

MODELOS FISICOS DE LA COCLEA

Julio Sanjuán Juaristi.

Mar Sanjuán Martínez-Conde.

Hospital Ramón y Cajal
Unidad de Neurofisiología
Experimental. Madrid. España

Introducción y objetivo

Von Békésy entre otros autores, muestran interés por el desarrollo de modelos físicos, para la comprensión de la micro mecánica coclear. Hemos querido participar en esta inquietud, realizando diversos modelos y ensayos.

Material y métodos.

Mediante generadores de audiofrecuencia y equipo de medida: osciloscopios, polímetros, estroboscopio, acelerómetros etc. y con distintos métodos, valoramos el efecto del “helicotrema”, el comportamiento de las vibraciones sonoras, aplicadas en diferentes puntos externos de la “cóclea” y desarrollamos un modelo sobre la transducción mecano-eléctrica.

Resultados.

La “membrana basilar” en los modelos, se deprime hacia la “rampa timpánica”, ante el aumento de presión sonora en la “rampa vestibular”.

La aplicación del estímulo sonoro, en otros puntos de la cóclea, modifica el tránsito de las ondas en su interior.

La conversión mecano-eléctrica, solo en su principio, puede que se deba a la diferencia de potencial entre la endolinfa (+80 mV) y el cuerpo de las células ciliadas externas (-70 mV).

Discusión

Las aportaciones físico acústicas intracocleares, llevadas más allá de lo razonable, pueden conducir a incorrectos postulados. La complejidad biológica de la cóclea, no se puede simplificar con modelos mecánicos ni manipulando cócleas humanas o de animales.

Conclusiones.

La relación de superficies entre “ventana oval” y “helicotrema” en los modelos, origina una diferencia de presión entre las dos “rampas cocleares”.

El comportamiento de la “membrana basilar” del modelo, cambia aplicando el estímulo sonoro fuera de la “ventana oval”.

Los modelos gráficos sobre la mecánica coclear en general, son de diseño incorrecto.

Introducción

Modelo científico

Se denomina modelo científico a una representación conceptual física, a fin de analizar, simular o predecir, determinados procesos. Un modelo permite alcanzar un resultado final, a partir de unos datos de entrada. No hay pautas establecidas acerca del uso de modelos. Los diversos procedimientos sobre la construcción, empleo y validación de modelos, se aplican a diversas disciplinas. Para hacer un modelo, es necesario partir de una serie de hipótesis, de manera que lo que se quiere estudiar, esté suficientemente plasmado en la representación, aunque también se busca que sea lo bastante sencillo, como para poder manipularlo y estudiarlo.

Un determinado postulado es un “modelo físico teórico”, cuando su dinámica interna no se conoce exactamente. Si lo que se busca es estudiar exclusivamente algunos detalles particulares de un sistema complejo, puede resultar de interés, emplear datos básicos o simplificaciones funcionales, que hacen que el estudio del sistema simplificado, se aproxime a realidad más compleja. Los modelos al no estar basados en una descripción completa, se espera que puedan fallar respecto a las conclusiones derivadas.

Modelos mecánicos.

Los modelos sobre la mecánica coclear que se han realizado, se fundamentan en base a la teórica progresión de la presión sonora en el interior de la cóclea y en fenómenos de resonancia de sus estructuras, que han llevado a considerar la existencia de ondas viajeras en la cóclea.

fenómenos de resonancia de sus estructuras, que han llevado a considerar la existencia de ondas viajeras en la cóclea.

Si no se aplica el necesario rigor científico, un modelo puede hacer lo que su autor quiera que haga. Los modelos pueden tener problemas obvios, de interpretación de datos experimentales, o errores conceptuales respecto a las teorías de la mecánica coclear. El modelo físico permite trabajar con varias estructuras y parámetros, de una manera imposible en una cóclea real, . sin tener en cuenta la actividad electrobiológica, considerada cada día más transcendente.

Los primeros modelos físicos de la cóclea, fueron diseñados para reproducir la micro mecánica coclear y descubrir su funcionamiento básico. (1, 2, 3) El diseño de Juergen Tonndorf's fue similar al realizado originalmente por Bekesy (4). Una membrana de ancho variable separaba dos canales de fluido, realizados a escala muy superior al tamaño de la cóclea real. Desde un principio, ha persistido el propósito de atribuir el análisis frecuencial de la cóclea, a procesos de naturaleza mecánica. No es procedente extrapolar las vibraciones percibidas con el modelo Bekesy de la fig. respecto a las vibraciones intracoclear en la especie humana, ni en otras cócleas minúsculas como la de la musaraña, de 3 mm de desarrollo.

Las ondas viajeras producidas, imitan el fenómeno observado por Bekesy, en modelos físicos y cócleas de cadáveres humanos y de animales. Estos y otros intentos de remedar la micro mecánica coclear, parecen inducidos por hipótesis establecidas y aceptadas.

Actualmente está demostrado, que las cócleas vivas cuentan con factores bioquímicos y electrobiológicos, que interactúan con los aspectos puramente físico acústicos. Las conclusiones con los primeros modelos cocleares, y observaciones de Bekesy en cadáveres, no pueden determinar adecuadamente el proceso intracoclear, ni siquiera el movimiento y alcance de la función de la membrana basilar.

Modelos informáticos y matemáticos

Los modelos informáticos y matemáticos, prácticamente se imbrican y complementan. Los avances en tecnología e informática intentan la construcción de modelos más precisos, (5) cuestión que estimamos de dudosa aproximación a la realidad, porque en ella interviene la complejidad de factores biológicos que aún desconocemos, imposibles de incluir en los modelos

La necesidad de obtener sistemas físicos de alto rendimiento, bajo consumo, menor espacio y bajo coste, son los principales desafíos de la electrónica integrada, más implicada en estos fines, que en la investigación fisiológica pura. Estos estudios corresponden a la Ingeniería neuromorfica. (6)

Los avances en matemáticas e informática propician el diseño de mejores modelos. La onda viajera cambia a medida que avanza en la cóclea, por lo que un solo modelo para determinada frecuencia, no es válido en toda la longitud coclear, se necesitan varias etapas, para un análisis funcional más aproximado.

Los modelos parten de los conceptos fisiológicos aceptados, lo cual implica, la introducción en los modelos, de los errores que contengan las hipótesis siempre evolutivas.

Nuevos conocimientos en fisiología, permitieron el desarrollo de los primeros modelos matemáticos Peterson y Bogart 1.950 y posteriormente Leong Mead en 1.988 (7) proponen modelos matemáticos sobre filtros de segundo orden. Desde 1988 aumenta el número de investigaciones sobre modelos matemáticos (8,9,10,11). Graham en el 2006 utiliza circuitos análogos. Entre los modelos digitales más conocidos, tenemos el trabajo realizado por Sellami en 1997 (12) el trabajo realizado en el 2000 por Watts (13) y en 2002 por Mishra y Hubbard (14).

Modelos gráficos.

No llegamos a comprender la proliferación de modelos gráficos, de la función coclear.

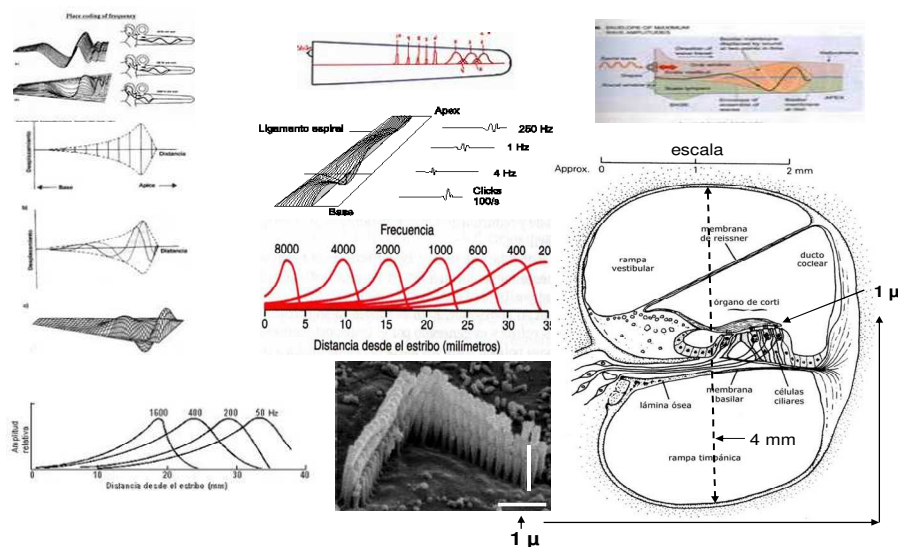


Fig.1

En el ángulo inferior derecho, tenemos algunas medidas anatómicas. La distancia entre la basilar y la tectoria es de ± 1 micra, que corresponde a la longitud variable de los cilios. En consecuencia, la basilar no puede desplazarse más. La tectoria no es elástica. Según Arthur W Ham, en su Tratado de Histología, (15) esta membrana es resiliente. No se mueve, porque está compuesta por fibras de proteínas muy duras con poca agua, recubiertas por una sustancia amorfa gelatinosa, en la que contactan los cilios. Además la presión sonora, que incide simultáneamente sobre ambas caras de la membrana tectoria, no tiene por qué afectar a su posición. La tectoria mantiene un nivel de referencia fijo.

El desarrollo coclear humano es \pm de 30 mm y el desplazamiento basilar máximo, corresponde a la distancia entre la basilar y la tectoria, equivalente a $\pm 1 \mu$. La posible elongación vertical, no puede dibujarse gráficamente. En una representación correcta, necesitamos que el trazado en abscisas sea de metro y medio para poder dibujar en ordenadas, un desplazamiento de 1 milímetro.

Dallos en 1996, hace una comparación respecto al desplazamiento ciliar, ante un estímulo umbral. Dice que equivaldría a una inclinación de 5 cm de la torre Sears de Chicago, que tiene una altura de 500 m. Lo cual corrobora la imposibilidad de representaciones gráficas.

Los modelos gráficos “demostrativos” sobre la deformación basilar, expresan la frecuencia en abscisas, pero se olvidan del valor de las ordenadas. Tenemos que pensar que estos dibujos pretenden ser solo didácticos, tan didácticos como engañosos.

En los modelos físicos, es preciso recurrir a técnicas de microscopia, con luz estroboscópica, o más precisamente a la técnica de Mössbauer, (16) para poder observar las vibraciones de la membrana basilar. Las representaciones gráficas, sin advertir la imprecisión que conllevan, se permiten la licencia de unas disparatadas elongaciones.

Modelos perceptuales. (Sicoacusticos)

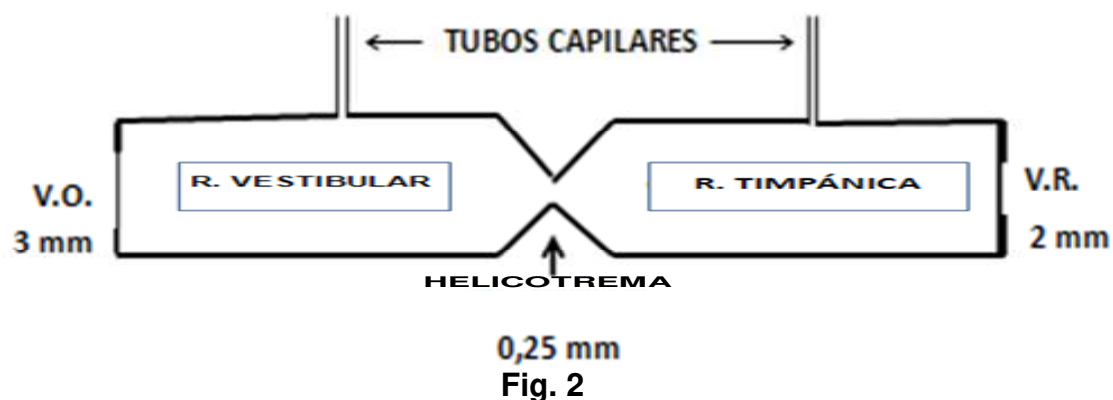
En los denominados modelos perceptuales, se expone la función de la membrana basilar, como una secuencia de filtros pasabanda obtenidos por procedimientos sicoacusticos. (17) No aceptamos las experiencias

sicoacusticas, que se refieran a la membrana basilar, ni a ningún receptor sensorial. Los estudios sicoacusticos proceden de la apreciación de sensaciones, que siempre son de origen cortical, sin que deban extrapolarse conclusiones sobre los receptores periféricos.

Objetivo

Solo pretendemos exponer los modelos mecánicos, que hemos realizado, con el fin de estudiar físicamente el comportamiento de la presión sonora en tubos, con cierta semejanza a la estructura coclear. También observamos la progresión de las ondas sonoras, aplicando su entrada sobre puntos diferentes a la “ventana oval”, cuestión que no hemos visto reflejada en las publicaciones revisadas. Aportamos otros modelos, para aproximarnos a la transducción mecano-eléctrica.

Material y métodos. Para el estudio del efecto que el heliograma ejerce, sobre la diferencia de presión sonora, entre la rampa vestibular y la timpánica, las experiencias se iniciaron mediante el tubo de cristal de la fig.2. En el hemos



mantenido una relación aproximada de diámetros respecto a la entrada y salida, ventana oval ventana redonda y helicotrema. Con este modelo pretendíamos, observar la presión sonora en el tramo correspondiente a la “rampa vestibular”, respecto a la transmitida a través del “helicotrema” a la “rampa timpánica” y la repercusión de la frecuencia en esta diferencia de presiones. El conjunto se llenó de agua coloreada, la cual toma un nivel en los tubos capilares. Aplicamos un vibrador excitado por un generador de funciones Brüel Kjaer 1.027, sobre la membrana correspondiente a la “ventana oval” y observamos el desplazamiento del

líquido coloreado en los tubos capilares. Se necesita bastante excitación sobre el vibrador y observación mediante microscopio con luz estroboscópica.

Encontramos deficiencias en el procedimiento, que fue modificado en dos modelos posteriores más elaborados (fig.3-a y 3-b) en los que se han sustituidos los tubos capilares, por dos micrófonos electret miniatura. Los micrófonos actúan como sensores de presión, informando sobre la forma y fase de las vibraciones sonoras. En la figura 3-b doblamos el tubo, incluyendo una fina separación de látex entre la “rampa vestibular y la timpánica”, a modo de “membrana basilar”.

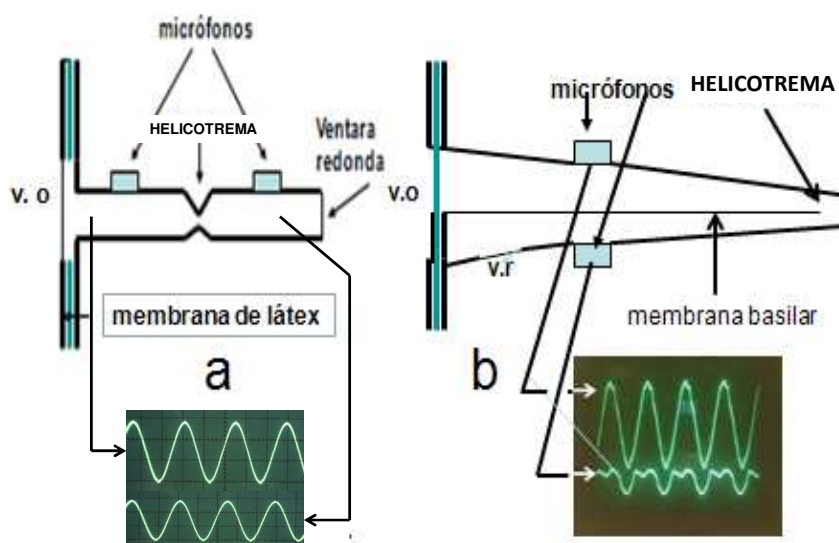


Fig.3

En ambos casos, un osciloscopio de doble trazado, presenta la diferencia de amplitud, forma y fase de la presión sonora. Al utilizar los micrófonos como detectores de presión, hemos tenido en cuenta que las vibraciones aplicadas en la “ventana oval” además de propagarse por el líquido, se transmiten por la estructura del modelo, alterando los resultados. Para evitar en lo posible esta incidencia, el vibrador se aplica solo en el centro de la “ventana oval” dejando un margen elástico en los bordes y lo que es más importante, los micrófonos están separados de la estructura rígida, por una suspensión de silicona. En la figura 4 presentamos el montaje final.

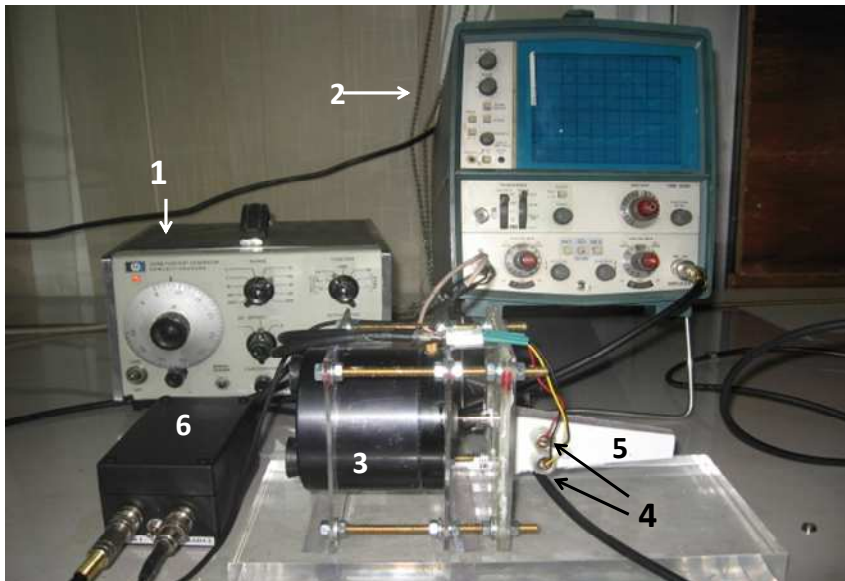


Fig. 4

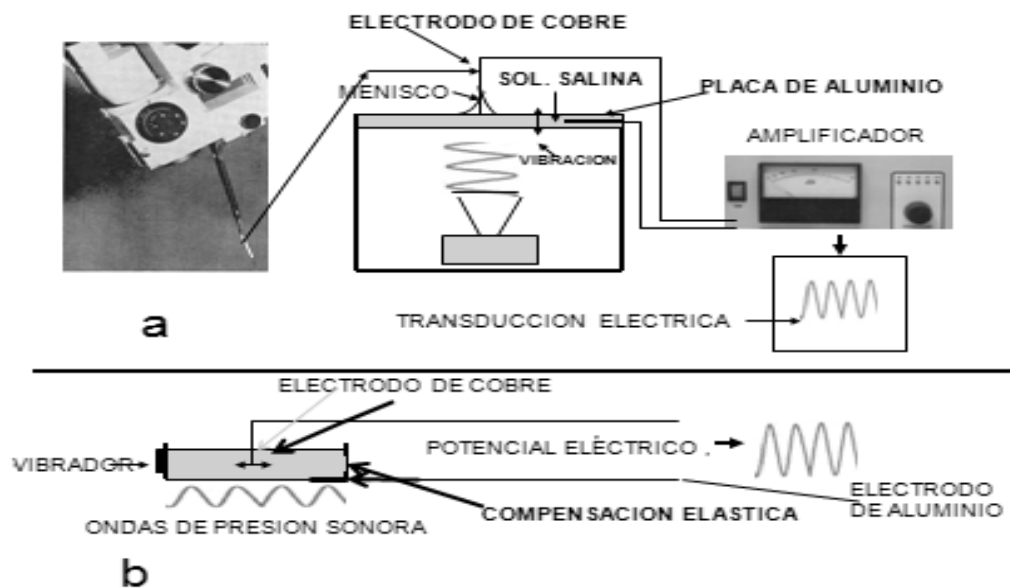
Un generador de funciones, excita al transductor. En ella pueden verse los dos sensores colocados en las “rampas vestibular y timpánica”. Reciben su alimentación y pre amplificación de una unidad separada. Se dispone de un osciloscopio, de doble trazado, para presentar los resultados. La mecanización del modelo permite alterar el diámetro del “helicotrema” e incluso obstruirlo. En otra experiencia, hemos sustituido el vibrador colocado en la “ventana oval”, por otro manual.



Fig 5

con el que aportamos el estímulo sonoro sobre diversas zonas de la estructura rígida “coclear”. Este procedimiento nos permite ver las alteraciones que sufren las ondas de presión sonora, cuando penetran por otros puntos. La cóclea en

situación normal, recibe vibraciones sonoras del exterior, especialmente a través del CAE y del interior procedente del aparato de la fonación. En la operación de sonoinversión del Dr. García Ibáñez, tenemos un caso extremo de entrada anómala de la presión sonora, penetración del estímulo por ventana redonda en lugar de la oval. Al margen del modelo descrito, hemos realizado otros dispositivos con el fin de aproximarnos a la transducción mecano eléctrica de la cóclea.



El modelo "a" se basa en la diferencia de potencial que aparece entre un electrodo de cobre y otro de aluminio. El fino electrodo de cobre, se aproxima justo encima de una lámina elástica humedecida con una solución salina. Este electrodo va unido a un microscopio quirúrgico, que enfoca justamente su extremo. Al hacer contacto con la membrana humedecida, se forma por tensión superficial, un menisco alrededor del electrodo. Manipulamos el microscopio para que no contacte con la membrana, pero sin que se pierda el menisco. La membrana elástica tensa, cubre un cilindro, en el cual hemos colocado un pequeño altavoz. Las vibraciones del altavoz se transmiten a la membrana y estas hacen que el menisco se alargue y acorte, respecto al electrodo. Los electrones que lo rodean, alteran su número, generando diferencias de potencial que siguen las alternancias de las vibraciones. Si el electrodo contacta con la membrana, desaparece el potencial microfónico, porque el contacto mecánico, impide que el menisco se deforme con las vibraciones.

El modelo "b" más sencillo, se basa en el mismo principio. Con anterioridad a esta experiencia, publicamos con el Dr. Gavilán en 1.964 (18) un artículo de contenido incorrecto, sobre potenciales microfónicos en el

hombre, con un electrodo en el tímpano. Se trataba sin saberlo, del efecto descrito en estos modelos, no de un verdadero potencial microfónico coclear.

Dada nuestra dedicación al estudio de los microfónicos cocleares, estuvimos tentados a diseñar un modelo de base electrónica, que remedara la función de filtro de los receptores sensoriales. Abandonamos la idea, porque ese modelo está presente en toda una serie de instrumentos. Simples cadenas musicales, proyectan en una sencilla pantalla, un básico análisis de Fourier correspondiente a la música. Instrumentos de medida analizadores de sonido, cuentan con sistemas de filtros de pasos de banda, más o menos numerosos y estrechos. La fig.7 presenta esta analogía, que muestra un análisis muy favorable al sistema biológico coclear.

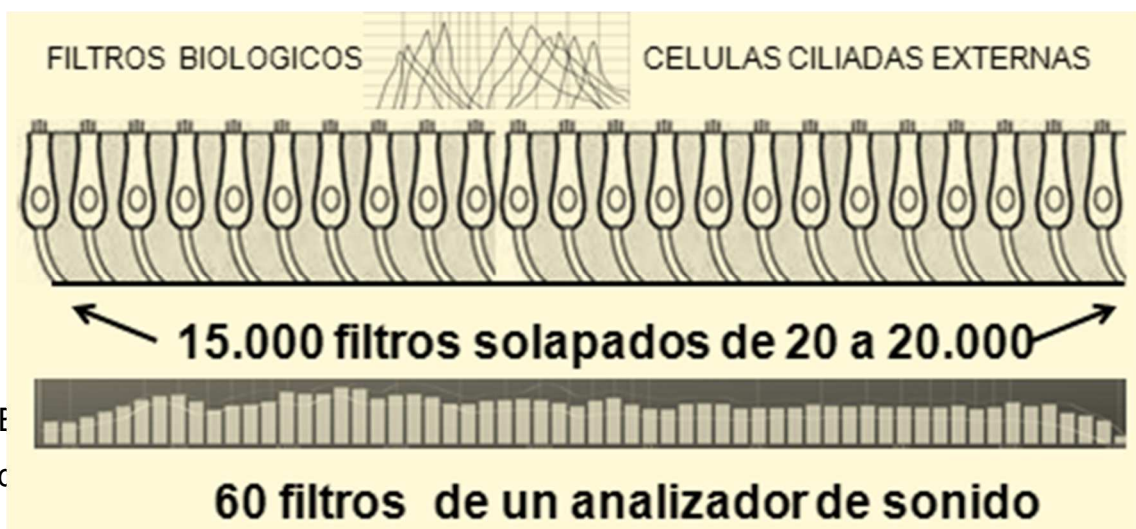


Fig. 7

En todos los modelos hemos experimentado con tonos puros y ocasionalmente con bandas de ruido de diferente anchura.

Resultados

Efecto del helicotrema sobre la presión sonora intracoclear. En la figura 3 “a” se observa solamente una disminución de la amplitud de la onda sonora en el “tramo timpánico” del modelo, por el estrechamiento “helicotrema” en el tubo. En el modelo “b” de la misma figura, en donde se han separado ambos tramos por una fina membrana, se observa disminución de la amplitud e importante distorsión en el tramo “timpánico”. Las diferencias de presión en la “rampa vestibular” se transmiten a la “timpánica” no solo por el “helicotrema” sino a lo largo de la “membrana basilar. En la “rampa vestibular”, que recibe la presión directa por la “ventana oval” no se aprecia distorsión, mientras que en la “timpánica”, el encuentro de la presión por su “techo”, que es el “suelo” de la “vestibular” y por el “helicotrema”, alteran fuertemente la forma de onda. La diferencia de amplitud y la distorsión cambian en función a la frecuencia de la onda incidente. Observaciones mediante tonos puros. Empleando sonidos complejos, solo se pueden definir diferencias de amplitud entre ambas rampas.

En ambos modelos parece insinuarse un desplazamiento de fase, en la rampa “timpánica” respecto a la “vestibular”, que no cambia con incrementos de la presión sonora. Posible desplazamiento por diferencia de tiempo en el tránsito de la onda. Otra cosa es el desplazamiento fisiológico, por latencia de los receptores auditivos, que disminuye al aumentar la intensidad del estímulo, como corresponde a un proceso biológico.

A niveles sonoros elevados, se puede comprobar una depresión global de la “membrana basilar”, por la diferencia de presión entre las rampas “vestibular y timpánica”. Esta depresión solo es observable microscópicamente con luz estroboscópica.

Efecto del aporte del estímulo fuera de la “ventana oval”

Al aplicar el vibrador en otros puntos rígidos del modelo, se registran importantes cambios de la onda sonora intracoclear, tanto en la “rampa timpánica” como en la “vestibular”.

Transducción mecano eléctrica.

En los modelos que presentamos, solo se pretende aportar una forma de transducción, que se aproxime, a una primera etapa de lo realizado por las células ciliadas, considerando que estas efectúan otras funciones, además de la transducción mecano-eléctrica: amplificación, acción de filtro, dando paso a su mejor frecuencia y ciertas acciones poco estudiadas por efecto de las sinapsis con las fibras eferentes.

Discusión

Desde un principio, en fisiología auditiva, se dio un protagonismo especial a aspectos mecánicos, puramente físico acústicos, para explicar el mecanismo de selectividad de frecuencias. De aquí la proliferación de modelos, que persiguen el seguimiento de las vibraciones sonoras en el interior coclear.

Von Békésy desarrolló su teoría en 1960 coherente con la época, con su profesión de técnico en comunicaciones y sobre los estudios anteriores de Herman von Helmholtz. Repasando sus métodos y modelos, nos sentimos incómodos manifestando nuestro desacuerdo. Al manipular cócleas humanas o de animales, desde ratones a un elefante, los huesos temporales eran disecados y sumergidos en soluciones salinas. Colocaba material elástico sobre la ventana oval y redonda. Mediante un vibrador mecánico introducía presión sonora por la ventana oval. Abría la pared coclear bajo el agua para realizar observaciones microscópicas con luz estroboscópica. Diseminaba partículas de plata sobre la membrana de Reissner, estimando que las vibraciones de esta membrana eran similares a las de la basilar. De sus trabajos dedujo la teoría de la onda viajera.

Consideramos que tanta manipulación, está reñida con la función activa que tiene la cóclea. Admitir que las vibraciones de membrana de Reissner son similares a las de la basilar, pese a su disposición y diferencias de masa y elasticidad, es poco riguroso. En la utilización de modelos, parece que no se tiene en cuenta la escala.

Discusión

Desde un principio, en fisiología auditiva, se dio un protagonismo especial a aspectos mecánicos, puramente físico acústicos, para explicar el mecanismo de selectividad de frecuencias. De aquí la proliferación de modelos, que persiguen el seguimiento de las vibraciones sonoras en el interior coclear.

Von Békésy desarrolló su teoría en 1960 coherente con la época, con su profesión de técnico en comunicaciones y sobre los estudios anteriores de Herman von Helmholtz. Repasando sus métodos y modelos, nos sentimos incómodos manifestando nuestro desacuerdo. Al manipular cócleas humanas o de animales, desde ratones a un elefante, los huesos temporales eran disecados y sumergidos en soluciones salinas. Colocaba material elástico sobre a las ventanas oval y redonda. Mediante un vibrador mecánico introducía presión sonora por la ventana oval. Abría la pared coclear bajo el agua para realizar observaciones microscópicas con luz estroboscópica. Diseminaba partículas de plata sobre la membrana de Reissner, estimando que las vibraciones de esta membrana eran similares a las de la basilar. De sus trabajos dedujo la teoría de la onda viajera.

Von Békésy desarrolló su teoría en 1960 coherente con la época, con su profesión de técnico en comunicaciones y sobre los estudios anteriores de Herman von Helmholtz. Repasando sus métodos y modelos, nos sentimos incómodos manifestando nuestro desacuerdo. Al manipular cócleas humanas o de animales, desde ratones a un elefante, los huesos temporales eran disecados y sumergidos en soluciones salinas. Colocaba material elástico sobre a las ventanas oval y redonda. Mediante un vibrador mecánico introducía presión sonora por la ventana oval. Abría la pared coclear bajo el agua para realizar observaciones microscópicas con luz estroboscópica. Diseminaba partículas de plata sobre la membrana de Reissner, estimando que las vibraciones de esta membrana eran similares a las de la basilar. De sus trabajos dedujo la teoría de la onda viajera.

Consideramos que tanta manipulación, está reñida con la función activa que tiene la cóclea. Admitir que las vibraciones de membrana de Reissner son similares a las de la basilar, pese a su disposición y diferencias de masa y elasticidad, es poco riguroso. En la utilización de modelos, parece que no se tiene en cuenta la escala.

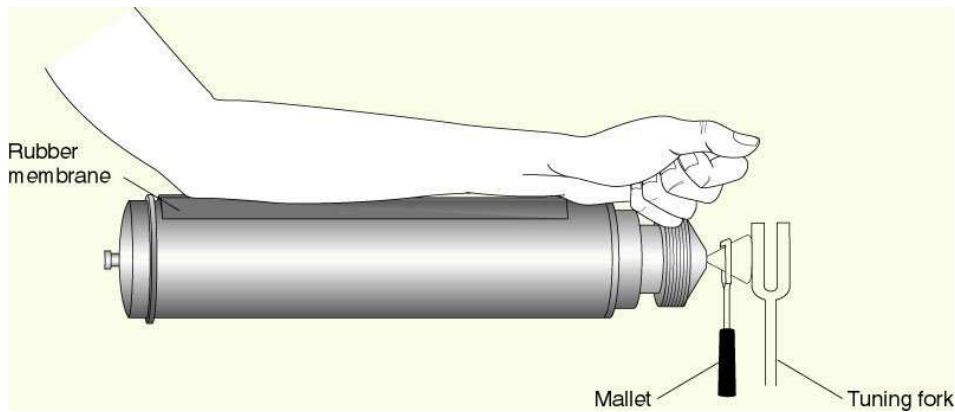
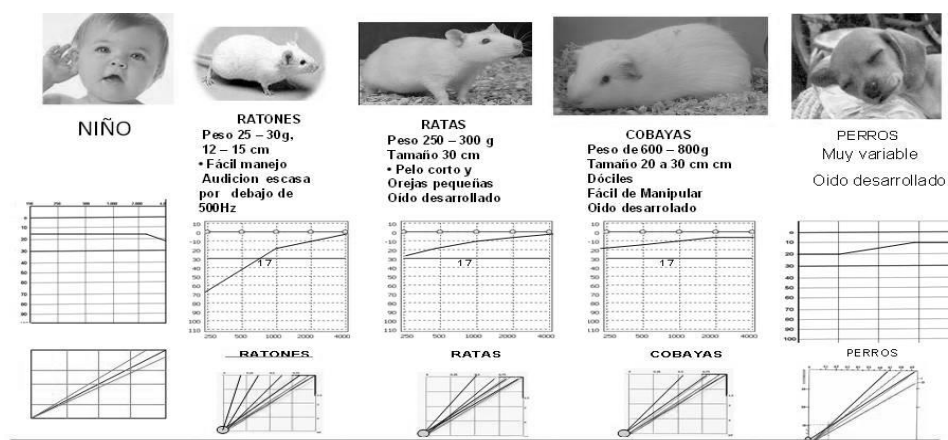


Fig. 8

Modelo mecánico de la cóclea de Bekesy. Pretende sentir en el antebrazo el desplazamiento del punto de inflexión de la membrana en función a la frecuencia. En los grandes mamíferos, entre ellos el elefante con el que trabajó Bekesy, extraña que se pueda aplicar idéntico proceso físico acústico, que respecto a la cóclea de un ratón, con enormes diferencias de tamaño y estructuras. En las medidas que hemos podido realizar entre 250 y 4.000 Hz en distintas especies, comprobamos que tienen perfiles audiométricos coincidentes, pese a sus diferencias morfológicas. Estimamos que esa coincidencia, nada tiene que ver con su morfología.



Una aproximación solo didáctica, basada en experiencias propias y en datos de otros autores. El trazado audiométrico microfónico coclear, entre 250 y 4.000 Hz es una media estadística nuestra, al igual que la determinación del recruitment en esas frecuencias.

Trabajando con transductores, micrófonos o altavoces, se comprueba que la mas minima alteración de forma, longitud, masa o elasticidad en los mismos, produce cambios de resonancia y de comportamiento acústico. En los instrumentos musicales ocurre igual, alterando la tensión de cuerdas, membranas en tambores o longitud en tubos. La resonancia coclear no puede estar al margen de las leyes acústicas. Las extraordinarias diferencias morfológicas cocleares, las alteraciones patológicas ocasionales, los diferentes puntos de penetración de la presión sonora, paradójicamente, nunca producen diploacusias, nunca se aprecian alteraciones cualitativas de la percepción sonora.

En los modelos cualquier variación altera los resultados. La observación de vibraciones intracocleares, requieren técnicas invasivas, que producen cambios en la supuesta ondulación basilar. Además el seguimiento de las ondas viajeras a la largo de la membrana basilar de forma acorde a la frecuencia, solo es posible mediante tonos puros, y elevada presión sonora, dada su ínfima elongación y haciendo una observación, en cada punto basilar. Más allá de microscopia con luz estroboscópica se ha utilizado la espectroscopia Mössbauer, (18,19,20,21) que es una técnica basada en la emisión y la absorción resonante de rayos gamma en sólidos, similar a la espectroscopia de resonancia magnética nuclear. Se trata de una de las técnicas más sensibles, en términos de resolución de energía.

El hecho de que en determinadas condiciones se observen vibraciones en la membrana basilar, no significa necesariamente, que las mismas sirvan para realizar el análisis del espectro sonoro.

A la vista de nuevas investigaciones, la fisiología coclear tiende a dar especial protagonismo a procesos bioquímicos y electrobiológicos.

Un proceso de transducción activo, en donde la presión sonora se convierte en potencial bioeléctrico y el estímulo sonoro según D. Ken, (22), genera las otoemisiones, y en donde se producen procesos de filtro y amplificación, no puede generarse por ondas viajeras ni por resonancia de las estructuras. En un reciente trabajo (23) demostramos que los receptores sensoriales tienen latencia, como corresponde a su decisiva función biológica activa, en contra de lo postulado por Davis en 1.976. Frente a consideraciones físico acústicas, pensamos que la cóclea es una estructura básicamente aperiódica.

La naciente biónica o bioelectronica, nos sitúa ante la posibilidad de considerar un filtro selectivo de paso de banda de estructura biológica, cuestión ya aceptada. Alessandri Noy, el científico del LLNL que dirige el proyecto, Nipun Misra y Julio Martínez, (Universidad de California) (24) trabajan sobre nanotubos y membranas de lípido, casi omnipresentes en las células biológicas, las cuales pueden almacenar una gama ilimitada de “máquinas” proteicas, que efectúan funciones de transporte, transducción de señales y reconocimiento intracelular.

Conclusiones.

El estudio del tránsito de la presión sonora intracoclear, no debe de llevarse a ultranza, al extremo de justificar su misión de selección de frecuencias.

El helicotrema ofrece una impedancia variable sobre la presión sonora, en la rampa timpánica, que depende de la frecuencia del estímulo. La deformación de la “membrana basilar” en los modelos, depende en parte de la relación de presiones entre ambas “rampas”.

En la fig. 3b se comprueba que cuando las dos rampas están separadas por una membrana, la deformación del estímulo en la rampa timpánica es evidente, mientras que se mantiene la forma de onda en la vestibular, en donde los receptores sensoriales, se activan selectivamente a su mejor frecuencia.

La penetración del estímulo sonoro por otros puntos de la “estructura coclear” en los modelos, que equivale a la percepción audiométrica por vía ósea, modifica totalmente la forma de onda intracoclear, sin que fisiológicamente se produzcan alteraciones cualitativas de sensación. Observación sicoacustica evidente actuando con tonos puros.

La creación de modelos de toda índole, solo aporta conceptos básicos elementales, incluso lamentablemente, puede desviarnos de otras importantes líneas de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Schroeder, M. R. y Hall, J. L.: "Model for mechanical to neural transduction in the auditory receptor", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 55, nº 5, pp. 1055-1060, Mayo 1974.
- 2.- Zwicker, E. y Fastl, H.: Psychoacoustics: Facts and Models, Springer, Berlín, 1990.
- 3.- Allen, J. B.: "Cochlear modeling", IEEE ASSP Magazine, vol. 1, nº 1, pp. 3-29, Enero 1985.
- 4.- Georg Béquesy, Experiments in Hearing. American Institute of Physics; Edición: Soft Cover 1 de junio de 1989
- 5.- Drescher J., Schmidt R. and Hardtke H.J., Finite element modeling and simulation of the human tympanic membrane. HNO. 46 (1998) pp 129-13
- 6.- M. CARVER, “Neuromorphic Electronic Systems”, Proceedings of the IEEE, vol. 78 (10), pp 1629- 1639, 1990.
- 7.- M. P. LEONG, C. T. Jin, P. H. Leong, “An FPGA based Electronic Cochlea”, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, no. 7, pp. 629-638, 2003.
- 8- R. F. MEAD, M. CARVER, “An Analog Electronic Cochlea”, IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 36, no. 7, pp. 1119–1134, 1988.
- 9.- H. SHIRAISHI, “Design of an Analog VLSI Cochlea”, M. S. Thesis, School of Electrical and Information Engineering, Sidney Univ., Australia, 2003.

- 10.-A. MISHRA, A. HUBBARD, "A Cochlear Filter Implemented with a Field-Programmable Gate Array", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 4, no. 1, pp. 54- 60, 2002.
- 11.- J. LAZZARO, "Biologically-based Auditory Signal Processing in Analog VLSI", UC Berkeley California, 1992.
- 12.- L. SELLAMI, R. NEWCOMB, "A Pipelined Synthesis of Cochlea DSP Lattice Filters", In Proceedings of the IEEE International Conference on Information, Communications and Signal Processing, Volume 2 (pp. 1163–1167). 1997.
- 13.- L. WATTS, "Cochlear Mechanics: Analysis and Analog VLSI", PHD Thesis. California Institute of Technology. USA. 1993.
- 14.- A. Mishra, A. Hubbard, "A Cochlear Filter Implemented with a Field-Programmable Gate Array", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 4, no. 1, pp. 54- 60, 2002.
- 15.-A.W.Ham. Tratado de Histología. Novena edición 2007.
- 16.- Zwicker, E. y Fastl, H.: Psychoacoustics: Facts and Models, Springer, Berlín, 1990.
- 17.- Cesar Gavilán, Julio Sanjuán. Microphonic potential picked up from the human tympanic membrane. Annals Otology, Rhinology and Laryngology. March, 1964.
- 18.- U. Gonser, Topics in Applied Physics, Mössbauer Spectroscopy, Springer-Verlag, 1975.
- 19.- N. N. Greenwood, T.C. Gibb, Mössbauer Spectroscopy, Chapman and Hall Ltd. London, 1971.
- 20.- William S. Rhode and Luis Robles. Evidence from Mössbauer experiments for nonlinear vibration in the cochlea. J. Acoust. Soc. Am. Volume 55, Issue 3, pp. 588-596 (1974); (9 pages)
- 21.- William S. Rhode and Luis Robles. Evidence from Mössbauer experiments for nonlinear vibration in the cochlea. J. Acoust. Soc. Am. Volume 55, Issue 3, pp. 588-596 (1974); (9 pages)

22.- Kemp DT. Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. J Acoust Soc Am. 1978; 64: 1386-9120

23.-J. Sanjuán, M. Sanjuán. Latencia de los microfónicos cocleares. Acta Otorrinolaringologica Española. Julio-Agosto 2.014 vol.65 Num. 4

24.- Holt, J. K., H. G.Park, O. Bakajin, A. Noy, T. R. Huser, and D. Eaglesham, "Carbon Nanotube-Based Membranes: A Platform for Studying Nanofluidics," IEEE Nanotech Symp. Proc., Munich, Alemania (2004).

COMENTARIO.

En contra de mis convicciones sobre el comportamiento funcional de la cóclea, lejos de las bases puramente mecanicistas firmemente consolidadas por Bekésy, me decido siguiendo a otros autores a realizar ensayos con algunas formas de modelos. Como digo en el artículo, considero prácticamente inútil la pretensión de alcanzar nada parecido a la compleja función coclear. La realización del análisis frecuencial de los estímulos sonoros, se centra especialmente en procesos bioquímicos y bioelectricos, sin que los aspectos mecánicos sean los protagonistas de la elevada complejidad funcional

