

Desarrollo de un prototipo de prótesis auditiva por transmisión ósea para humanos con daños en la sección externa y media del oído

Development of an Auditory Prosthesis Prototype for Bone Conduction in Humans with Damages in the External and Media Hearing System

Recibido: 11 de noviembre de 2013 • Aprobado: 21 de febrero de 2014

Para citar este artículo: M. Herrera, J. Casas, I. Guevara, «Desarrollo de un prototipo de prótesis auditiva por transmisión ósea para humanos con daños en la sección externa y media del oído», *Ingenium*, vol. 15, n.º 29, pp. 17-36, mayo, 2014.



Marcelo Herrera Martínez*,
Julián Casas**, Isaías Guevara***

Resumen

Este trabajo describe el desarrollo de un sistema, el cual puede ser usado para la transmisión de señales acústicas a través de conducción ósea, con el objetivo de recuperar y/o ampliar la audibilidad en personas con deficiencias o limitaciones auditivas. El prototipo permite recuperar la capacidad auditiva con un método no-convencional.

Palabras clave

Transmisión ósea, acústica, transmisión de señales, impedimentos auditivos, modelamiento del sistema auditivo humano.

* Ph. D. Acústica, Universidad Técnica de Praga y Magister en Radioelectrónica. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá. Líder de Semillero, «Sistemas de Compresión Perceptual de Audio». E-mail: mherrera@usbog.edu.co.

** Estudiante de pregrado de Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura, miembro del Semillero de Investigación «Sistemas de Prótesis Auditivas».

*** Estudiante de pregrado de Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura, miembro del Semillero de Investigación «Sistemas de Prótesis Auditivas».

Abstract

This work describes the development of a system, which can be useful for the transmission of acoustic signals through bone conduction, for the aim of recovering and/or enhancing audibility in persons with hearing impairment. The prototype provides an alternative possibility to enable recovery of auditory information with a non-conventional method.

Keywords

Bone conduction, acoustics, signal transmission, hearing impairments, modelling of the HHS (human hearing system).

I. Introducción

La recuperación de información acústica debido a fallas o pérdidas en el Sistema Auditivo Humano es uno de los temas de investigación y desarrollo de varios institutos en el mundo actual. Para empezar, es necesario identificar los componentes individuales anatómicos que se presentan durante el proceso de la audición; su importancia se determina al identificar posibles problemas que afecten secciones del oído, y al conocer su funcionalidad y modo de operación durante la escucha y su comportamiento anatómico, se puede dar una solución mucho más acertada al problema en cuestión.

Por lo tanto, el paso inicial es identificar las secciones que componen en totalidad los sistemas auditivo y vestibular. La función del sistema auditivo es transducir el sonido; este nos permite involucrarnos con el ambiente que existe alrededor, así como también la comunicación con otros organismos, mientras que la función del sistema vestibular es proporcionar información acerca de los movimientos y la posición de la cabeza en el espacio.

Se debe identificar que el oído joven y sano presenta una sensibilidad a tonos puros con frecuencias de un rango entre 20 Hz a 20 KHz, pero que el umbral de detección de los tonos puros varía con respecto a la frecuencia que excita al sistema auditivo. De acuerdo con esto, años de evolución y adaptación del cuerpo humano han hecho que el oído tenga mayor sensibilidad en el mismo rango de frecuencias que los del habla; esto, debido a que el organismo busca de forma principal (por medio del sistema auditivo) la comunicación con su entorno; para esto (y como es de gran utilidad en el proyecto propuesto) es necesario determinar que el rango frecuencial de 300 Hz a 3500 Hz corresponde al rango de la voz humana.

Existen niveles de presión sonora que resultan perjudiciales para el sistema auditivo periférico [1], estos también están condicionados a un periodo de exposición, según el cual pueden causar más o menos daño, dependiendo de la magnitud de la presión sonora y la magnitud del periodo de exposición, pero a modo de explicación se toma el umbral de daño desde los 100 fones y el umbral de dolor a partir de los 120 fones.

Está determinado clínicamente que el individuo va envejeciendo; este va perdiendo sensibilidad en los rangos altos de frecuencias dando a lugar a la condición denominada Presbiacusia.

II. Partes del oído humano

Ahora pues, nos debemos centrar en el aparato auditivo periférico: el oído, el cual puede subdividirse en tres secciones, el oído externo, oído medio y oído interno [2].

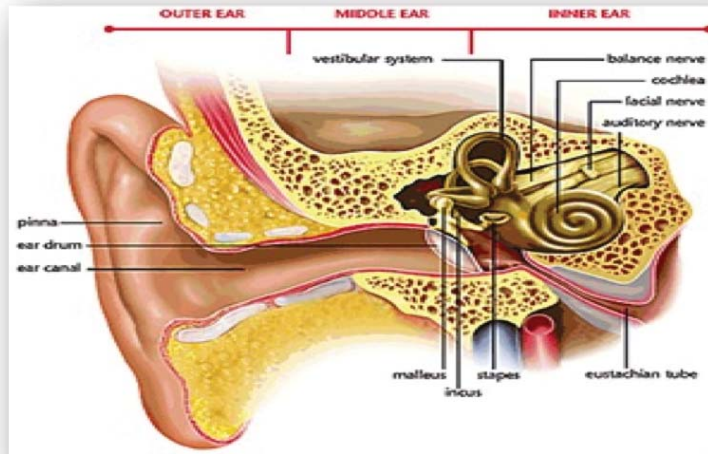


Figura 1. Partes del oído humano [2].

A. Oído externo

El oído externo contiene dentro de su categorización, la pinna, el orificio auditivo externo y el conducto o canal auditivo. La forma de la pinna ayuda a dirigir el sonido al interior del canal auditivo y determina también la directividad y localización del sonido desde su lugar de procedencia con respecto a la posición de la cabeza; cuando las ondas llegan al conducto auditivo, estas transmiten las variaciones de presión a la membrana timpánica [3, 4]. El canal auditivo segrega cerumen; esta es una sustancia cerosa protectora del mismo que bloquea objetos extraños que pueden dañar o afectar la membrana timpánica. Se determina que en los seres humanos el conducto auditivo tiene una frecuencia de resonancia de unos 3500 Hz.

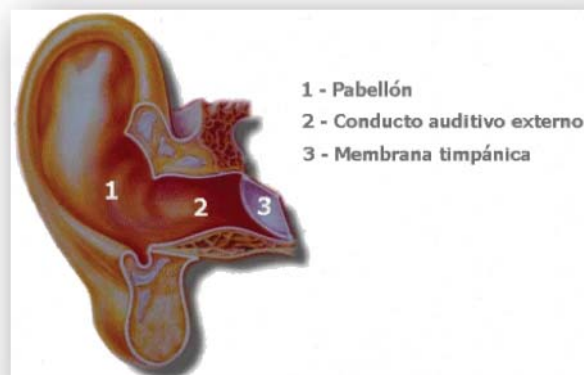


Figura 2. Configuración del oído externo [2].

B. Oído medio

El oído medio se separa por medio de la membrana timpánica del oído externo (que tiene una dimensión de 9 a 10 milímetros), pero se debe mencionar que aunque estos estén separados por dicha membrana, esta contiene gran volumen de aire en su interior. Una cadena de huesecillos conecta la membrana timpánica con la ventana oval que es una apertura en el oído interno. Justo al lado de la ventana oval se encuentra la ventana redonda que es otra apertura cubierta por una membrana que separa y determina la sección media e interna del oído.

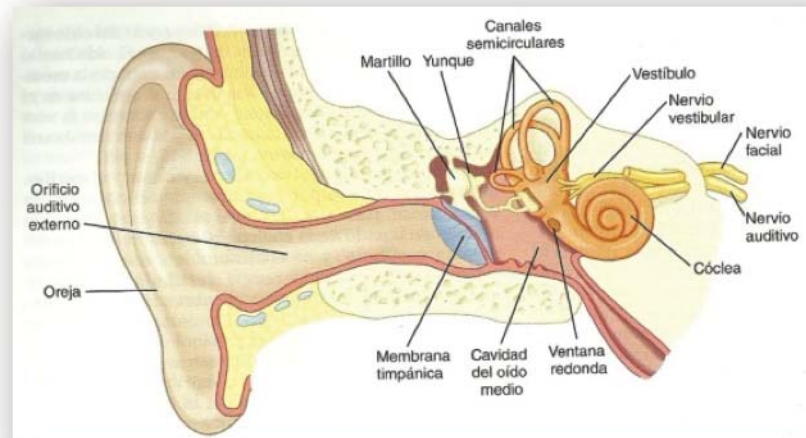


Figura 3. Descripción detallada del oído medio [2].

Los huesecillos que se conectan con la membrana basilar son llamados el martillo, el yunque y el estribo, este último está conectado con la ventana oval por medio de una porción basal del huesecillo que se ubica sobre la ventana. Tras de esta ventana se sitúa un líquido contenido en un componente de la cóclea, el componente que lo contiene es denominado vestíbulo y se ubica de forma paralela con un componente llamado rampa vestibular.

Los huesecillos martillo y estribo tienen músculos que, (por medio de la contracción de estos) generan tensión sobre el tímpano (músculo de martillo y yunque), y reducen la incidencia de energía sonora al oído interno (músculo del estribo), estos músculos al poder ser contraídos y relajados pueden generar una hipoacusia momentánea inducida antes de una exposición a un alto nivel sonoro anunciado. La mala funcionalidad de estos músculos es la causa de condiciones como la hipoacusia y la hiperacusia, que son generados (uno de sus causantes), por poca o mucha tensión de la membrana timpánica respectivamente.

En la parte interior del oído medio existe una conexión con la faringe por medio de la trompa de Eustaquio; por medio de esta, se mantiene en el interior del oído medio un equilibrio con la presión atmosférica [3].

Una de las funcionalidades de la membrana timpánica y de la cadena de huesecillos es el ajuste de impedancia [4]; sin estos, el sonido sería reflejado en gran proporcionalidad y

no se podría escuchar de manera correcta debido a la gran impedancia presentada por el líquido contenido en la cóclea [5]; por ende, sin una herramienta de acople de impedancia, gran porcentaje de la energía sonora sería disipada antes de ser analizada por el cerebro.

El ajuste de impedancia en el oído depende de dos factores:

La relación entre el área superficial de la membrana timpánica con respecto a la ventana oval.

La relación mecánica del sistema de «palanca 175» presente en la cadena de huesecillos.

Por estos dos factores se incrementa la eficiencia de transmisión de energía de alrededor de 30 dB para justamente el rango del habla (como se mencionó anteriormente, de 300 Hz a 3500 Hz).

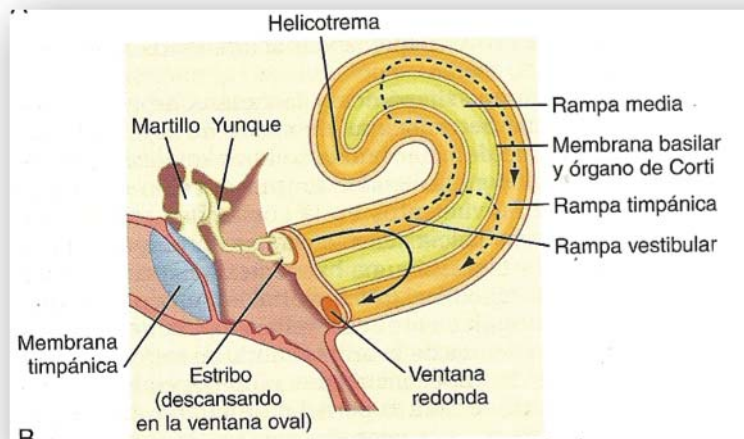


Figura 4. Descripción del oído interno [21].

C. Oído interno

El oído interno está compuesto por laberintos óseos y membranosos, el laberinto óseo es una serie compleja y continua de espacios en el hueso temporal del cráneo y el laberinto membranoso es una serie de espacios y canales que descansan sobre los laberintos óseos. Contenidos en estos elementos se sitúan la cóclea y el aparato vestibular [5].

La cóclea corresponde a un órgano en forma espiral que (en los humanos) tiene dos (2) vueltas y tres cuartos (3/4) desde su base ancha hasta un ápex estrecho. La unión de esta con el laberinto óseo (por el cual se enrosca), es llamada el modiolo. El oído interno se divide en varias partes contenidas en su estructura, el vestíbulo es el espacio que se enfrenta a la ventana oval, seguida por la rampa vestibular, que constituye una cámara con forma de espiral tan larga como el ápex de la cóclea; al encontrarse en el ápex de la cóclea, se encuentra con la rampa timpánica y el helicotrema. La rampa timpánica se puede definir también como una cámara que se extiende paralelamente con la rampa vestibular por debajo de la cóclea y que finaliza con la ventana redonda. En el medio de estas dos

rampas se encuentra (con excepción de la sección del helicotrema), la rampa media que no descansaría sobre el laberinto óseo sino sobre el membranoso.

La denominada rampa media puede también llamarse conducto coclear, este es un tubo que claramente también tiene forma de espiral, con paredes membranosas de una longitud de 35 mm; como se mencionó anteriormente, esta se encuentra situada entre la rampa vestibular y la rampa timpánica. La conexión con la rampa vestibular es la membrana de Reissner, la conexión con la rampa timpánica es la membrana basilar, y su último límite es la estría vascular.

Dentro de estos espacios de la cóclea (pueden caracterizarse como canales) se encuentran líquidos que se encargan de la transducción y proceso químico de la transducción del sonido. El líquido que se encuentra dentro de las rampas vestibular y timpánica es la perilinfa (rica en contenido de sodio Na^+ y bajo en potasio K^+), mientras que el líquido que se encuentra en la cámara de la rampa media es la endolinfa (rica en contenido de potasio K^+ y bajo en sodio Na^+). Debido a su potencial positivo existe un amplio gradiente de potencial de alrededor de 140 mV que puede transferirse a las células ciliadas que se encuentran en el interior de la cóclea. Este líquido es secretado por la estría vascular.

Otro órgano participante del oído interno es el órgano de Corti, que se localiza dentro del conducto coclear y se posa sobre la membrana basilar, este está constituido por tres hileras de células ciliadas externas y solo una hilera de células ciliadas internas, también de una membrana tectorial de textura gelatinosa. En los humanos el órgano de Corti contiene 3500 células ciliadas internas y 15 000 células ciliadas externas [6]. En la superficie de las células ciliadas existen estereocilios que se conectan con la membrana tectorial. Se debe constatar que las células ciliadas internas aportan la mayoría de la información sobre las señales acústicas que son utilizadas por el sistema nervioso central para la audición. Actualmente existen investigaciones que suponen que la longitud de los estereocilios de las células ciliadas externas contribuye a la sensibilidad de las internas para diferentes frecuencias en el espectro audible [6].

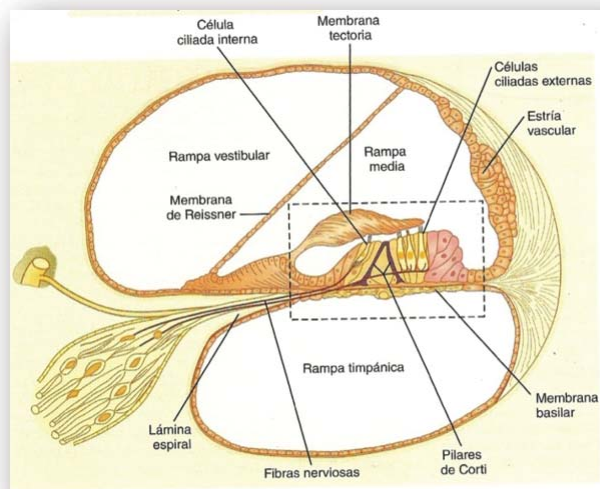


Figura 5. Descripción detallada de las partes que constituyen al oído interno [21]

Es importante establecer que no todos los estereocilios de las células ciliadas se excitan con una frecuencia dada, pues la localización de estas determinan (si son excitadas o no), la frecuencia que perturba el sistema auditivo. Esta localización varía debido a la dimensión y tensión a lo largo de la membrana basilar que cambia desde la base o posición de la ventana oval hasta el helicotrema. La base de la membrana basilar tiene una dimensión de 100 micrómetros y en su extremo de 500 micrómetros, esto determina que los movimientos de la membrana basilar son máximos cerca de la base de la cóclea para frecuencias altas y máximos también cerca del ápex para tonos de baja frecuencia.

El estímulo a lo largo del órgano de Corti se determina relacionando la membrana basilar como un analizador de frecuencias, pues diferentes células ciliadas responden de modo distinto frente a diferentes frecuencias específicas de sonido.

En la siguiente imagen se especifican las áreas de excitación del órgano de Corti por la membrana basilar desde la base hasta el ápex, mostrando la relación de dimensiones de la membrana basilar desde la ventana oval hasta el helicotrema.

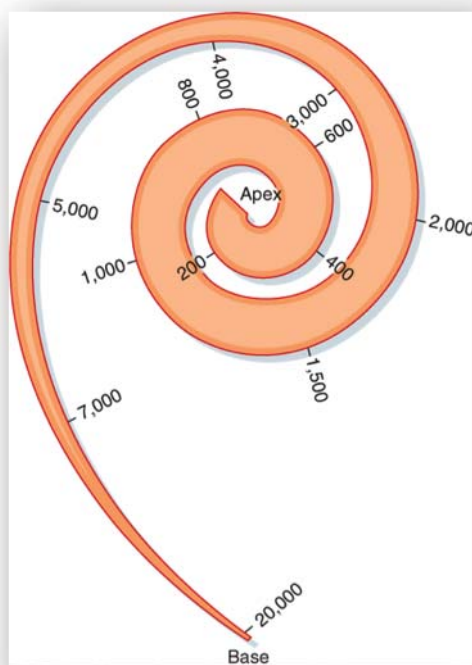


Figura 6. Descripción detallada de la membrana basilar, y los lugares que procesan la señal acústica dependiendo de la frecuencia contenida en esta [21]

Cuando el potencial de acción que es generado por las células ciliadas se transmite por medio de las vías neuronales que pasan por la oliva superior, luego son transferidas a la unión pontomesencefálica (pasando por el núcleo lemnisco lateral, luego al colículo inferior y finalmente llegan a la corteza auditiva primaria donde se encuentran las áreas de Brodmann). Este es el camino que debe recorrer la señal electroquímica que sale del oído interno para poder ser procesada y poder producir la sensación auditiva. La cantidad de cálculos que se realizan en el camino son increíblemente altos, pues se determina la

localización de la fuente sonora, su contenido en frecuencia, su amplitud, su correlación psicoacústica y se determina una reacción con base al sonido identificado [7,8].

D. Comportamiento mecánico de la transducción

Ahora pues, los movimientos de la membrana timpánica (provocados por la variación de presión que presentan las ondas sonoras), hacen que la cadena de huesecillos presione la ventana oval por medio de la porción basal del estribo, este movimiento desplaza el líquido que contiene la rampa vestibular y a su vez, esta onda de presión se transmite a la membrana basilar de la cóclea comunicando también el cambio de presión a la rampa timpánica que provoca finalmente que la ventana redonda sobresalga hacia el oído medio, la diferencia de presión ocasionada sobre las rampas vestibular y timpánica hacen que se produzca un movimiento relativo entre la membrana tectorial y la membrana basilar, haciendo que los estereocilios de las células ciliadas se doblen.

Además de la transición de las ondas sonoras que llegan por el canal auditivo externo a la membrana timpánica existe la transmisión directa que se transmite por los huesos del cráneo, estos llevan la vibración a los canales que contiene el líquido perilinfático (rampa vestibular y timpánica) ocasionando la vibración de la membrana basilar y por ende la excitación de las células ciliadas [9,10, 11, 12].

E. Distinción de localización de fuentes sonoras

Los seres humanos utilizan como mínimo dos estrategias para poder localizar la fuente de un sonido, para frecuencias por debajo de los 3000 Hz, el tiempo interaural es el más usado y para frecuencias superiores se utiliza la intensidad interaural.

Existen diferentes tipos de neuronas que descifran la señal electroquímica producida por las células ciliadas en el órgano de Corti, estas están distribuidas de manera horizontal en la cabeza y tienen distancias distintas con respecto a los dos oídos, estas neuronas están situadas en la oliva superior medial (sección donde llega la información electroquímica suministrada anteriormente), cuando la señal sonora llega primero a un oído y luego de un corto periodo de tiempo llega al segundo oído, entonces el potencial de acción se propaga primero desde un órgano de Corti que el otro estimulando las neuronas (principales para oídos distintos) principales de su oído y haciendo entender a la oliva superior medial de donde llegó el impulso sonoro.

III. Deficiencias que se presentan en el sistema auditivo humano

Las diferentes pérdidas auditivas no solo involucran y evidencian daños en zonas específicas del oído, sino también indican cuál puede ser el procedimiento para poder tratarlas; es importante de esta manera determinar que se deben encontrar las siguientes características de la pérdida auditiva que afecta a un paciente determinado [13]:

- Grado de pérdida auditiva
- Edad de aparición de la afección

- Lugar específico de mal funcionamiento
- Posible causa del problema

Para poder entender de manera más específica cada uno de los cuatro parámetros, nos enfocaremos en cada uno.

A. Grado de pérdida auditiva

Los individuos que poseen una audición de carácter normal (sin pérdida auditiva detectable por los métodos establecidos) pueden percibir niveles de sonoridad por debajo de los 20 fones, bajo esta premisa los sujetos que no puedan detectar niveles de presión de un rango igual o mayor a estos 20 fones serán identificados con pérdida auditiva de grado n según los siguientes datos:

- Grado leve: individuos que perciben desde niveles de sonoridad de 20 a 40 fones.
- Grado medio: individuos que perciben desde niveles de sonoridad de 40 a 70 fones.
- Grado severo: individuos que perciben desde niveles de sonoridad de 70 a 90 fones.
- Grado profundo: individuos que perciben desde niveles de sonoridad superiores a 90 fones.
- Cofosis: individuos que perciben desde niveles de sonoridad superiores a 120 fones.

Los grados de sordera mencionados anteriormente determinan también que posible solución puede presentarse para poder ayudar a estos individuos; igualmente estos presentan una frecuencia determinada en los pacientes con pérdidas auditivas.

Se debe mencionar que el grado más alto o grado total de pérdida auditiva llamado *Cofosis* representa la pérdida auditiva de manera total del individuo, separándolo de esta manera de las demás características debido a que este no puede llamarse o diagnosticarse como un tipo de hipoacusia, sino como una pérdida total de la audición.

Dependiendo también del grado de déficit del paciente, este puede ser tratado con varios instrumentos de ayuda para la audición, para el grado leve y medio es común utilizar audífonos que permitan «bajar» o disminuir el nivel de sonoridad necesario para la percepción sonora del sujeto, pero en el caso de grado medio en personas de corta edad, será necesaria la utilización de instrucción y tutoría especial para el entendimiento del lenguaje (tanto emisión como recepción).

Para casos de grado medio, severo y profundo existen ayudas alternas al método del audífono, estas ayudas pueden ser por implante coclear, o por vibración de transmisión ósea [14,15].

B. Edad de aparición de la afección

Teniendo en cuenta que son de vital importancia los métodos secundarios para la comunicación con la sociedad y el entorno, la aparición de afección es determinante para poder

otorgar una enseñanza adecuada según la pérdida auditiva que se padezca, así como también determinar si las ayudas disponibles para edades cortas pueden ser instauradas en los pacientes con edades avanzadas que comenzaron a padecer del déficit auditivo por primera vez.

Existen tres secciones básicas de sordera según su aparición en edad, estas son:

- Sordera prelocutiva
- Sordera perilocutiva
- Sordera poslocutiva

El primer tipo de estos casos o la sordera prelocutiva es la sordera que aparece previamente a la adquisición del lenguaje oral, comúnmente esta se encuentra dentro de los dos primeros años del individuo. El segundo tipo o sordera perilocutiva ocurre mientras el sujeto realiza su aprendizaje de comunicación oral, esta etapa suele estar dentro de los dos y tres años de edad. La última etapa o sordera poslocutiva es la de más fácil tratamiento debido a que el individuo ya posee habilidades comunicativas de forma oral, esta ocurre luego que el paciente logra su estado de aprendizaje oral.

Se puede determinar también, que así como dependiendo de la ayuda de comunicación, la sordera puede clasificarse como prelocutiva, perilocutiva o poslocutiva, también se deben tener en cuenta las afecciones psicológicas asociadas con este tipo de problema, dado que este déficit de percepción sonora suele alejar al paciente de su ámbito social y crear un choque psicológico que puede ser catalogado como grave [16].

C. Lugar específico de mal funcionamiento

Recordando lo mencionado en la primera etapa del proyecto, el oído tiene bajo sus componentes tres secciones generales, el oído externo, medio e interno, las cuales deben estar funcionando de manera óptima (cada una de ellas y sus secciones internas determinadas) para poder tener una audición bajo los estándares normalizados de salud, regidos en la actualidad.

Cuando se presenta algún tipo de afección en el sistema auditivo del humano se debe identificar el problema en una o varias secciones del oído para poder diagnosticar un problema con su correspondiente solución que puede llegar a ser quirúrgica o externa.

La pérdida de sensibilidad sonora está determinada por las siguientes cinco afecciones determinadas por la medicina moderna:

- Mal funcionamiento conductivo
- Mal funcionamiento neurosensorial
- Mal funcionamiento mixto
- Mal funcionamiento central
- Agnosia auditiva

Cada una de estas afecciones tiene un lugar determinado de mal funcionamiento y por lo tanto se pueden calcular o diagnosticar determinadas soluciones químicas, electroquímicas o prótesis externas que puedan ayudar a su correspondiente mejoría; de esta manera, el mal funcionamiento conductivo se caracteriza por una pérdida auditiva debida a una mala conducción en la cadena de procedimientos mencionada en la etapa número uno para el oído externo, esta puede ser por una contracción o relajación excesiva de los músculos tensores del tímpano, carencia o daños en la cadena de huesecillos (martillo, yunque y estribo), obstaculización del canal auditivo por objetos extraños o por secreción excesiva de mucosidad, entre otras [17]. Posibles soluciones a este tipo de caracterización de pérdida auditiva son la utilización de audífonos o transmisión de vibración ósea.

La caracterización de mal funcionamiento neurosensorial está determinada por falta, o no eficacia de la función de las células ciliadas externas e internas ubicadas entre la rampa media y timpánica de la cóclea, esta también puede darse debido a falta o poca cantidad de los líquidos que desarrollan un proceso químico de generación de potasio y sodio entre ellos y las células ciliadas, la falta de perilinfa y endolinfa o características carentes en estas, pueden ser una causa difícil de identificar en los pacientes. Este déficit puede tener distorsiones en la percepción auditiva hasta una caracterización de gravedad profunda o producción de cofosis; hasta el momento el tratamiento más eficaz para este tipo de pérdida auditiva es la intervención coclear de manera quirúrgica que intenta suplir o reemplazar la funcionalidad sensorial eléctrica de las células ciliadas a los nervios encargados de recibir las variaciones electroquímicas de las mismas células [18].

El mal funcionamiento mixto está caracterizado por falencias tanto en el oído externo y medio, como en el interno, determinando de esta manera que existen problemas de conductividad y de tipo neurosensorial. Este tipo de problema auditivo suele ser producido debido a uno o repetidos impactos dirigidos al área del sistema auditivo. Las posibles soluciones a este tipo de pérdida pueden ser determinadas con la combinación de instrumentos externos e internos con (posiblemente) una intervención quirúrgica.

Uno de los males determinantes para la audición es el mal funcionamiento central, este está determinado por el daño localizado en las áreas de Brodmann, determinadas para la interpretación de las señales acústicas recibidas por el oído. Hasta el momento no existe una solución al problema totalmente eficaz, ya que se trata de un órgano determinante no solo para todo el proceso de la audición sino para todas las funciones del individuo.

El último de los problemas de pérdida auditiva no posee impedimentos físicos como tal, para poder ser tratados por medio de las prótesis como se viene explicando sino presenta una pérdida auditiva psicológica determinada a sonidos de tipo específico como de contenido verbal, o contenido musical entre otros [19]. La única solución existente para la agnosia auditiva es el tratamiento continuo con un psicólogo especializado en este tipo de problemas de percepción.

D. Posible causa del problema

Poder comprender en qué determinado lugar del sistema auditivo se enfoca el problema genera unas posibles causas de la producción del mismo, por ende, para poder establecer

una solución a la pérdida auditiva es necesario determinar cuál fue la posible causa que lo generó, esto con el fin de evitar que el problema vuelva a producirse en el paciente o lo que es peor, que se aumente el grado de la lesión con el tiempo y la supuesta solución relacionada.

Ahora pues, pueden existir causas totalmente remediabiles, que se pueden prevenir con cuidado y aseo personal o con la simple espera de la recuperación total del sistema auditivo regenerativo, pero también pueden existir causas irremediabiles tales como las vistas en problemas auditivos identificados como un mal funcionamiento central o uno neurosensorial.

Las causas más reincidentes de la pérdida auditiva son dadas por:

- Exceso de exposición a niveles de presión sonora considerados como altos.
- Deterioro natural del sistema por envejecimiento o presbiacusia.
- Infecciones del sistema auditivo u otitis.
- Lesiones dadas en la cabeza o en el sistema auditivo.
- Deficiencias y malformación genética del individuo.
- Reacciones ototóxicas.

Una de las causas más comunes en la pérdida auditiva es el exceso de exposición a niveles de presión sonora considerados como altos [1], estos niveles están presentes en conciertos, industria, explosiones y demás eventos y ambientes sonoros. Lastimosamente como el paciente no siente dolor físico alguno y presiente la falsa sensación del acoplamiento a altos niveles sonoros durante un tiempo prolongado de exposición, entonces no advierte peligro de daño al sistema auditivo. Esto deteriora la funcionabilidad de los músculos tensores del tímpano, crea ineficacia en la funcionabilidad de las células ciliadas y por consecuencia la reacción de pérdida auditiva presente en el paciente.

Una causa natural de pérdida auditiva es la llamada presbiacusia; esta se crea por el deterioro natural de funcionabilidad de las células ciliadas, pues estas no reaccionan de manera eficiente frente a la reacción química de la endolinfa con sus filios. Frente a esta pérdida, es posible utilizar un trasplante y prótesis coclear que reemplazará la funcionabilidad electroquímica de las células ciliadas con los nervios auditivos receptores.

Las infecciones del sistema auditivo o también llamadas otitis son inflamaciones del sistema auditivo, estas pueden existir de manera externa y media, la otitis externa se presenta como una inflamación del conducto auditivo, esta se origina debido a una invasión bacteriana dentro del sistema, presentando secreción de mucosa y presencia de prurito interno. Siendo esta, generadora de hipoacusia, será tratada con tratamiento prostético debido a su fugaz permanencia con el paciente.

Las lesiones sufridas por un individuo en el área del pabellón auricular, el hueso temporal o directamente sobre la pinna pueden provocar desprendimiento de la membrana

timpánica, perforación de la misma y exposición a impulsos sonoros de alto nivel sonoro. Todos estos factores generan un daño que puede ser temporal o permanente dependiendo del grado frecuencial de los golpes o de la magnitud y posición del impacto en esta área sensible. Así como pueden existir lesiones en la membrana timpánica, también los huesos encargados de la transmisión, pueden sufrir un desacople y por ende no generan el proceso de impedancia descrito en la etapa número uno. Dadas las circunstancias y el dictamen médico descrito, esta puede tratarse efectivamente con la utilización de prótesis auditivas tales como la utilizada en este proyecto.

Uno de los problemas correspondientes a la hipoacusia son las malformaciones genéticas, que pueden resultar en un gran obstáculo para una audición normal en el paciente. Existen dos variantes de esta complejidad fisiológica, la externa y la interna. La malformación externa del sistema auditivo corresponde a una forma irregular de la pinna del oído creando obstaculización del pabellón auditivo, falta de direccionalidad de las ondas sonoras y pérdida de locación acústica para el paciente, esta puede ser contrarrestada por medio de arduos procesos quirúrgicos o por utilización de prótesis auditivas de transmisión ósea que suplantán la funcionabilidad directa de la pinna y de la membrana timpánica en combinación con el pabellón auditivo. La otra malformación genética interna se da cuando existe una desviación u obstaculización de la trompa de Eustaquio, creando de esta manera diferencias de presión entre la sección interna del oído y su parte externa. Muchas otras malformaciones internas incluyen falta de uno o varios huesecillos del oído medio, deterioro de las membranas correspondientes al sistema auditivo y demás, que por obvios motivos generan una hipoacusia de cualquier grado como se presentó anteriormente. Dado el caso de la malformación congénita o dada a lo largo de la vida del paciente, el problema puede ser solucionado por medio de la prótesis propuesta u otro sistema que mejorará la calidad de vida del individuo [20].

Existen reacciones ototóxicas que pueden generar hipoacusia, estas se presentan si se realiza una ingesta de medicamentos que presenten estas características, por una exposición a radiación nociva para el cuerpo humano o presencia constante a gases y químicos nocivos para los tejidos blandos de los cuales se compone el sistema auditivo. Sustancias ototóxicas presentes en la vida diaria se presentan en industrias desarrolladoras de materiales que involucren disolución y construcción de los mismos, el tabaco y el consumo de alucinógenos crean una hipoacusia temporal en el sujeto pero según estudios recientes realizados por la Universidad de Southampton en el Reino Unido se sugiere que estos podrían presentar una pérdida considerablemente baja, pero permanente en la capacidad auditiva del individuo. Si la lesión resulta ser permanente se debe estudiar cual fue el órgano más afectado por esta presencia de sustancias ototóxicas en el cuerpo para identificar si la presente prótesis puede ser usada para contrarrestar esta hipoacusia.

Dados los posibles problemas mencionados anteriormente, se presenta un amplio campo de trabajo para los tipos de prótesis presentados en el proyecto, buscando de alguna manera generar y ayudar con la calidad de vida para los pacientes que padecen este tipo de problemas.

La presbiacusia es, sin duda, un mal presente en todos los humanos a una alta edad, esta se representa por la destrucción de las células ciliadas provocada por sonidos in-

tenso. En la mayoría de los casos las células ciliadas se deterioran mucho más a altas frecuencias, pero suele presentarse por secciones, creando una carencia de sensibilidad auditiva al paciente no en toda la gama de frecuencias sino en una sección específica que puede ser controlada mediante la introducción de un aparato electrónico que suplirá el comportamiento de las células ciliadas afectadas.

Un problema constante en músicos, ingenieros de sonido, técnicos en el área de producción musical, trabajadores de industria y demás es la abundante secreción de mucosa que genera el sistema auditivo para crear una barrera física contra los altos niveles de presión sonora a los cuales se enfrenta el individuo constantemente, si la secreción llega a tapar el conducto auditivo la trompa de Eustaquio se obstaculizará y generará un cambio de presión entre el oído medio y externo provocando de esta manera una ruptura o desplazamiento doloroso de la membrana timpánica que resultarán en un daño permanente según la gravedad del cambio de presión presentado en el sistema.

IV. Investigaciones de prótesis auditivas ya existentes

Es importante para el proyecto, establecer cuáles prótesis auditivas existen en el mercado, cuáles son las más comunes en uso y comercialización y cuáles presentan mayor eficiencia para el paciente con discapacidad auditiva.

Bajo este orden, existen diversos diseños diferenciados por su modalidad de interacción con el individuo, su posición y localización anatómica, como también de su objetivo. Las prótesis auditivas comercializadas actualmente son:

- CRT (Canal Receiver Technology)
- BTE (Behind The Ear)
- CIC (Completely In the Canal)
- ITC (In The Canal)
- ITE (In The Ear)
- BAHA (Bone Anchored Hearing Aid)
- CCII (Cochlear Implant)

De las ayudas auditivas mencionadas anteriormente se categorizan las primeras seis (6) bajo la sección de audífonos, mientras que el sistema BAHA y el sistema CCII tienen otro modelo de funcionamiento para poder responder a otros tipos de problemas del sistema auditivo.

Básicamente, el modelo de trabajo de las prótesis de diseño de audífonos varía según su tamaño, poder de amplificación y modo de posición en el sistema auditivo del paciente, pero a pesar de diseños tan diversos, todos responden a un tipo de sordera moderada o leve, con problemas específicos en la sección media del oído. Para mejorar los problemas específicos ubicados en otras secciones del oído tales como el oído externo e interno (sin obviar al oído medio) se encuentran las dos últimas prótesis listadas.

El sistema CCII se realiza quirúrgicamente intentando reemplazar la función de las células ciliadas para con los nervios auditivos, esta puede ser introducida al poco tiempo de haber nacido el paciente con el problema auditivo, pero no tiene la misma eficiencia que las mismas células. Esta es una ayuda de alto nivel de importancia para casos profundos de sordera como también solución a la mencionada cofosis que puede surgir a cualquier edad en el ser humano.

La identificación de dichos sistemas de prótesis auditivas se relaciona con las siguientes imágenes que señalarán el tamaño relativo de las prótesis así como su posición con respecto a la anatomía humana.






Modelo y características	Imagen relacionada
<p>CRT</p> <ul style="list-style-type: none"> Menor inclusión en el canal auditivo perdiendo la percepción de «oído tapado» de otros diseños. El receptor ubicado dentro del canal auditivo es el mismo que brinda la calidad de sonido de la prótesis. 	
<p>BTE</p> <ul style="list-style-type: none"> Debido a su gran tamaño este tipo de prótesis genera mayor amplificación y mayor durabilidad de batería. Pueden adaptarse a pérdidas auditivas de grado leve a profundo según sea el caso del paciente. 	
<p>ITE</p> <ul style="list-style-type: none"> Hechos a la medida se acoplan a la perfección a la forma del oído externo. Puede ser adaptable según sea la gravedad de la pérdida auditiva. 	
<p>ITC</p> <ul style="list-style-type: none"> De pequeño tamaño y hechos a la medida, presenta poca visibilidad al exterior. Duración de pila media. 	
<p>CIC</p> <ul style="list-style-type: none"> De pequeño tamaño y hecho a la medida esta prótesis presenta discreción en su uso y calidad de sonido natural. Es adaptable a pérdidas auditivas de grado leve a moderado. 	

Tabla 1. Descripción de sistemas de prótesis auditivas usadas en el pasado [21],

Uno de los sistemas de audición más interesantes, es el llamado BAHA, que como su nombre lo indica es una implantación anclada al sistema óseo para ayudar a la sensibilidad de la escucha, este sistema sigue el modelo de funcionamiento que se quiere para el presente proyecto, con el fin de investigar mucho más en esta sección de diseño de los sistemas auditivos se hará una profundización en este sistema.

Modelo y características	Imagen relacionada
<p>BAHA</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prótesis de transmisión ósea. • Unión al hueso temporal del cráneo. • De tamaño relativamente grande. • Necesidad de intervención quirúrgica para su implantación. • Altamente visible. 	
<p>CCII</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inserción quirúrgica de alta profundidad. • Única solución para problemas de alto grado de sordera y la cofosis. • Altamente visible. 	

Tabla 2. Descripción de sistemas de prótesis auditivas usadas en el pasado [21],

El sistema de prótesis por transmisión ósea ayuda a los pacientes y personas que poseen problemas de infección crónica del oído u otitis, malformaciones congénitas presentes en el oído externo y en secciones específicas del oído medio tales como la membrana timpánica y desacople parcial de la cadena de huesecillos, también ayuda a pacientes que poseen sordera parcial en alguno de los dos oídos. Ya que con estos problemas los sistemas convencionales de ayuda no son útiles, es necesaria la intervención quirúrgica por el método BAHA.

El implante BAHA consiste en tres secciones de funcionamiento, la inserción de titanio en la cavidad ósea del hueso temporal del cráneo, el acople con el procesador de señal y el procesador de señal mismo. El sistema en general funciona de manera que transmite el sonido directamente a la sección auditiva interna, omitiendo de manera general la sección externa y media. El modo de implantación de esta prótesis se realiza primero mediante un acoplamiento quirúrgico, en el cual se inserta una sección en forma cilíndrica hecha de titanio que será fijada al hueso temporal del cráneo, luego de este procedimiento se deberá acoplar el sistema procesador de señal que tendrá un transductor de energía acústica a eléctrica y un segundo transductor de energía eléctrica a mecánica que será el generador de vibraciones que se transmitirán por vía ósea directamente a la sección interna del oído, permitiendo de esta manera la estimulación de los nervios auditivos que generarán la sensación de escucha.

El modelo de transmisión ósea de este tipo de prótesis será implementado en general para los pacientes que sufran de una infección aguda del canal auditivo, ausencia del canal auditivo externo por malformación congénita o producida por algún tipo de cirugía como efecto colateral, así como también de la sordera unilateral del oído producido por el removimiento de un tumor en los nervios vestibulares.

V. Propuesta de modelamiento de un nuevo sistema de prótesis auditiva basado en conducción ósea

La propuesta del presente trabajo es diseñar un sistema de prótesis auditiva con una técnica no-convencional, denominada «Transmisión ósea», es decir, que la convergencia de información auditiva no utiliza los canales convencionales, como las secciones de transmisión del oído externo-medio, sino que involucra los huesos del cráneo para llevar esta información.

El sistema puede colocarse en algunas áreas de la cabeza, como la sien, o las mejillas, y hace uso de un transductor electro-mecánico, el cual convierte señales eléctricas en vibraciones mecánicas, y envía sonido al oído interno a través de los huesos craneales.

El presente estudio presenta algunos modelos, que serán presentados a continuación:

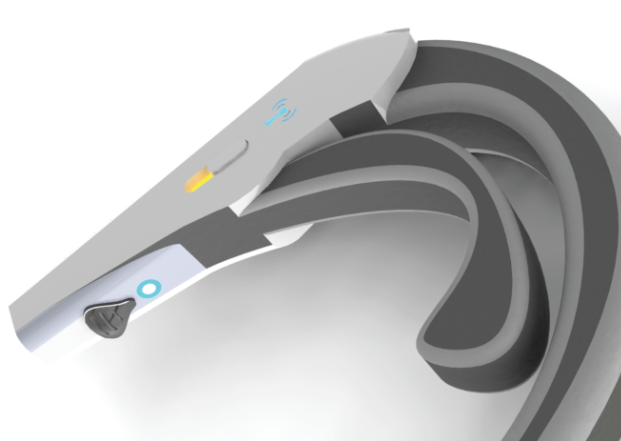


Figura 7. Modelo de prótesis auditivas creado por el Semillero SPA,

Observemos detenidamente el transductor que realiza la conversión de energía eléctrica a vibraciones mecánicas, el cual es el responsable del envío de la información, que necesita la persona con limitaciones para complementar su proceso de audición. Esta conversión está descrita por el siguiente modelo,

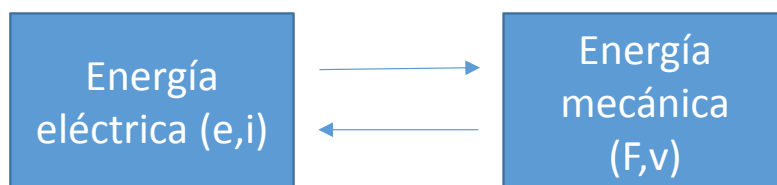


Figura. Modelo de transducción.

Dependiendo del tipo de transducción, es posible implementar diversos modelos:

- Transducción electrodinámica
- Transducción electrostática
- Transducción piezoeléctrica
- Transducción magnetostrictiva



Figura 8. Ubicación del transductor en el modelo de prótesis auditiva.

A continuación se muestra el dispositivo encargado de fijar la prótesis auditiva a la cabeza.



Figura 9. Dispositivo mecánico para la fijación de la prótesis.

Finalmente, se muestra el sistema completo, tal como se desea implementar.



Figura 10. Modelo de prótesis auditiva con sistema de transmisión ósea.

Conclusiones

El presente proyecto analiza los problemas que ocasionan los diferentes tipos de pérdida auditiva, y realiza un barrido histórico de todos los sistemas que se han desarrollado a través del tiempo para compensar y solucionar estas deficiencias.

Se analiza todo el proceso de transducción, dentro del oído, desde la captura de información por parte del oído externo, hasta los mecanismos que se suceden en el oído interno, y más allá en las unidades de procesamiento cerebral.

Con base en esto, se verifica que las señales esenciales para transmitir la información hacia las unidades neuronales transcendentales para el registro y la interpretación del fenómeno auditivo, toman su camino desde el oído externo hasta el cerebro. Sin embargo, este mismo proceso puede ser realizado por esta vía no-convencional (a través de los caminos de transmisión ósea).

Para asegurar estos procesos de transmisión ósea, se desea implementar un dispositivo electromecánico que realice estos procesos de transducción, fijándolo en la estructura ósea de la cabeza humana.

Existen algunas cavidades y estructuras óseas en donde se hace más fácil y efectiva, la implementación de estos sistemas.

El diseño de estos sistemas es realizado en un software gráfico de simulación, en donde se ingresan parámetros mecánicos y eléctricos para desarrollar sistemas avanzados que realicen la función de prótesis auditivas pero con la técnica de transducción ósea.

Bibliografía

- [1] Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía. *Ruido y Salud*. ISBN 978-84-694-5930-0.
- [2] Jahn F., Anthony, Santos-Sacchi Joseph. *Physiology of the Ear*. Ed. Singular, 2nd Edition, 2001.
- [3] Dillon, H. *Hearing Aids*. Ed. Thieme, 2nd edition, 2012.
- [4] Musiek, F. E., Baran, J. A. *The Auditory System: Anatomy, Physiology, and Clinical Correlates*. Ed. Pearson; 1 edition, 2006.
- [5] Moore, B. C. J. *Cochlear Hearing Loss: Physiological, Psychological and Technical Issues*. Wiley-Interscience; 2nd edition, 2007.
- [6] Herrera, M., Ortega, A., Vargas, C. «Bandas críticas y el cálculo de potencia espectral de barks en rango de frecuencia lineal y por tercios de octava». En: *Ingenium*, Revista de la Facultad de Ingeniería. Año 13. N.º 26, 2012.
- [7] Gelfand, S. A. *Hearing: An introduction to Psychological and Physiological Acoustics*. Marcel Dekker, 1998.
- [8] Mueller, H. G., Taylor, B. *Fitting and Dispensing Hearing Aids*. Plural Publishing, Inc.; 1 edition, 2011.
- [9] Myers, C. K. *Principles and techniques of measuring hearing by bone conduction*. In 13th AES Convention, 1961.
- [10] Purcell D. W. Otoacoustic emissions and bone conduction. Doctoral Dissertation Thesis, University of Toronto, 2001.
- [11] Herrera, M. Evaluation of audio coding systems. Doctoral Dissertation Thesis, CVUT, 2009.
- [12] Bauer, B. B. On Better Aural Prosthesis. In *Jaes*, Volume 17th, in 1969.
- [13] Francart, T.; Mcdermott, H. J. Psychophysics, Fitting, and Signal Processing for Combined Hearing Aid and Cochlear Implant Stimulation. In: *Ear And Hearing*, Volume 34, 2013.
- [14] Dun, C. A. J., Agterberg, M. J. H., Cremers, C. W. R. J. Bilateral Bone Conduction Devices: Improved Hearing Ability in Children With Bilateral Conductive Hearing Loss. Volume 34, 2013.
- [15] Valjama, A., Jiménez, A. T., Larsson, P., Kleiner, M. «Binaural bone-conducted sound in virtual environments: Evaluation of a portable, multimodal motion simulator prototype». In: *Acoustics, Science and Technology*. N.º 29, 2008.
- [16] Clark, W. W., Ohlemiller, K. *Anatomy and Physiology of Hearing for Audiology*. Cengage Learning; 1 edition 2007.
- [17] Walker, B. N., Lindsay, J. «Navigation performance in a virtual environment with bonephones», *Proc. Int. Conf. Auditory Displays 2005* (2005). Available online: www.idc.ul.ie/icad2005/downloads/f110.pdf
- [18] Tonndorf, J. «Bone conduction», in *Foundations of Modern Auditory Theory*, J. Tobias, Ed. (Academic Press, New York, 1972), pp. 197-237.
- [19] Stenfelt S., Goode, R. L. «Bone conducted sound: physiological and clinical aspects», *Audiol. Neuro-Otol.*, 26, 1245-1261 (2005).
- [20] Porschman, C. «Influences of bone-conduction and air conduction on the sound of one's own voice», *Acta Acust.*, 86, 1038-1045 (2000).
- [21] Imágenes tomadas de: http://unitron.com/unitron/us/en/consumer/hearing_aids-c/styles.html el 30 de octubre de 2012 a las 4:26 p.m.
- [22] http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&sqi=2&ved=0CCMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.clinicasdeaudicion.com%2Festudios%2Fhistoria_audioprotesis_auditivas.pdf&ei=3AOUUPj4A8Hv0gG0t4GIDg&usq=AFQjCNEEyLTPybeCNuH5vhBY1TDeNa3lg tomado el 31 de oct del 2012.
- [23] <http://www.ecoaudio.net/>