

Estudio sobre la percepción de ondas sonoras complejas

Gerardo Della Vecchia – Bernardo Piñero

Trabajo de Investigación – Tecnología Musical IV (Cátedra Raúl Minsburg)

Licenciatura en Artes Electrónicas

Universidad Nacional de Tres de Febrero

Buenos Aires, Argentina

Julio de 2004

Planteo del problema

Puede decirse que la naturaleza en su totalidad esta compuesta por vibraciones, todo lo que nuestros sentidos pueden percibir, todo lo que existe puede verse desde este punto de vista, incluso nuestro cuerpo. Por supuesto que lo mismo ocurre con el sonido. Nuestro sistema auditivo puede detectar las vibraciones que llegan hasta él a través de un medio elástico como el aire, el agua o algún sólido que vibren entre 20 y 20000 veces por segundo aproximadamente. Como se puede notar, la relación entre la frecuencia máxima y la mínima audibles es realmente importante; la más “rápida” es 1000 veces mayor a la más “lenta”.

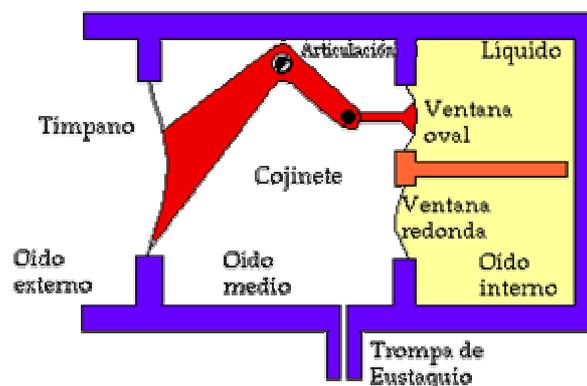
El oído escucha a través de un sistema de octavas. La Acústica como disciplina, identifica y separa esas octavas, sus límites son: 16 hz., 32 hz., 63 hz., 125 hz., 250 hz., 500 hz., 1000 hz., 2000 hz., 4000 hz., 8000 hz., y 16000 Hz. Como vemos, entran unas diez octavas en el rango audible. El sentido de la vista por ejemplo, reconoce las vibraciones de ondas de luz existentes entre 7 y 14 Mhz., por lo tanto la relación entre el mínimo y el máximo es sólo del doble. Sin embargo, si consideramos la diferencia numérica neta obtenemos que al oído le corresponde un ancho de banda de 1980 hz y a la vista 7.000.000hz, o sea, un rango 3500 veces superior.

Observamos que el sistema auditivo agrupa y separa sonidos que ingresan juntos en una onda compleja. Intentaremos dilucidar cuáles son y a qué están relacionados los mecanismos que el sistema auditivo utiliza para estos fines.

Fisiología del oído

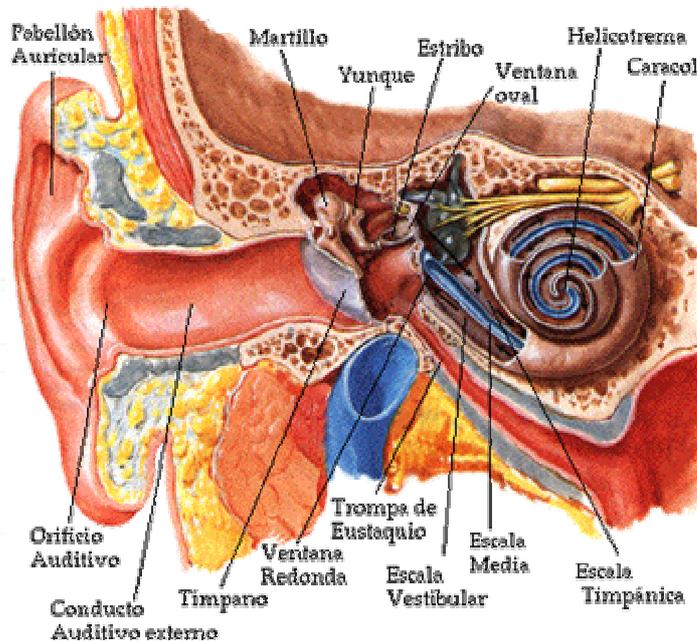
Intentaremos resumir brevemente como está constituido el órgano auditivo y cuales son sus funciones, haciendo énfasis en aquellas partes y estructuras más importantes para el desarrollo de modelos perceptuales. Luego intentaremos explicar cuales son los procesos que el oído deja de lado para que sean realizados en un ámbito de análisis “superior”, a nivel neuronal.

El componente más externo del órgano auditivo es el pabellón acústico, el cual se encarga de recoger las vibraciones del aire y dirigirlas al canal externo. El sonido encausado en dicho canal se dirige hacia la membrana timpánica, este es el lugar principal a través del cual el sonido ingresa al oído medio. Esta membrana se mueve con las vibraciones que inciden en ella, y las transmite a través de tres huesillos: el martillo, el yunque y el estribo. La cavidad del oído medio se comunica con el exterior del cuerpo a través de la trompa de Eustaquio, la cual es un conducto que llega hasta las vías respiratorias y que permite igualar la presión del aire a ambos lados del tímpano. Los huesillos transmiten la vibración hacia el oído interno, a través de la ventana oval.



Nos detendremos y centraremos en la configuración del oído interno, donde reside principalmente la complejidad y gran capacidad del órgano auditivo. Mencionaremos primero alguno de sus componentes: ventana oval, ventana redonda, cóclea y nervios coclear y vestibular.

Las ventanas oval y redonda son la comunicación de la cóclea con el oído medio. La cóclea (que contiene a la membrana basilar, el ápex, y la elicotrema) es una cavidad en la cual se aloja un fluido llamado perilinfa, que no puede ser comprimido. Este fluido es agitado por las vibraciones que le llegan principalmente a través de la ventana oval.

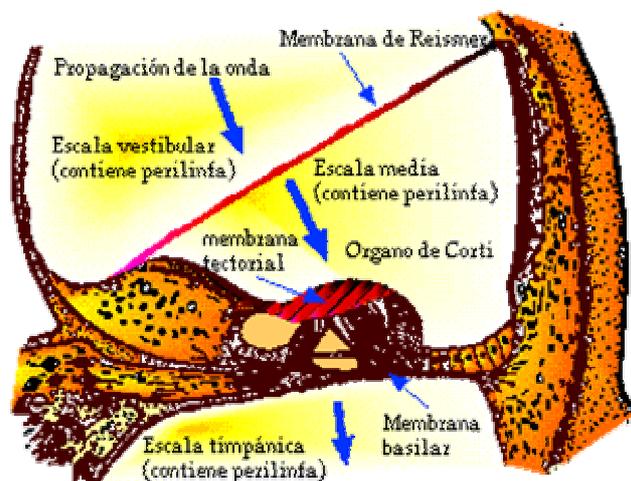


La membrana basilar determina las propiedades hidromecánicas de la cóclea. Su ancho, espesor, y su rigidez decrecen desde su extremo inicial hasta el ápex unas 10.000 veces. La función principal de la membrana basilar es la de detectar las diferentes frecuencias. Las vibraciones transmitidas, se convierten en oscilaciones de presión en la perilinfa, dentro de la rama vestibular. Las diferencias de presión resultantes flexionan la membrana basilar hacia arriba y abajo. Hasta este lugar el sonido como información no sufre mayores modificaciones. Las

vibraciones se transmiten en forma análoga de un medio a otro, y es a partir de aquí en donde el órgano auditivo comienza a decodificar la compleja onda recibida.

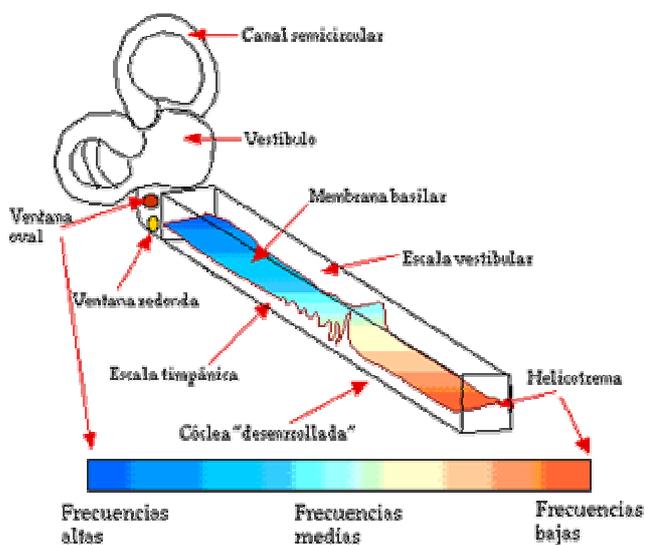
A medida que la onda se propaga, su amplitud alcanza un máximo en un punto determinado del camino, para luego decrecer rápidamente hacia el ápex. Alrededor de unas 16.000 unidades receptoras llamadas células pilosas o ciliadas recogen estos movimientos e imparten señales eléctricas (de algunas decenas de milivolts) a las neuronas. Para un tono simple las oscilaciones máximas de la membrana sólo se darán en una determinada zona de la membrana basilar, cuya posición dependerá de la frecuencia del tono en cuestión. Es decir que existe una zona de máxima estimulación (de resonancia) para cada frecuencia del espectro audible.

El oído es capaz de realizar una especie de análisis de Fourier (descomposición) de la onda compleja que llega a él, utilizando como primer filtro la membrana Basilar. Dependiendo de su ubicación en el órgano de Corti, se pueden distinguir dos tipos de células ciliares: internas y externas. Existen alrededor de 3500 células ciliares internas y unas 20000 células externas. Ambos tipos de células presentan conexiones o sinapsis con las fibras nerviosas aferentes (que transportan impulsos hacia el cerebro) y eferentes



(que transportan impulsos provenientes del cerebro), las cuales conforman el nervio auditivo. Sin embargo, la distribución de las fibras es muy desigual: más del 90% de las fibras aferentes inervan a las células ciliares internas, mientras que la mayoría de las 500 fibras eferentes inervan a las células ciliares externas.

Las células ciliares que se excitan indican la presencia de una frecuencia en un lugar determinado del espectro, que necesita una duración mínima para ser evidente y otra cantidad de tiempo de ausencia de estímulo para retornar al reposo. Esto está relacionado de forma directa con los límites que el sistema auditivo posee. Por ejemplo: un sonido debe poseer cierta duración mínima para que el sistema auditivo logre establecer su altura en el registro, o (en relación con la capacidad del oído de integrar elementos en el tiempo) en un recinto el sonido directo y el reflejado no deben llegar al oído en una diferencia de tiempo mayor a cierta cantidad de milisegundos, para que este estímulo no sea percibido como eco, sino como una agradable reverberación.



Una vez que estos filtros y demás elementos hidromecánicos han actuado sobre la señal, ¿qué sistema se encarga de analizarla, integrarla o separarla y con qué criterios lo hace?

Éste maravilloso órgano tan complejo no guarda dentro de él la respuesta, ya que a esta altura nos encontramos en el límite del órgano descrito, el punto en el cual el nervio coclear conduce esta información en forma de impulsos eléctricos al cerebro.

Es entonces el cerebro el encargado del procesamiento de la información que el órgano auditivo le transfiere, ya como información codificada, y no analógica.

El cerebro como procesador auditivo

Los impulsos nerviosos generados en el oído interno contienen (en forma codificada) información acerca de la amplitud y el contenido espectral de la señal sonora; estos dos parámetros están representados por la tasa de impulsos y la distribución de los mismos en las distintas fibras, respectivamente.

Las fibras nerviosas aferentes conducen esta información hacia distintos lugares del cerebro, donde se encuentran estructuras de diversa complejidad, encargadas de procesar sus diferentes variables.

Por ejemplo, en los centros "inferiores" del cerebro se recibe, procesa e intercambia información proveniente de ambos oídos, con el fin de determinar la localización de las fuentes del sonido en el plano horizontal en función de los retardos interaurales. En los centros "superiores" de la corteza existen estructuras más especializadas que responden a estímulos más complejos.

Una de las actividades que forman parte de la percepción y que es realizada en el cerebro, es la que permite determinar, como ya hemos mencionado, en qué dirección se encuentra la fuente del sonido. Este proceso está determinado por la correlación que realiza el sistema nervioso central entre las señales que llegan desde ambos oídos.

Podemos afirmar que la direccionalidad depende de la comparación espacial y temporal de la información entre oídos. O sea, depende de a qué cóclea le llega más nivel que a otra y a cual grupo de células pilosas se estimula en mayor medida. Para un mismo estímulo, si de la cóclea derecha llega un menor nivel de presión sonora, y un contenido menor de frecuencias agudas, y además este mismo estímulo llega más tarde que al otro oído, la sensación será la de un sonido que proviene de nuestro lado izquierdo. El mayor nivel y el contenido mayor de frecuencias agudas en un oído se debe a que la cabeza no actúa para él, como filtro y atenuador, lo que es detectado por el nuestro sistema de audición. La diferencia en el tiempo de arribo de una señal entre un oído y el otro es utilizada también como herramienta para determinar la posición de la fuente.

Se supone también que dentro de nuestro sistema de procesamiento central hemos construido moldes básicos con los cuales comparamos las complejas estructuras de los patrones de excitación espacial de la membrana basilar, cada vez que logramos establecer una correspondencia con uno de estos moldes surgen las sensaciones reconocimiento de altura o de un timbre en particular.

Una característica de todos los procesos de percepción y de reconocimiento de patrones es el “descarte selectivo de información”. Esto se relaciona con el principio del “*Mínimo esfuerzo – Máxima eficiencia*” con que opera el sistema nervioso. Para ser capaz de extraer lo que es significativo del gran volumen de información sensorial que provocan los estímulos (y de este modo poder identificar los objetos y sus interrelaciones causales), el sistema debe contar con una serie de filtros que le ayuden a separar aspectos relevantes de los irrelevantes. Estos filtros deben estar “sintonizados” en rasgos o patrones invariantes de los estímulos considerados importantes (por traspaso de información genética, o como resultado de un proceso de aprendizaje).

En la percepción sonora, el primer rasgo, el más primitivo, que tiende a ser reconocido por el sistema nervioso es probablemente la **intensidad**, con la sonoridad como correlato perceptivo. Este correlato no depende de ningún rasgo o detalle fino de la estructura del estímulo, sino del flujo total de energía acústica. El siguiente rasgo a ser considerado es la periodicidad de un sonido (representada por la distribución espacial de los máximos de resonancia o por la distribución temporal de los impulsos nerviosos). En este proceso de reconocimiento se extrae la sensación subjetiva de **altura** (altura espectral). El tercer nivel de refinamiento es la consideración de la potencia que poseen cada uno de los parciales del espectro del tono, que lleva a la sensación de **timbre**.

La percepción del timbre es sin embargo, solo la primera etapa en la operación de reconocimiento de la fuente sonora (o por ejemplo, la identificación de un instrumento en un ámbito musical). La percepción de la cualidad tonal es el mecanismo por medio del cual se extrae información de la señal auditiva adecuada para:

- 1) almacenamiento en la memoria con un adecuado rótulo de identificación, y
 - 2) comparación con información previamente almacenada e identificada.
- (La primera operación involucra aprendizaje o condicionamiento)

La Cognición

¿Qué es lo que realmente ocurre en el sistema nervioso desde el punto de vista físico, cuando la información sensorial es procesada y los objetos son representados, reconocidos e integrados en la escena ambiental? ¿Qué ocurre cuando eventos y objetos son imaginados? La información sensorial es codificada en el sistema nervioso en forma de una distribución espacial y temporal de impulsos eléctricos. Podemos definir como “representación” mental o cerebral de un objeto (visual, acústico, olfativo, etc.) a la distribución específica de señales eléctricas en la red neural de la corteza cerebral, que aparece en correspondencia causal, inequívoca con el conjunto de rasgos recibidos por los sentidos, durante la presentación de ese objeto en particular. Entonces la “cognición” no es más que la aparición de una distribución específica de actividad neural en ciertas áreas de la corteza que está en una correspondencia unívoca con el objeto, evento o concepto que está siendo reconocido o imaginado. Por ejemplo: cada vez que reconocemos los tonos de un clarinete, está ocurriendo una distribución de actividad neural única, y que es la misma para todos los tonos del clarinete.

El acto de recordar un suceso consiste en la reactivación de esa particular distribución o patrón de señales neurales que fueron específicas del evento sensorial original. Cuando este patrón es disparado por acción externa, por ejemplo, escuchando un tono, reconocemos o recordamos que este tono proviene, digamos, de un clarinete. Cuando esta actividad es disparada internamente (por una asociación o por un acto de voluntad), estamos recordando el sonido de un clarinete en ausencia de un sonido externo verdadero.

Esto representa la forma más simple de activación del mecanismo de imaginación acústica. Experimentos realizados han demostrado que un compositor que imagina una secuencia de sonidos evoca una actividad nerviosa específica en las áreas de procesamiento acústico idéntica a la que aparecería si realmente escuchara esa secuencia. La actividad neural específica que se presenta en un proceso imaginativo, también puede ser disparada por un proceso alucinatorio, durante un sueño, o por medio de una estimulación electrofisiológica del cerebro durante una neurocirugía.

Hipótesis experimental:

El estudio realizado a través de las experiencias propuestas intentan justificar la conjetura de que al sistema auditivo (adherimos a la definición que expresa que está compuesto por el oído externo, medio, interno y el cerebro) le es más fácil separar sonidos de diferentes características espectrales y de diferentes evoluciones en amplitud que sonidos que contienen desarrollos similares entre sí, tanto en contenido armónico como en intensidad. También sostenemos que gracias a la memoria auditiva y a un proceso de decorrelación temporal el oído logra reconocer y separar más fácilmente de un todo a aquello que ya ha analizado y clasificado con anterioridad.

El oído utiliza un sistema de memoria para poder identificar los distintos estímulos que llegan a él. Gracias a este método es capaz de clasificar los sonidos de acuerdo a su condición de haber sido escuchados anteriormente o no. Este tipo de ordenación está directamente relacionada con la capacidad del sistema auditivo de entender los sonidos de acuerdo a sus características de evolución tímbrica y de intensidad. Una vez que el oído ha recibido, analizado, rotulado y archivado un sonido, no sólo es capaz de reconocerlo si lo escucha nuevamente, sino que también puede separarlo si se encuentra presente dentro de una forma de onda más compleja (con más información).

La capacidad del oído, ya sea para rotular un sonido, como para reconocerlo y separarlo de un todo en una escucha compleja, es función de la relación que existe entre las características tímbricas, temporales, de intensidad y de altura del todo con respecto al sonido en cuestión.

Metodología de la Investigación:

Se propone corroborar la hipótesis a través de una serie de experiencias de audición realizadas a sujetos de distinta formación: músicos, estudiantes de sonido y personas que no estén íntimamente relacionadas con el tema.

Para el desarrollo de la experiencia se ha diseñado un total de 9 muestras complejas que abarcan distintas configuraciones de relación de timbre y evolución de amplitud entre los dos sonidos que las integran. El tiempo no participa como variable, tanto las muestras como sus componentes tienen una duración fija de 4 segundos. Los componentes 1 y 2 de cada muestra se encuentran sincronizados en cuanto a su aparición. No se tiene en cuenta la condición de tonalidad ni de consonancia o no de los sonidos.

Las muestras complejas serán reproducidas a cada sujeto el cual deberá completar una planilla con consignas y casilleros.

Resultados

A continuación se analizarán y clasificarán los resultados obtenidos. Se espera poder confeccionar la siguiente lista de muestras ordenadas de menor a mayor dificultad de discernimiento de componentes.

- 1) Conocido – Conocido / No Timbre – No Din
- 2) Conocido – Conocido / Si Timbre – No Din
- 3) Conocido – Conocido / Si Timbre – Si Din
- 4) Desconocido – Conocido / No Timbre – No Din
- 5) Desconocido – Conocido / Si Timbre – No Din
- 6) Desconocido – Conocido / Si Timbre – Si Din
- 7) Desconocido - Desconocido / No Timbre – No Din
- 8) Desconocido - Desconocido / Si Timbre – No Din
- 9) Desconocido - Desconocido / Si Timbre – Si Din

Referencias: No: Diferente Timbre: Desarrollo tímbrico Si: Similar Din: Envoltente Dinámica

Orden resultante de la experimentación:

Primera escucha: “¿Qué escuchás?” :

a) Posiciones resultantes de mayor a menor dificultad:

- 1)Desconocido – Desconocido / Si Timbre – Si Din
- Desconocido – Desconocido / Si Timbre – No Din
- Desconocido – Conocido / Si Timbre – Si Din
- Conocido – Conocido / Si Timbre – Si Din
- 2)Desconocido – Desconocido / No Timbre – No Din
- 3)Desconocido – Conocido / No Timbre – No Din
- 4)Desconocido – Conocido / Si Timbre – No Din
- Conocido –Conocido / Si Timbre – No Din
- 5) Conocido – Conocido / No Timbre – No Din

b) Conclusión:

Se observa que las combinaciones de sonidos que poseen cierta similitud tímbrica presentan mayor dificultad a la hora de individualizarlos en una escucha compleja.

Luego se observa que entre los sonidos de diferentes características tímbricas, los que son conocidos son más fácilmente discernibles dentro de una escucha compleja.

Resultados posteriores a la escucha de los componentes de cada muestra:

a) Posiciones resultantes de mayor a menor complejidad:

- 1) **Conocido – Conocido / Si Timbre – Si Din**
- 2) **Desconocido – Desconocido / Si Timbre – Si Din**
- 3) **Desconocido – Conocido / Si Timbre – Si Din**
- 4) **Desconocido – Desconocido / Si Timbre – No Din**
- 5) **Desconocido – Desconocido / No Timbre – No Din**
- 6) **Desconocido – Conocido / Si Timbre – No Din**
- 7) **Desconocido – Conocido / No Timbre – No Din**
- 8) **Conocido – Conocido / Si Timbre – No Din**
- 9) **Conocido – Conocido / No Timbre – No Din**

b) Conclusiones:

Atribuimos las diferencias entre los resultados obtenidos entre ambas escuchas, a la acción de la memoria auditiva. Es decir, que luego de percibir los componentes por separado, analizarlos, clasificarlos y rotularlos, el sistema auditivo fue capaz de reconocerlos en un entorno complejo e identificarlos individualmente.

Esta experiencia demuestra que es el timbre la principal característica del sonido a la cual el sistema auditivo presta atención tanto a la hora de etiquetarlo, como en el momento de establecer una correspondencia entre un nuevo estímulo y otro previamente almacenado.

Creemos ad-hoc que las diferencias entre los resultados obtenidos y los esperados se deben a alguna imperfección en el método de experimentación, como puede ser la forma de confección de las distintas muestras de sonido que formaron parte de esta experiencia.

Bibliografía:

- 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.
- Zwicker, E. y Fastl, H.: "Psychoacoustics: Facts and Models", Springer, Berlín, 1990.
- Ganong, W. F.: "Fisiología médica, El Manual Moderno", México, , 11ª edición, 1988.
- Juan g. Roederer: "Acústica y psicoacústica de la música" Ricordi, Buenos Aires, 1995.
- Bergallo E., Ruffa F., Sánchez Quintana R.: "Acústica Aplicada" CeArTec, Buenos Aires, 2002.
- Gustavo Basso. "Análisis Espectral". Ediciones al Margen La Plata. 2001.
- Tirso de Olazábal, "Acústica Musical y Organología". Ricordi, Bs. As. 1998.
- B. Cattoi. "Apuntes De Acústica y Escalas Exóticas". Ricordi, Bs.As.
- Albert. S. Bregman. "Auditory Science Analysis". A Bradford Book. Londres, 1990.