen observamos al profesional frente al audiómetro y al paciente dentro de una cabina insonorizada.

Cada vez se emite un tono con una intensidad suficiente como para ser escuchado con facilidad y después se desciende el volumen de forma gradual. En el instante en el que el tono deja de ser oído, la persona que está siendo examinada presiona el botón. Esto indica a la máquina el nivel más bajo a partir del cual el sujeto deja de escuchar un tono de dicha frecuencia. El operario puede variar las frecuencias y el proceso se repite con cada una de ellas. Por lo general, la sensibilidad se puede examinar a frecuencias de 125 Hz (hercios o ciclos por segundo), 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz, 8.000 Hz y 12.000 Hz. Otra forma alternativa a la escucha a través de auriculares es el examen de la audición por conducción ósea. En este caso, los auriculares se sustituyen por vibradores recubiertos de goma que hacen presión contra el hueso por detrás de la zona inferior de la oreja. Estos dispositivos producen vibraciones en un rango de frecuencias similar.

El audiómetro imprime automáticamente los resultados de la prueba en una ficha que se conoce como **audiograma**. Éste presenta una escala para cada oído que muestra las frecuencias a las cuales se ha efectuado la prueba e indica el nivel inferior normal para cada una de ellas de forma independiente.

Existe un sistema de símbolos establecidos convencionalmente para las vías aéreas y óseas de cada oído y un color para cada uno, así el oído izquierdo es **azul** en la anotación y el derecho es **rojo**. Esta simbología es conocida como Monigote de Fowler.





Monigote de Fowler

La audición nunca es uniforme en todas las frecuencias y suele variar mucho con cada una de ellas. La sensibilidad se exhibe en decibelios por debajo de lo normal, que viene representado por el 0, que es el valor normal en adultos jóvenes. La escala desciende de 10 en 10 decibelios hasta los 100 decibelios —donde el decibelio es la unidad comparativa de la intensidad del sonido—, un nivel indicativo de sordera casi total.

Hay que destacar que cada frecuencia tiene un umbral diferente ya que la sensibilidad auditiva así lo determina, pero por convención y a los fines prácticos todos los umbrales tanto óseos como aéreos han sido llevados a 0 (cero), igualándose ambas vías, ósea y aérea (fisiológicamente la ósea es unos 30 dB menor que la vía aérea, por los mecanismos amplificatorios).

Esta audiometría es la llamada tonal o liminar, donde se busca determinar el umbral o lo que es lo mismo, la mínima intensidad en dB, a que es percibido cada tono, determinando además de acuerdo a la zona del audiograma distintos grados de pérdida auditiva. Por otro lado también nos permite determinar normalidad (Fig. A) o anormalidad (Fig. B,C y D).

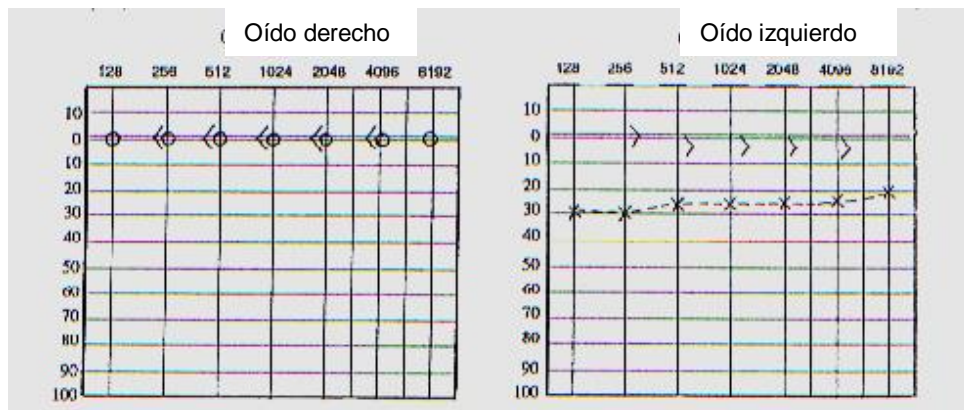


Fig. A : Audiograma Normal

Fig. B : Audiograma con hipoacusia de conducción

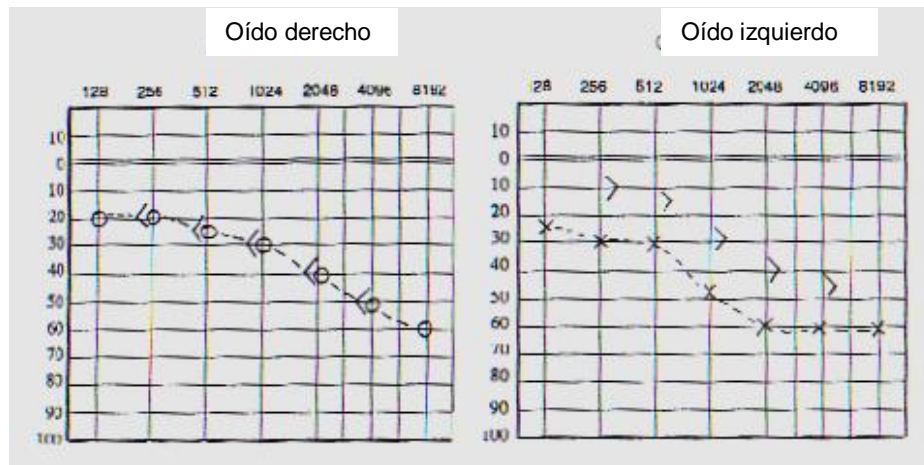


Fig. C: Audiograma con hipoacusia de percepción

Fig. D: Audiograma con hipoacusia mixta

Los audiómetros se fabrican en una amplia gama de formas y tamaños, desde instrumentos portátiles, casi de bolsillo, hasta grandes máquinas que requieren su propia mesa o carrito. La tendencia es hacia la disminución del tamaño y la mayor parte se pueden utilizar sobre una mesa. Todos están equipados con botones u otros mecanismos para variar las frecuencias y las amplitudes y con algún tipo de indicador que muestra su posición. También está dotado de un dispositivo que imprime el audiograma, lo que se suele hacer en unas fichas estándar. Esto proporciona un registro exacto y permanente de la prueba realizada al paciente en una fecha determinada.

En su interior, el audiómetro está formado por un oscilador de audio de frecuencia variable transistorizado —que suele ser un dispositivo sencillo de retroalimentación— capaz de producir una señal sinusoidal (casi una onda senoide). La señal senoide es necesaria y como otras ondas presenta armonía a distintas frecuencias.

Pruebas Objetivas

Son pruebas donde, a través de un estímulo sonoro, se mide la respuesta del sistema auditivo, y esta respuesta no depende de la percepción del paciente.

Algunas de estas pruebas son:

Impedanciometría

La impedancia es la resistencia que debe vencer la onda sonora al atravesar el sistema timpanoosicular del oído medio. La prueba consiste en ocluir el conducto auditivo externo (CAE) con un tap o chupete y aplicar presiones positivas desde 200 mm de agua hasta presiones negativas de 400 mm de agua, para ver el movimiento del sistema timpanoosicular. A través de este estudio podemos analizar:

➤ Reflejo acústico: Un sonido que supere los 70 u 80 dB, genera una contracción del músculo del estribo, aumentando la rigidez de la cadena para proteger el oído interno de los ruidos intensos. El reflejo auditivo está ausente en:

- Hipoacusias profundas, ya que resulta imposible estimular a 70 u 80 dB sobre el umbral.
- Disrupción de la cadena osicular.
- Ocupación del oído medio (sangre, pus, líquido seroso).
- Timpanoesclerosis (rigidez de la membrana por degeneración de la capa elástica).
- Otoesclerosis.

➤ Compliancia timpánica: Es la capacidad de moverse del sistema timpanoosicular que se traduce en un timpanograma. La compliancia normal es de 0,3 a 0,7 cm³. El punto de mayor compliancia es cuando el tímpano tiene similar presión por fuera que por dentro, es decir en su posición de reposo (entre - 50 y + 50 mm de agua).

Potenciales evocados auditivos

Son un conjunto de pruebas que permiten determinar de una manera rápida y segura, los umbrales auditivos, los tipos de hipoacusias y el topodiagnóstico de la lesión.

Frente a un estímulo acústico es posible detectar gracias a un electrodo ubicado en el promontorio óseo de la cóclea, la actividad eléctrica del oído interno y de la rama coclear del VIII par craneal, y por medio de electrodos de superficie en la piel del cráneo, la actividad eléctrica de las diferentes neuronas de la vía auditiva, a una distancia considerable del lugar de generación.

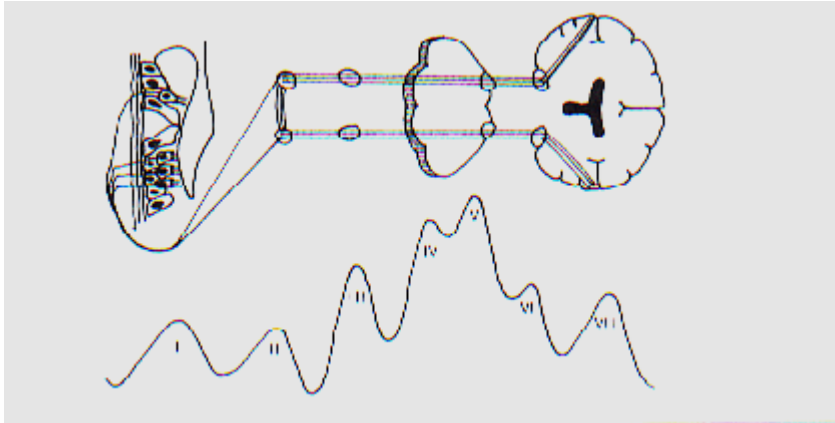
Estas respuestas o potenciales eléctricos, se transmiten con un retardo de 1 ms aproximadamente en cada sinapsis dando una serie de ondas con características propias. Del análisis de ellas es posible extraer conclusiones objetivas sobre las alteraciones que sufre el sistema frente a diferentes patologías.

Estos estudios en definitiva detectan los cambios eléctricos generados luego del estímulo acústico, y aparecen en una pantalla como ondas, con picos y valles. En ellos se puede identificar las estructuras de la vía activada, la amplitud eléctrica de la misma y obtener el tiempo que tardó en estimularse dicha estación neuronal.

La B.E.R.A. (Brainstem Evoked Responses Audiometry) es la respuesta evocada del tronco cerebral y es la prueba más difundida dentro de los potenciales evocados. Originan 5 ondas principales casi siempre constantes, denominadas T1 a T5 (Ver Fig. debajo)

Esquemas de ondas del B.E.R.A.

- Onda I: Nervio auditivo
- Onda II: Núcleo coclear
- Onda III: Núcleo olivar superior
- Onda IV: Lemnisco lateral
- Onda V: Colliculus inferior
- Onda VI: Cuerpo geniculado
- Onda VII: Corteza



Cada onda presenta una latencia determinada y del análisis de este parámetro y la morfología de la onda se pueden detectar patologías endo y retrococleares con gran certeza y establecer umbrales.

FONACIÓN

Los órganos de la fonación son: pulmones, laringe, faringe, nariz y boca. La laringe, faringe y boca (y en los sonidos nasales también la nariz), constituyen el tracto bucal, el cual tiene función de cámara de resonancia, semejante a la que podría producir, por ejemplo, el cuerpo de un violín. Los movimientos de los labios, mandíbula y lengua constriñen o dilatan el tracto bucal y la protrusión de los labios o el descenso de la laringe produce aumento en la longitud del mismo. Todos estos hechos modifican la resonancia dentro del tracto.

El órgano de la voz consta de tres partes:

1. **Pulmón**, que aporta un exceso de presión al aire que atraviesa las cuerdas vocales (140-240 mmH₂O).
2. **Oscilador**, (cuerdas vocales).
3. **Resonador**, (el tracto bucal).

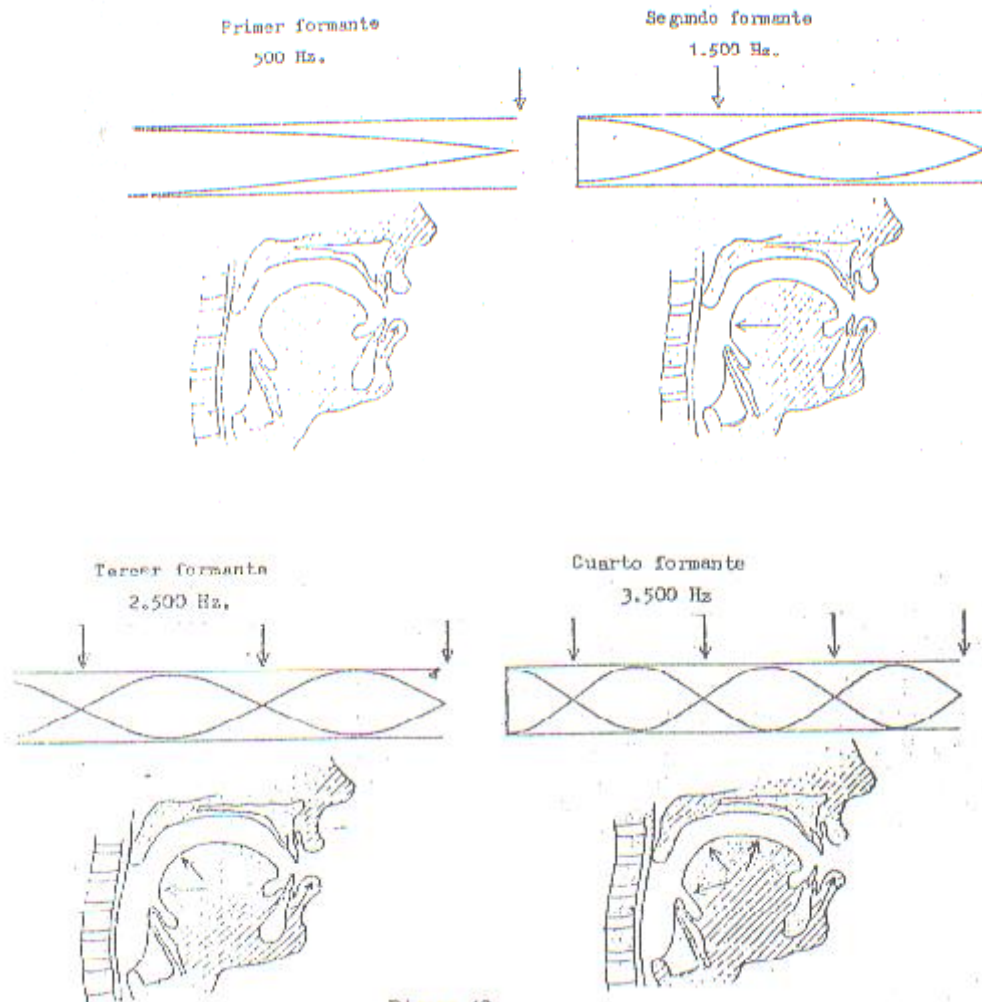
El exceso de presión del aire debajo de la glotis, fuerza a las cuerdas vocales a separarse. El aire que pasa entre las cuerdas vocales genera una fuerza de Bernouille, la cual inmediatamente cierra la glotis. Luego la presión del aire que arriba nuevamente la abre, y así sucesivamente. La frecuencia de vibración está dada por la presión del aire en los pulmones y por las propiedades mecánicas de las cuerdas vocales, las cuales a su vez están reguladas por los músculos laríngeos. El sonido generado por las cuerdas vocales está compuesto por una **frecuencia fundamental** (determinado por la frecuencia de vibración de las cuerdas vocales), y por armónicos o sobretonos. La amplitud de las ondas generadas en la laringe desciende con la frecuencia.

El tracto bucal tiene 4 importantes medios de vibración o resonancia llamados "formantes". Estos son producidos por la oscilación de las columnas de aire en el

tracto bucal.

Dicha oclusión puede ser producida por los **labios**, **punta** de la lengua, **base** o **cuerpo** de la misma.

Como resultado de dichas oclusiones parciales se generan ondas estacionarias (formantes) los cuales tienen una frecuencia de 500 – 1500 – 2500 - 3500 Hertz. La presencia de los formantes **modula** al sonido producido en las cuerdas vocales. Es esta perturbación del sonido original la que produce la voz.



Se puede concluir que: el sonido inarticulado producido por las cuerdas vocales, es modificado en su altura, timbre e intensidad por el aparato resonador.

ACTIVIDAD PRÁCTICA

- 1) Realice junto con sus compañeros la acumetría con diapasones (Rinne y Weber).
- 2) Efectúe una audiometría en base al programa que se encuentra en el siguiente sitio de Internet:
<http://www.sinfomed.org.ar/Mains/infopaci/audiome2.htm>, en la planilla que le proveerá su J.T.P. y con los símbolos del monigote de Fowler.

PREGUNTAS MODELO

El nivel de ruido tolerable para el ser humano es de unos 70 dB. Si la intensidad del sonido aproximada de un lavarropas es de 10^{-3} W/ m^2 , señale cual es su intensidad relativa, y si supera el nivel tolerable.

- a) 50 dB y supera el nivel tolerable
- b) 70 dB y no lo supera
- c) 90 dB y supera el nivel tolerable
- d) 120 dB y no lo supera
- e) 100 dB y si lo supera

Analice las siguientes afirmaciones respecto a los mecanismos biofísicos que se dan en el oído interno, indique cuál es verdadera (V) y cuál es falsa (F) y luego señale la secuencia correcta:

La membrana de la ventana oval, empujada por los huesecillos, genera una onda de presión que se propaga por la perilinfa en la rampa vestibular.
Distintas frecuencias sonoras excitan diferentes poblaciones de células ciliadas y fibras nerviosas lo que contribuye a su discriminación sonora.
Los sonidos graves se discriminan en la región basal de la cóclea y los sonidos agudos en la membrana basilar cerca del ápex.
La excitación acústica de los componentes del oído interno genera un potencial denominado microfonía coclear.

- a) V V F V
- b) V V V V
- c) F V F V
- d) F F F V
- e) V V V F