

Una vez que la energía acústica es emitida, se propaga por el medio y llega a nuestros oídos. En cada uno de ellos se dará un proceso de transformación donde lo que comenzó como una fuente de energía que excitaba el medio, terminará convertido en una serie de impulsos eléctricos que viajan por nuestro sistema nervioso hasta alojarse en la corteza cerebral.

Este complejo sistema que nos permite la audición podemos dividirlo en tres partes y de esta manera facilitar su estudio. Estas son: una parte externa, una media y una interna.

_el oído externo

Alguien excita el medio y con la primera parte de nuestro oído que se encuentra la energía es con el pabellón auditivo. Esto es como una pantalla con forma parecida a la de un radar que cumplirá la función de filtrar las distintas frecuencias. De esta manera teniendo en cuenta el ángulo con que la energía atraviese esta pantalla proveerá de datos, que junto con otros más, servirán para conocer la ubicación espacial de la fuente. Con todo esto, transmite la energía hacia el conducto auditivo externo. Este conducto de piel muy suave y delicada también actuará como filtro, pero a la vez protegerá al organismo de los objetos externos que puedan dañarlo intentando entrar por él. Para esta función segrega una sustancia, el cerumen, conocido generalmente como "cera"; y permite en su interior el crecimiento de vellos.

Una vez que la energía lo atraviesa llega a encontrarse con el tímpano. El tímpano es una membrana de piel muy delgada de alrededor de un centímetro cuadrado de superficie que vibra al recibir energía acústica de la misma manera en que lo hace el diafragma de un micrófono. De esta manera se produce la primer transducción. La energía acústica se transforma en energía mecánica.

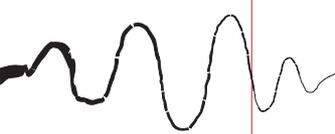
_el oído medio

Ya con el tímpano vibrando, un conjunto de huesos de diminuto tamaño (los más pequeños del cuerpo humano) será el que se encargue de continuar con este proceso.

El primero de ellos es el martillo, que en contacto con la membrana timpánica comenzará a transmitir en forma ósea las vibraciones. El segundo es el yunque y el tercero el estribo. Estos tres huesos se encuentran en contacto directo entre si y se sostienen por medio de un conjunto de músculos, de los cuales son significativamente importantes para la audición, el estapediano (estapedio o estapedianus también se los suele llamar) y el tensor del tímpano.

Estos músculos tienen una función común, y consiste en proteger al tímpano, oído medio e incluso al oído interno de los altos niveles de presión sonora. Lo hacen tensándose en forma proporcional a la presión sonora del estímulo. Es decir que a medida que aumenta el nivel de presión sonora se van poniendo más rígidos y junto con ellos los huesos pierden movilidad. De esta manera las vibraciones óseas encuentran una mayor dificultad para propagarse.

Se encuentra en el oído medio un tubito que lo comunica con la cavidad nasal. Se llama Trompa de Eustaquio. Y por medio de esta tomamos la referencia de presión atmosférica externa. De esta manera evitamos que el tímpano explote con las diferencias de presión que se puedan producir. Este hecho que parece poco frecuente o casi fantástico no está tan lejano de la realidad del hombre urbano. Es común que al subir a un edificio un poco alto la presión atmosférica varíe con la altura lo suficiente como para producir un molesto dolor en los oídos y que nuestros parámetros de audición cambien de una manera en que todo nos sonará distinto, como si escucháramos mucho más fuerte nuestra voz y mas despacio los sonidos externos.



_el oído interno

Para solucionar esto hay que de alguna manera lograr que las trompas de Eustaquio se abran de manera tal que la nueva presión atmosférica ingrese al oído medio. Esto se puede generar de distintas maneras. Por ejemplo masticando un chicle, bostezando, o bien abriendo la boca lo mas grande que se pueda de manera reiterada.

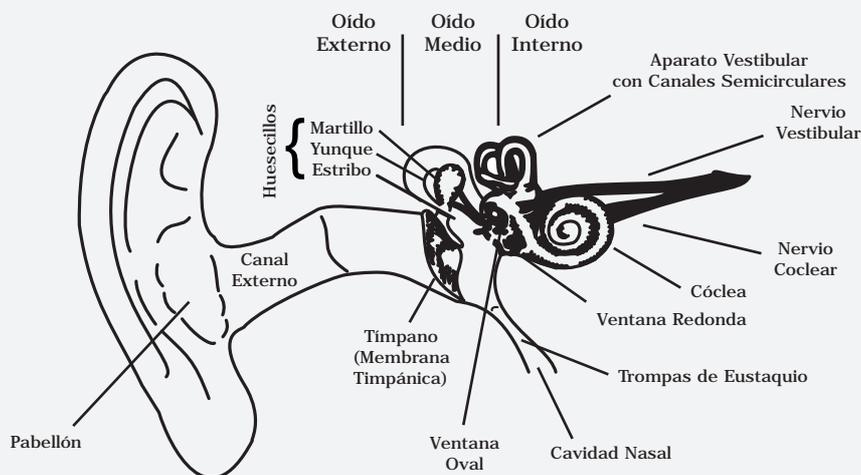
Volviendo a la cadena de huesos auditivos (martillo, yunque y estribo), debemos concluir su transmisión ósea en la primera parte del oído interno, la ventana oval.

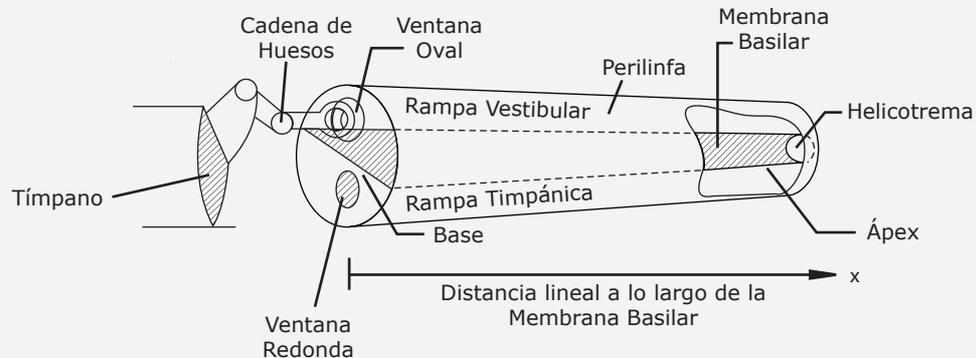
El oído interno está formado por una gran cavidad en forma de caracol llamada Cóclea. Dentro suyo se encuentran una serie de fluidos y células que se encargarán de realizar la última de las trasformaciones de energía.

El estribo golpea contra la ventana oval y esas vibraciones se propagan dentro de la cóclea por un fluido llamado perilinfa. Aquí es donde se produce la segunda transformación de la energía. Por medio de este fluido las vibraciones excitarán una pequeña membrana de forma casi cónica, llamada membrana Basilar que se encuentra ubicada céntricamente en la cóclea y rodeada por fluidos. Lo más llamativo es que está conformada por alrededor de dieciséis mil células / neuronas que responderán al estímulo según su frecuencia. Esto lo que quiere decir es que si la energía acústica que ingreso al sistema auditivo correspondía a una frecuencia determinada, digamos 1000Hz, se excitará una célula que responda a esta frecuencia.

Seguramente cuando se lee este apunte, ya se tiene conocimiento de que los humanos podemos oír entre un rango de frecuencias que oscila entre los 20 y los 20000Hz. Entonces es bueno hacerse una pregunta. ¿Cómo hace la membrana basilar para diferenciar entre estas 19980 frecuencias posibles si solo cuenta con 16000 células? La respuesta no se encuentra en cómo trabaja cada célula; sino más bien en cómo trabajan todas las neuronas en conjunto. Supongamos que ingresa al oído una frecuencia de unos 440Hz. Este hecho producirá que se excite no solo una célula, sino un conjunto de células que formarán una especie de pico en la membrana basilar. Este pico, llamado Banda Crítica, oscilará con las variaciones de amplitud de la energía entrante; y de esta manera entregará datos al sistema nervioso sobre el comportamiento en frecuencia, amplitud y fase de la señal entrante.

Luego de esto el sistema nervioso central envía al cerebro esta información que es alojada en la corteza cerebral (memoria a corto plazo) para allí ser procesada y transformada en lo que nosotros entendemos como sonido.





_banda crítica y efecto de enmascaramiento

Este conjunto de células que al tomar cierto comportamiento lo llamamos banda crítica, oscila en frecuencia y en amplitud proporcional a la frecuencia y la amplitud de la señal entrante.

Supongamos ahora que junto con una señal de 440Hz @ 10dB se emite otra de 442Hz @ 3dB. Por la ínfima distancia de 2Hz existente entre estas dos señales debemos tener en cuenta que ambas se encontrarán en la misma banda crítica. Ya que el tamaño de la banda crítica se incrementará proporcionalmente a la intensidad de cada señal entrante.

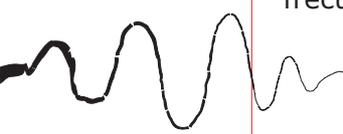
Entonces ¿Se escucharán las dos señales? La verdad es que no. Ya que se producirá el efecto de enmascaramiento. Este efecto nos hace notar que: dadas dos señales (en los laboratorios se experimenta con señales sinusoidales) de una frecuencia lo suficientemente cercana como para pertenecer a la misma banda crítica, y con una diferencia de amplitud de 3dB (o 6dB, depende el comportamiento de los armónicos y si la unidad es de potencia o intensidad) o mayor, se percibirá la de mayor amplitud. Tendiendo siempre a enmascarar con mayor facilidad desde las frecuencias graves hacia las agudas.

Por este motivo es que, cuando subimos a un colectivo con un crujiente motor con predominancia de frecuencias graves y pedimos un valor de boleto al colectivero, no nos escucha y tenemos que repetirlo más fuerte. O bien que hallamos grabado los diálogos para un cortometraje en una locación extremadamente ruidosa y que al momento de realizar la selección de tomas para montarlas y post producir las, nos damos cuenta de que no se entiende lo que los actores han dicho mientras actuaban y tengamos que correr el riesgo de descartarlas por más que la actuación halla sido excelente. Ya que el doblaje muchas veces no resulta tan efectivo como se lo imagina generalmente.

_batidos de primer orden

Consideremos ahora que las señales entrantes al oído son nuevamente dos, una de 440Hz @ 10dB y la otra de 442Hz @ 9dB. La diferencia de amplitud en este caso ya no es la misma, ha pasado a ser de solamente 1dB. Ambas estarán bajo la misma banda crítica, pero no se producirá el fenómeno de enmascaramiento.

¿Qué sucede entonces? Sucede algo llamado batido de primer orden o como generalmente lo llaman los libros españoles: batimento. Este fenómeno dice que: al ser la diferencia de frecuencia entre las dos señales(en los laboratorios se experimenta con señales sinusoidales) menor a 20Hz y encontrarse ambas en la misma banda crítica, no podremos diferenciarlas y percibiremos una sola señal de frecuencia y amplitud variables según la resultante de la suma de estas dos señales originales. Si la diferencia se encuentra entre 20 y 50Hz, la percepción resultante dependerá mucho del sujeto y de las condiciones de audición, pero la mayoría percibiremos con dificultad la diferencia de frecuencia sin la facilidad de percibir el batido. Y por último, si la diferencia es mayor a



_el teorema
de Fourier y
batidos de
segundo
orden o
resultantes

50Hz, escucharemos ya sin dificultad dos señales.

Así como existen los batidos de primer orden, existen también los de segundo orden. Estos últimos fueron notados gracias al descubrimiento de un físico-matemático francés llamado Fourier (Jean Baptiste Joseph Fourier). Y entender primero el teorema de Fourier facilitará la comprensión de este segundo tipo de batidos.

La historia dice que corrían en Francia los tiempos de Napoleón y sus expectativas de invadir Inglaterra estaban más que expuestas. Obviamente este emprendimiento solo podía llevarse a cabo por vía marítima, pero encontraba como obstáculo el fuerte poderío de las pequeñas y ágiles embarcaciones inglesas que bien defendían las costas inglesas. Para lograr este objetivo se envió a construir una flota de embarcaciones de inmenso tamaño, con el fin de derrotar fácilmente a las embarcaciones más pequeñas. Pero puestas estas en el mar, sucedía que se partían al medio como si un gran hacha imaginaria las atravesara.

Para comprender y superar este desafortunado hecho, Napoleón pidió a Fourier que investigara y tratase de encontrar una solución.

Al cabo de unos meses de trabajar sobre el tema, Fourier llegó a la conclusión de que lo que estaba partiendo las embarcaciones eran las pequeñas olas que golpeaban su casco.

El reclamo fue inmediato, ya que nadie podía imaginar que algo tan insignificante como una ola de 50cm estuviera quebrando una embarcación 50m construida con excelentes materiales. Pero este descubrimiento no hacía hincapié en solo una ola, sino en la sumatoria de todas las pequeñas olas que golpean el casco. Haciendo que la energía sumada sea semejante a la de una gran ola.

En síntesis, lo que Fourier dijo fue que toda esa gran cantidad de pequeñas olas golpeando a la vez contra el casco de la embarcación, se sumaban y daban como resultado una ola más grande y más compleja, que contenía la resultante de todas las amplitudes, fases y frecuencias de las olas que la componían.

Así, el enunciado matemático dice algo como lo siguiente:

Toda función periódica de período P puede construirse a partir de una suma de sinusoides cuyas frecuencias guarden una relación de múltiplo entre sí y su primer armónico, fundamental o f_1 sea de período P . Cada sinusoide debe poseer la adecuada amplitud y fase.

Y adaptado para sonido sería algo así:

Todo sonido complejo periódico está formado por una suma de señales sinusoidales. La sinusoide más grave de toda esta suma que lo forman, tiene el mismo período que el sonido complejo. Es decir que la sinusoide más grave es la f_1 o primer armónico de la señal compleja. Las sinusoides tienen que ser múltiplos entre si (es decir todas múltiplo de f_1), y son sus fases, amplitudes y frecuencias las que al sumarse formarán la señal compleja.

Esto nos daría que una nota de un piano (que es una señal compleja y periódica) está formada por la suma de una gran cantidad de señales sinusoidales. Es por la relación que crean entre sus frecuencias, fases y amplitudes. En este caso si la nota es un la en 220Hz, su f_1 o primer armónico o fundamental será 220Hz. Su segundo armónico o f_2 será 440Hz. Y su tercer armónico o f_3 será 660Hz. Y así hasta que se extinga la energía. Todas son múltiplo de f_1 .

Para este último comentario es bueno aclarar que la energía entregada a cada uno de estos armónicos (f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , etc. se llaman así por la relación armónica entre si) será



distribuida de forma distinta para cada sonido. Siendo esta información junto con la evolución temporal las más importantes para la identificación del timbre.

Entendido a grosso modo el teorema de Fourier se puede explicar el fenómeno conocido como batidos de segundo orden. Lo que se descubre gracias a tan notable teorema es que: estando ausente la f_1 y contando con al menos dos armónicos consecutivos, igualmente se percibirá en forma auditiva (con menor intensidad) la f_1 .

Es decir que sí solo tenemos sonando $f_8 = 1760\text{Hz}$ y $f_9 = 1980$, escucharemos muy por debajo a una señal cuya frecuencia será de 220Hz . Esta será la f_1 .

