

La percepción acústica: Tono y timbre

Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso

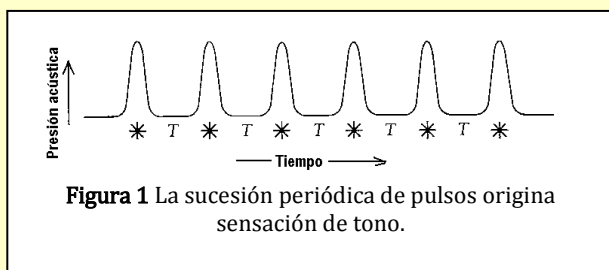
Dpto.de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid

En la audición intervienen el oído y el cerebro, el primero convierte las ondas acústicas en impulsos nerviosos y el segundo detrae de estos últimos la sensación acústica. El oído se comporta como un sofisticado analizador de sonidos y responde a las leyes de la Física, cosa que no sucede con la actividad del cerebro, la cual no se ajusta en absoluto a esas leyes. Más aún, se desconocen los mecanismos por los que el cerebro obtiene las sensaciones acústicas a partir de los impulsos que le llegan por los nervios auditivos. Tan solo se han establecido ciertos principios psicológicos que pretenden esclarecer la generación de las sensaciones auditivas. Por ello, los conceptos de tono y timbre se presentan generalmente de forma muy simplista, ofreciendo de ellos una visión excesivamente caricaturizada y notablemente alejada de la realidad. Este artículo ofrece una descripción realista de las sensaciones de tono y timbre incorporando los más modernos avances en la psicología de la audición.

Las exposiciones se complementan con demostraciones audiovisuales a las que el lector puede acceder siguiendo los vínculos que aparecen en el texto.

Percepción del tono

Existen dos teorías que explican cómo y porqué percibimos el tono o altura de los sonidos. Una de ellas, conocida como *Teoría de la periodicidad* propone que cuando el complejo psicoacústico (oído y cerebro) recibe con regularidad una sucesión de pulsos acústicos, detrae de ellos una sensación de tono cuya frecuencia se corresponde con la frecuencia con que se suceden los estímulos.



Desde este punto de vista, parece evidente que la creación de la sensación de sonido corre a cargo del cerebro con exclusividad. En este caso, el oído se limita a ser un mero captador de impulsos, sin

intervenir en el análisis de la naturaleza y composición espectral de cada pulso. En estos hechos se fundamenta el funcionamiento de la sirena de vapor.

La otra explicación, conocida como *Teoría de la Localización* es la elaborada por G.V. Békésy, la cual ha sido expuesta en un artículo precedente (ver el nº 2 de esta revista). Esta teoría permite explicar además la sensación de timbre, por lo que resulta más completa. No obstante, hay razones prácticas que avalan la veracidad de una y otra, de forma que lo más acertado es aceptar que los mecanismos de percepción acústica disponen de una y otra formas de actuación. Por otro lado, la percepción del tono está influenciada por otros factores.

Demostración 1: [Comprobación de la Teoría de la Periodicidad](#)

Influencia de la duración del estímulo en la percepción del tono.

La Teoría de la periodicidad, propugna que el cerebro "cuenta" el número de pulsos recibidos por segundo, según se expresa en la figura 1. Pero para hacer la estimación del tono, el cerebro necesita un número mínimo de "muestras". Teóricamente, con

sólo dos de ellas es posible medir el período con que se suceden pero este es un procedimiento matemático que nada tiene que ver con los mecanismos psíquicos.

La "Teoría de la Periodicidad puede ser resumida en la expresión:

$$(\Delta f) \cdot (\Delta t) \geq k$$

Esta expresión recuerda formalmente a la del Principio de Incertidumbre de Heissenberg, uno de los pilares de la Física Cuántica. Por esta razón también se la conoce como "Ley de la Incertidumbre Acústica". En ella se expresa que el producto de la frecuencia f de un sonido tonal por el tiempo de su duración t no puede ser menor que una cierta cantidad, si se quiere percibir sensación tonal. Dicho producto es obviamente un número determinado de pulsos de onda, precisamente, es el número mínimo de pulsos que necesita el cerebro para identificar de qué frecuencia se trata, es decir, la altura del tono.

Experimentalmente puede comprobarse que la percepción de tonos agudos requiere tiempos de estimulación más breves que en el caso de los tonos graves, lo cual resulta lógico toda vez que en los sonidos agudos los pulsos se suceden más rápidamente que en los graves. En efecto, si se presentan series de tonos puros de 300, 1000 y 3000 Hz en pulsos de duración creciente, de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 períodos puede comprobarse que al principio sólo se percibe un *clic* sin sensación tonal, la cual aparece más tarde. El número de pulsos mínimo para obtener sensación tonal varía ligeramente de unos individuos a otros.

Demostración 2: [Dependencia temporal de la percepción del tono](#)

Influencia de la intensidad del estímulo en la percepción del tono

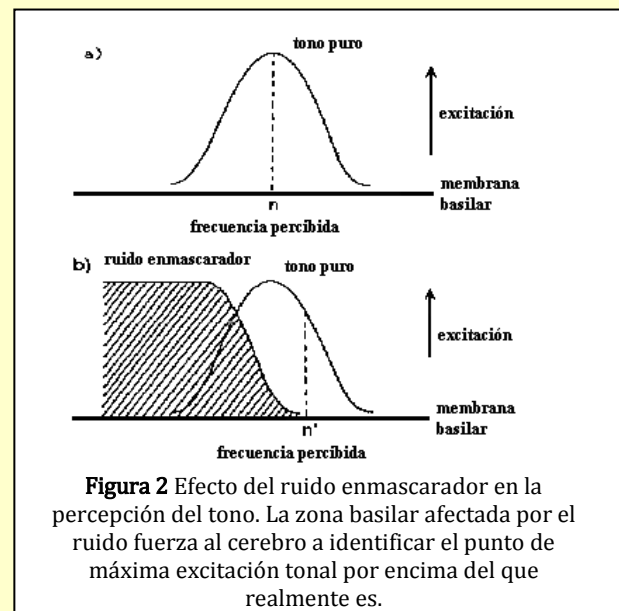
Muchos individuos experimentan alteraciones de hasta el 10 % en la percepción del tono de los sonidos a causa del nivel de intensidad de los mismos. En general, un aumento de la intensidad tiende a elevar el tono percibido en los sonidos agudos y a bajarlo en los graves. Para comprobar este efecto puede realizarse el siguiente experimento: Primeramente es preciso presentar al oído un tono puro de 200 Hz. Y se ha de ajustar el nivel de volumen del equipo reproductor hasta que el nivel de ese tono coincida con el umbral de audición, es decir, que apenas se oiga. Seguidamente se presentan al oído seis pares de tonos puros de 0,5 s de duración con frecuencias de 200, 500, 1000, 3000 y 4000 Hz. En cada pareja, el primer estímulo tiene un nivel de intensidad constante y el segundo lo tiene aumentado en 30 db. Se puede comprobar

entonces que en frecuencias bajas el tono parece bajar y en las altas parece subir.

Influencia del ruido enmascarador

La estimulación de la membrana basilar es acampanada, según muestra la figura 2, existiendo un punto de máxima excitación. Así pues, el cerebro identifica el pico de máxima excitación, extrayendo de este modo la sensación puntual de tono, según preconiza la Teoría de la Localización.

Puede comprobarse experimentalmente que si se presentan alternativamente, un tono puro de 1000 Hz (fig. 2-a) y ese mismo tono parcialmente enmascarado por un ruido de banda ancha de hasta 900 Hz. (fig. 2-b) puede apreciarse que cuando se oye el tono parcialmente enmascarado por el ruido, el primero parece elevarse.



Demostración 3: [Influencia del ruido enmascarador en el tono](#)

Percepción del timbre

La Teoría de la Localización explica que la percepción del timbre tiene lugar merced a complejos mecanismos que el cerebro realiza a partir de los estímulos procedentes de las neuronas afectadas en el órgano de Corti por los diferentes armónicos de un sonido complejo.

Demostración 4: [Audición de armónicos en un sonido complejo](#)

Ahora bien, la cosa es aún más compleja ya que el reconocimiento que hacemos de la voz de un individuo o de un instrumento musical se

fundamenta no solo en la composición espectral del sonido sino también de la evolución temporal de ese espectro desde su emisión hasta su extinción y también de la envolvente de la intensidad. Realmente, el oído humano se comporta como un eficientísimo analizador de sonidos, fruto del desarrollo evolutivo de nuestra especie, que “apostó” por una organización social compleja dejando en un segundo término otros medios de supervivencia propios de las demás especies zoológicas.

Demostración 5: [El tono de las campanas.](#)

Demostración 6: [Efecto del espectro en el timbre.](#)

Efecto de la envolvente de intensidad en el timbre

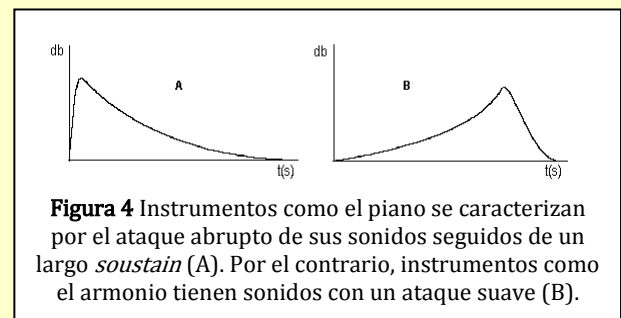
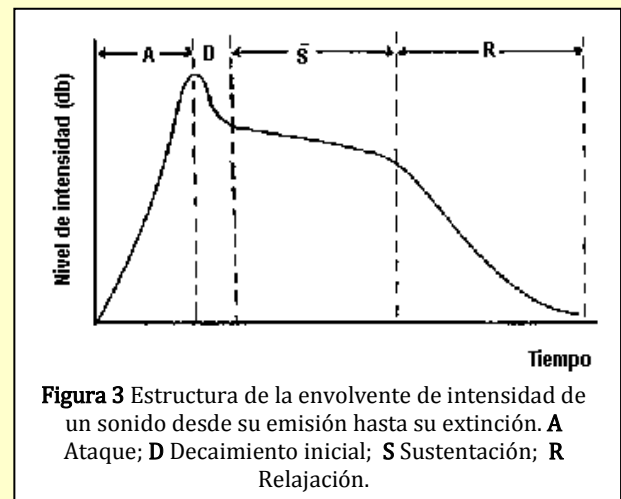
Todo sonido tiene una evolución temporal de la intensidad que puede ser esquematizada según muestra la figura 3. Esta empieza con un inicio en el que la intensidad sube del valor cero hasta una cierta intensidad inicial, esta intensidad se mantiene un cierto tiempo para, finalmente, extinguirse. Resulta que la forma de esta evolución temporal de la intensidad es, además de la composición espectral, otro sello de identidad del timbre.

Los instrumentos musicales de madera tienen ataques más suaves y prolongados que los instrumentos de cuerda pulsada. Pues bien, si mediante un sintetizador de sonido se presenta una misma melodía de tonos complejos, primeramente con una envolvente simétrica (con ataque suave y decaimiento corto) y en segundo lugar con envolvente asimétrica (con ataque violento y decaimiento prolongado), el timbre que percibiremos parece evolucionar de un instrumento de madera a otro de cuerda pulsada.

Otra forma más espectacular de demostrar este efecto consiste en lo siguiente: Con ayuda de un ordenador equipado con software de edición de sonido, se obtiene un archivo de audio (a) a partir de la interpretación por un piano de una partitura conocida. En segundo lugar, ese mismo piano ha de interpretar la misma partitura, en sentido inverso (es decir, como si la partitura estuviera escrita en una lámina de vidrio y esta se hubiera leído por su cara posterior), a partir de lo cual obtendremos el archivo de audio (b).

A continuación escucharemos primero el archivo (a), en el cual reconoceremos la melodía con la voz del piano. Luego escucharemos el archivo (b) el cual será una sucesión ininteligible de notas en el que no reconoceremos la melodía aunque, eso sí, reconoceremos la voz del piano y también la armonía vertical. Finalmente, al reproducir el

archivo (b) en sentido inverso reconoceremos de nuevo la melodía y la armonía vertical pero ¡el piano no suena como piano, sino como un armonio de iglesia!



Demostración 7: [Efecto de la envolvente temporal en el timbre.](#)

La percepción del timbre y la memoria

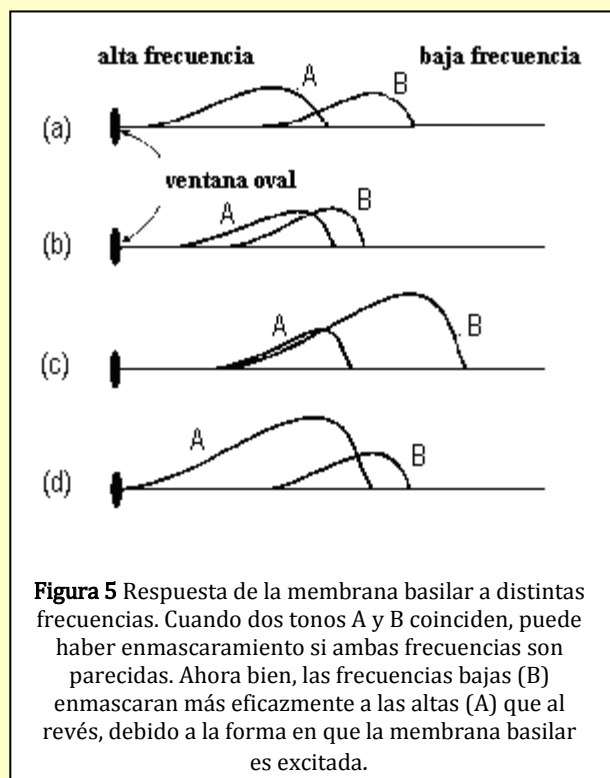
El cerebro tiene almacenados en la memoria una ingente cantidad de registros de timbres, de forma que cuando se oye un sonido se activan los mecanismos psíquicos de reconocimiento, entre los cuales figura la memoria como elemento primordial. Como comprobación de todo ello, puede hacerse el siguiente experimento: En primer lugar es preciso escuchar la voz de un instrumento musical, por ejemplo, fagot que recorre su tesitura de tres octavas. A continuación oiremos esas tres octavas con sonidos sintéticos, para los cuales se ha tomado como modelo la nota más aguda del fagot. Todas las notas reproducen exactamente la misma composición espectral. Tendremos verdaderas dificultades para reconocer al fagot en la segunda audición, las cuales no encontramos en la primera.

Demostración 8: [Diversidad del timbre en los instrumentos musicales.](#)

Ello se debe a que la composición espectral de los sonidos emitidos por los instrumentos musicales varía a lo largo de su tesitura. Generalmente asumimos que el timbre de un instrumento que interpreta una escala, es el mismo en todas las notas, y que lo único que varía es la frecuencia fundamental y las de sus armónicos superiores. Sin embargo esto no es así, en realidad, cada nota de un mismo instrumento tiene su propio timbre, distinto al de las restantes. Todas estas variaciones se hallan almacenadas en la memoria y, cuando lo que oímos no concuerda con nuestros datos almacenados, el reconocimiento del sonido da resultados negativos.

Enmascaramiento

Cuando un punto de la membrana basilar es afectado por dos sonidos, se dice que hay enmascaramiento. Generalmente, los tonos graves enmascaran más a los agudos que los agudos a los graves. Ello se debe a la forma en que excitan la membrana basilar y también a la zona de la membrana que unos y otros afectan. Es un hecho comprobado que un sonido intenso de altura grave puede enmascarar un sonido débil de altura aguda, pero nunca al contrario.



Esto se comprende a la vista de lo expuesto sobre la estructura y funcionamiento del oído interno; puesto que si el punto de máxima excitación de la membrana basilar para tonos de baja frecuencia está en el extremo apical de la cóclea, mientras que para tonos de alta frecuencia se sitúa en su extremo basal, la onda excitada por un tono de alta frecuencia

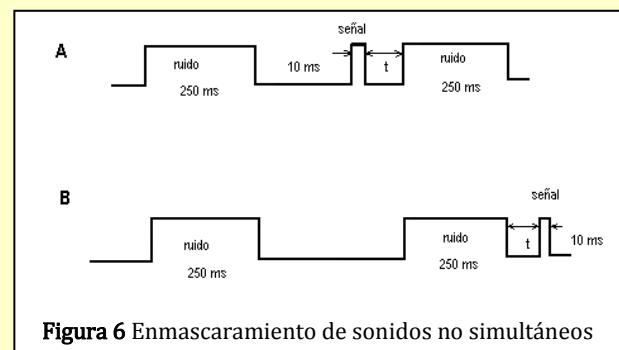
nunca alcanzará el punto de máxima excitación de un tono de baja frecuencia. Por el contrario, para llegar a su punto receptor, las ondas producidas por tonos de baja frecuencia han de pasar forzosamente por los puntos receptores de los tonos de frecuencias superiores. Cabe esperar que la excitación de la membrana basilar en estos puntos pueda interferir con la percepción de tonos de alta frecuencia, esto es precisamente lo que sucede si el tono de baja frecuencia es lo suficientemente intenso.

Demostración 9: Influencia de la frecuencia en el enmascaramiento.

Es cierto que para la mayoría de frecuencias y niveles de intensidad, un ruido de banda ancha (que contiene casi todas las frecuencias) enmascara con mayor eficacia que un tono puro de la misma intensidad. Ahora bien, esto carece prácticamente de interés en Música, ya que en este caso lo verdaderamente importante es el enmascaramiento por otros sonidos. Para que este último tipo de enmascaramiento sea eficaz, la intensidad del tono enmascarador ha de estar unos 15 db por encima del tono enmascarado. La situación real en el caso de los sonidos musicales es que estos nunca son tonos puros, sino que tienen una frecuencia fundamental (real o virtual) y armónicos superiores cuya intensidad puede ser muy superior a la de la frecuencia fundamental. Con frecuencia, los casos de enmascaramiento corren de cuenta de esos armónicos superiores.

Demostración 10: Análisis de un sonido de banda ancha.

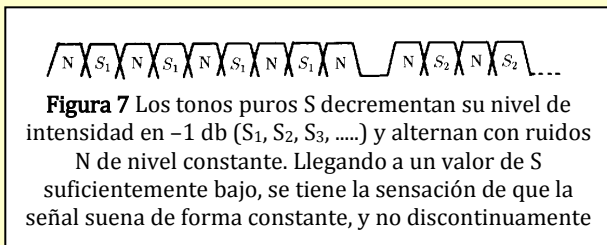
La afectación de la membrana basilar por los estímulos acústicos dura un breve tiempo, después que el estímulo ha cesado. Por este motivo puede haber enmascaramiento entre dos sonidos no simultáneos, pero temporalmente muy próximos.



La figura 6 muestra el enmascaramiento de un tono puro por ruido de banda estrecha, ambos no simultáneos. Si el tiempo t que separa el ruido enmascarador del tono enmascarado se hace menor

que 0,1 s se aprecia una pérdida en la percepción del tono que se hace más pronunciada a medida que t se reduce. Este enmascaramiento se da, lo mismo si el tono precede al ruido que si el ruido precede al tono.

También el enmascaramiento entre sonidos no simultáneos puede perturbar la percepción de una secuencia de sonidos. Así, si escucháramos una serie de tonos puros de 2000 Hz cuyo nivel decrece en -1 db por cada cuatro pulsos, separados todos ellos 0,125 s, percibiríamos todos ellos sin grandes dificultades. Pues bien, si ahora entre pulso y pulso se intercala un ruido enmascarador de nivel constante y 0,125 s de duración, se puede comprobar que el cerebro resulta engañado por el enmascaramiento y llega un punto en el que los pulsos se confunden, dando sensación de continuidad (fig. 7).



Finalmente, diremos que el enmascaramiento puede afectar a la percepción de tonos virtuales procedentes de armónicos superiores si el ruido enmascarador actúa sobre la región de la membrana basilar en la que esos armónicos son detectados. Este es un asunto que se verá más adelante.

La audición binaural

El pabellón de la oreja actúa como un captador direccional, así, cuando un foco emite ondas sonoras, nuestros oídos son excitados con diferente intensidad según sea la posición del foco respecto de nosotros². El cerebro puede tomar conciencia de la posición del foco sonoro en virtud de la desigual estimulación de uno y otro oído.

Cuando un foco acústico no está en frente del oyente, los recorridos de la onda acústica que llega a uno y otro oído son distintos, sucediendo que el mismo estímulo llega antes a un oído que al otro y, en consecuencia, la fase de las vibraciones difiere en ambos oídos. Además, dado el carácter direccional de la oreja como elemento captador, la intensidad que recibe un oído es superior a la que recibe el otro.

² En muchas especies animales las orejas son móviles, como es el caso de caballos, conejos, cérvidos, etc. y en el caso de los simios, incluida la especie humana, la función de captación direccional se lleva a efecto mediante la movilidad de la cabeza.

Estas tres diferencias son captadas y procesadas por el cerebro, lo cual le permite identificar la situación del foco acústico.

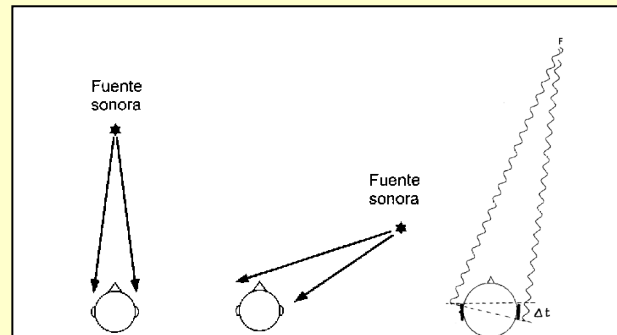
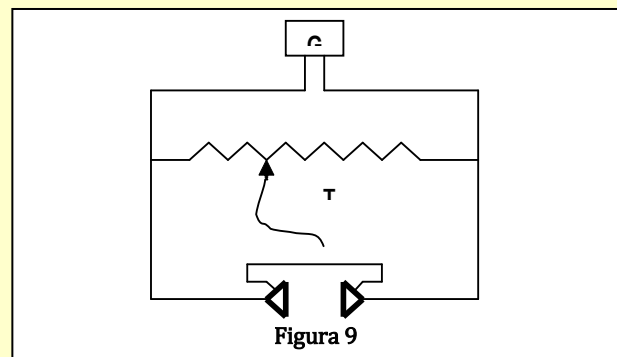


Figura 8 Localización binaural de un foco sonoro. Si las señales acústicas en ambos oídos son idénticas, el cerebro localiza la fuente en frente del observador (a). Por el contrario, la localización lateral del foco es tanto más acusada cuanto más dispares sean las señales en uno y otro oídos (b). En estas condiciones, un oído oye con más intensidad que el otro, ambos oídos reciben la misma señal a destiempo Δt y la señal que llega al mismo tiempo a ambos oídos presenta un desfase (en la figura, $\frac{3}{4} \lambda$) (c)

Demostración 11: Localización binaural

El sencillo experimento esquematizado en la figura 9 resulta muy ilustrativo y convincente: Se trata de un aparato que reproduce el sonido constante del motor acelerado de un automóvil. La señal de esta grabación es dividida mediante el divisor de tensión T y cada uno de los "fragmentos" de la señal es enviada a uno de los auriculares de un casco estereofónico. Al desplazar de izquierda a derecha el mando de T, tendremos la impresión de que un vehículo pasa por delante de nosotros, de izquierda a derecha, debido a que las intensidades con que los auriculares excitan nuestros oídos siguen la misma pauta que en el caso de que el vehículo pasase realmente por delante de nosotros.



Cuando un espectador sentado en el centro del patio de butacas escucha el concierto de una orquesta, sus oídos están en todo momento excitados de forma desigual. La orquesta es ciertamente un foco sonoro

extenso, pero por su disposición habitual, predominan los sonidos agudos procedentes de violines y flautas en el lado izquierdo, mientras que en el derecho abundan los sonidos graves de violoncelos, contrabajos, trombones y tubas. Esto motiva que las sensaciones obtenidas por uno y otro oídos al escuchar, en un momento dado, un *tutti* orquestal son distintas, pudiéndose localizar tan sólo con ayuda de los oídos las posiciones de los distintos grupos de instrumentos, lo que le da al sonido percibido todo su relieve y color.

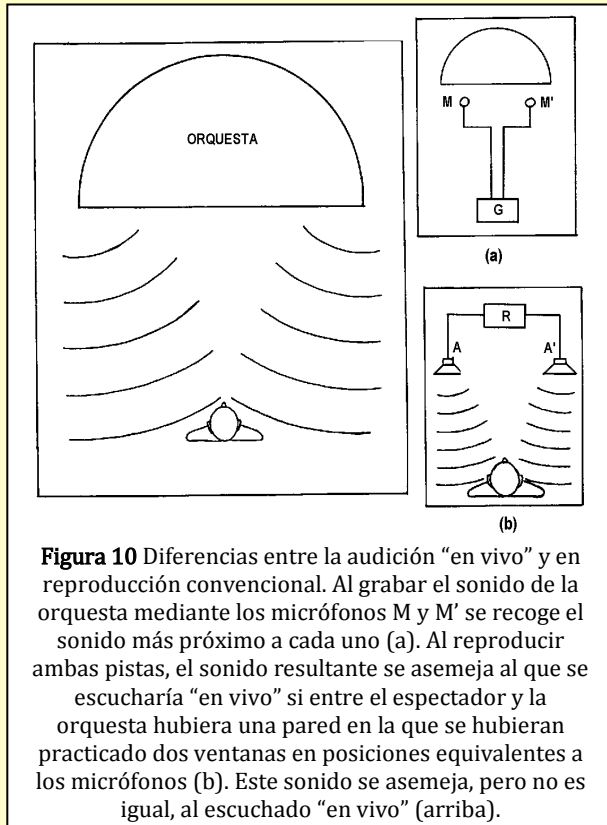


Figura 10 Diferencias entre la audición "en vivo" y en reproducción convencional. Al grabar el sonido de la orquesta mediante los micrófonos M y M' se recoge el sonido más próximo a cada uno (a). Al reproducir ambas pistas, el sonido resultante se asemeja al que se escucharía "en vivo" si entre el espectador y la orquesta hubiera una pared en la que se hubieran practicado dos ventanas en posiciones equivalentes a los micrófonos (b). Este sonido se asemeja, pero no es igual, al escuchado "en vivo" (arriba).

Precisamente por este motivo, los sistemas de grabación y reproducción estereofónicos convencionales se basan en la obtención de dos grabaciones simultáneas, obtenidas mediante dos micrófonos convenientemente separados que luego son reproducidas por los altavoces, dispuestos en la forma que se indica en la figura 10-a. El oyente tiene así una sensación sonora, si no igual, análoga a la del que escucha a la orquesta en vivo. Si las grabaciones que escucha el oyente de la figura 10-b procediesen de una misma fuente monoaural, sus oídos percibirían la misma sensación, con lo que se perdería el relieve estereofónico.

A la vista de todo lo anteriormente expuesto, se explica también el efecto producido por un órgano en una catedral. En este tipo de recintos, el sonido se refleja innumerables veces, de forma que los oídos perciben no sólo el sonido directo, sino también sus numerosas reflexiones, lo que impide la localización auditiva del foco sonoro, dando la sensación de que

lo llena todo. Quizá por ello, el órgano es el instrumento religioso por antonomasia. La audición binaural constituye además un recurso estimable a la hora de discernir sonidos en ambientes ruidosos posibilitando la audición de sonidos que, de otro modo, estarían totalmente enmascarados.

Demostración 12: Diferencias de nivel de enmascaramiento.

Otros fenómenos auditivos

Sin duda, la audición humana es una función tan necesaria como compleja que a lo largo de miles de generaciones ha desarrollado nuestra especie por evolución natural. Y ha tenido que ser así en el caso de un ser pensante eminentemente social. Consideremos que, para sobrevivir, al *homo sapiens* no le era suficiente el disponer de un finísimo oído capaz de detectar cuanto antes al depredador sino, más bien, lo importante era reconocer por la voz a los distintos individuos del clan e intercambiar ideas y emociones por medio del habla, y para ello era necesario un sistema psicoacústico enormemente desarrollado, capaz sobre todo de percibir los timbres con precisión y eficacia. El gran desarrollo del complejo psicoacústico en nuestra especie ha dado lugar a un alto grado de sofisticación en los mecanismos cerebrales de la audición, algunos de los cuales veremos a continuación.

Tono virtual

Cuando oímos un concierto interpretado por una orquesta sinfónica escuchamos desde las frecuencias muy graves emitidas por contrabajos y tubas hasta los más agudos emitidos por los violines y el piccolo, pasando por todos los tonos intermedios emitidos por los diferentes instrumentos. El conjunto de todos los sonidos y su secuenciación constituyen el cuerpo acústico de la sinfonía o concierto interpretados. Así, cuando escuchamos una obra que en todo o en parte hemos memorizado con anterioridad, se ponen en marcha los mecanismos psicoacústicos de reconocimiento que nos permiten identificar la obra ya conocida.

Por otro lado, con frecuencia escuchamos música en reproductores que, por su pequeño tamaño o su baja potencia, no son capaces de reproducir las frecuencias graves. Tal sucede, por ejemplo, cuando paseamos por un parque mientras escuchamos un programa musical mediante una pequeña radio de pilas. Supongamos que en ese programa se está emitiendo algo tan conocido como la "Oda a la alegría" de la Sinfonía nº 9 de L.V. Beethoven. Ciertamente, los sonidos que reproduce nuestro pequeño aparato no son iguales que el sonido que

emiten la orquesta y el coro en la interpretación en vivo de tan majestuosa partitura. Sin embargo nuestro cerebro reconoce la obra que tan familiar nos resulta pese a no estar oyendo buena parte de los sonidos que realmente la conforman. En nuestro caso faltan los sonidos graves y, sin embargo, reconocemos la obra, e incluso disfrutamos de la audición.

¿Qué está pasando? Pues, ciertamente, algo extraordinario y al propio tiempo fascinante: nuestro cerebro, con una velocidad y eficiencia enormes, está recomponiendo el sonido incompleto (falta de frecuencias graves) y generando sensaciones virtuales de tonos graves no reproducidos que, junto a los más agudos, reales, proporcionan la impresión de estar escuchando lo que realmente no escuchamos. A este mecanismo psicoacústico, de gran importancia en la Música, se le denomina *percepción del tono virtual*.

Cuando oímos un sonido complejo, detraemos la sensación de altura de la frecuencia fundamental, mientras que los restantes armónicos contribuyen a la sensación del timbre. Ahora bien, nuestro sistema psicoacústico está diseñado de forma tal que cuando falta la frecuencia fundamental seguimos teniendo la misma sensación y, aún más, si faltan los armónicos segundo, tercero, etc., la sensación de tono persiste. A esta sensación se le llama *tono virtual*.

La percepción del tono virtual puede comprobarse si, por medio de un sintetizador, se presenta al oído un tono complejo formado por el fundamental y los nueve armónicos siguientes. Si en sucesivas audiciones se van eliminando, primero el fundamental, luego este y el segundo armónico, luego los tres primeros, y así sucesivamente, puede comprobarse que la sensación tonal no varía (aunque sí el timbre) y corresponde en todo momento a la frecuencia fundamental aunque esta no esté presente.

Demostración 13: [Tono virtual](#)

Matemáticamente, la frecuencia fundamental es el máximo común divisor de las frecuencias superiores (o, si se prefiere, las frecuencias superiores son múltiplos enteros de la fundamental). Así pues, lo que hace el cerebro con pasmosa eficacia cuando escuchamos un sonido complejo es identificar todas y cada una de las frecuencias que lo componen y luego detraer la sensación tonal del máximo común divisor de todas ellas, esté o no presente en el espectro (Fig. 11). Son posibles diversos experimentos que ponen de manifiesto la extraordinaria destreza del cerebro en la percepción de tonos virtuales.

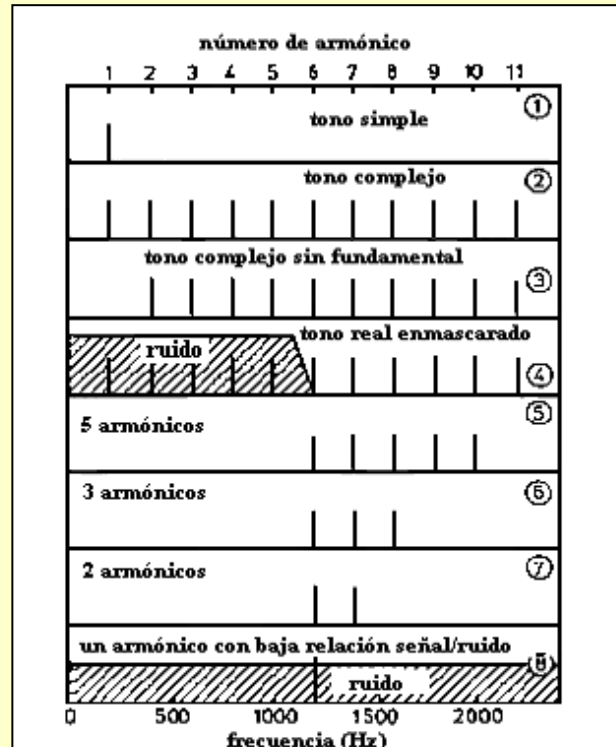


Figura 11 Ocho sonidos diferentes que presentan un mismo tono. En los casos 1 y 2 el tono percibido es real y en los restantes casos es virtual.

Demostración 14: [Tono virtual y armónicos aleatorios](#)

Uno de ellos consiste en presentar al oído un tono complejo formado por tres de sus armónicos superiores. Luego, a lo largo de diez pasos, esos armónicos verán progresivamente incrementada su frecuencia, de forma que las diferencias entre ellas se mantengan constantes. Automáticamente, el cerebro proporciona un tono virtual que se va elevando.

Demostración 15: [Desplazamiento del tono virtual](#)

Otra demostración consiste en presentar una terna de armónicos de 800, 1000 y 1200 Hz seguida de otra de 850, 1050 y 1250 Hz. Apreciaremos claramente que el tono virtual se eleva. El tono virtual percibido pasa de 200 Hz a 210 Hz. Si en el primer caso el cerebro encontró el m.c.d. sin dificultades, en el segundo se ha visto forzado a promediar un m.c.d.

Demostración 16: [Desplazamiento del tono virtual](#)

En conclusión, el cerebro detrae la sensación de tono virtual mediante un mecanismo de obtención del m.c.d. de las frecuencias de los armónicos superiores realmente percibidas. Esta operación computacional del cerebro queda perfectamente ilustrada en la siguiente demostración.

Demostración 17: [Enmascaramiento espectral y tono virtual](#)

Tonos de combinación

Se dice que un resonador tiene comportamiento lineal cuando la fuerza necesaria para obtener desplazamientos es proporcional a los desplazamientos obtenidos. Así, si se aplicase un movimiento armónico simple a un sistema resonante de respuesta lineal, el movimiento producido sería también armónico simple. Cuando la respuesta dada por un resonador no es lineal, se dice que hay *distorsión*, habiendo distorsión de frecuencia o de amplitud según que el resonador responda de forma no lineal a la frecuencia o a la amplitud. También puede haber una distorsión de fase cuando las fases de los componentes de una vibración compleja no son conservadas en la respuesta.

Cuando sobre un sistema distorsionante, como lo es el oído, inciden dos tonos puros de frecuencias f_1 y f_2 se producen sonidos armónicos $2f_1, 2f_2, 3f_1, 3f_2, \dots$ y una serie de sonidos de frecuencias $f_1+f_2, f_1-f_2, 2f_1+f_2, 2f_1-f_2, \dots$, llamados *tonos de combinación*. Como vemos, cabe distinguir entre tonos de combinación adicionales (descubiertos por H.V. Helmholtz) y diferenciales, descubiertos simultáneamente por G.A. Sorge³ y G. Tartini⁴. Estos últimos son los tonos de combinación de mayor importancia. Normalmente, cuando escuchamos simultáneamente dos tonos de frecuencias f_1 y f_2 se produce una sensación tonal de frecuencia grave (f_1-f_2) y también otra de frecuencia aguda ($2f_1-f_2$). Este fenómeno psicoacústico tiene en parte una causa física en la no linealidad de respuesta del oído ante las frecuencias y amplitudes de las ondas acústicas que a él llegan.

La presencia de los llamados *tonos de Tartini* puede ponerse de manifiesto de varias maneras. Una de ellas es presentar, por ejemplo, dos tonos puros simultáneos de 1000 y 1200 Hz. que producirán (entre otros menos audibles) un tono diferencial de $4 \times 1200 - 3 \times 1000 = 800$ Hz. Posteriormente se superpone un tono de 804 Hz. Se puede comprobar perfectamente la aparición de batidos virtuales entre esta última frecuencia y el tono de Tartini de 800 Hz.

Demostración 18: [Tonos de Tartini I.](#)

Otra posibilidad es presentar de nuevo los mismos tonos de 1000 y 1200 Hz, si bien ahora el segundo se irá elevando paulatinamente hasta 1600 Hz para

luego volver a descender hasta su valor inicial. En estas condiciones se puede percibir con nitidez un tono diferencial de Tartini del tipo $4f_1-3f_2$ que asciende desde 800 Hz hasta 2400 Hz para luego descender.

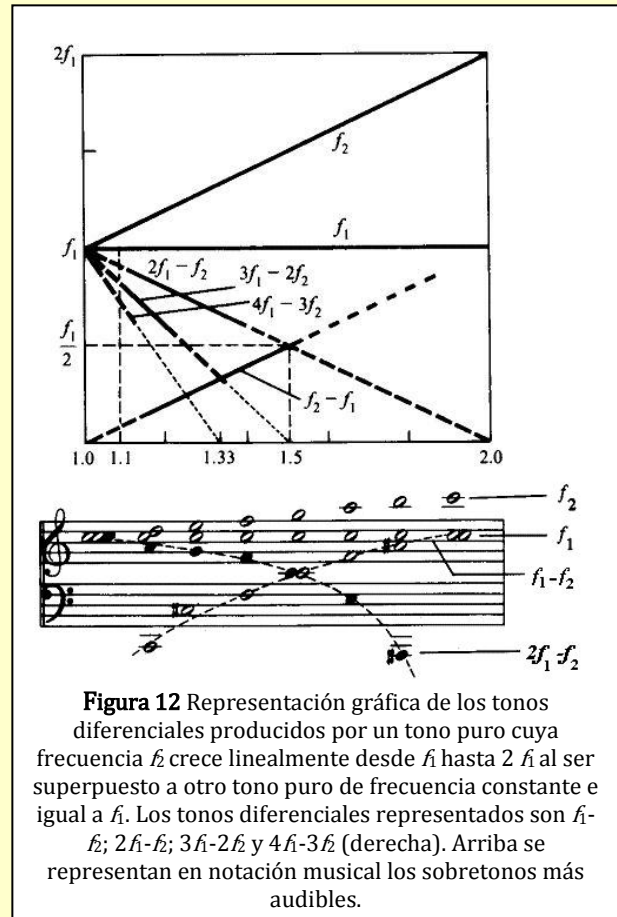


Figura 12 Representación gráfica de los tonos diferenciales producidos por un tono puro cuya frecuencia f_2 crece linealmente desde f_1 hasta $2f_1$ al ser superpuesto a otro tono puro de frecuencia constante igual a f_1 . Los tonos diferenciales representados son f_1-f_2 ; $2f_1-f_2$; $3f_1-2f_2$ y $4f_1-3f_2$ (derecha). Arriba se representan en notación musical los sobretonos más audibles.

Demostración 19: [Tonos de Tartini II.](#)

Finalmente, si se escucha la interpretación del pentagrama superior de la figura 13 efectuada con un instrumento de tesitura aguda y penetrante como, por ejemplo un piccolo, llega a percibirse al propio tiempo la misma melodía, tres octavas más grave, formada por tonos diferenciales

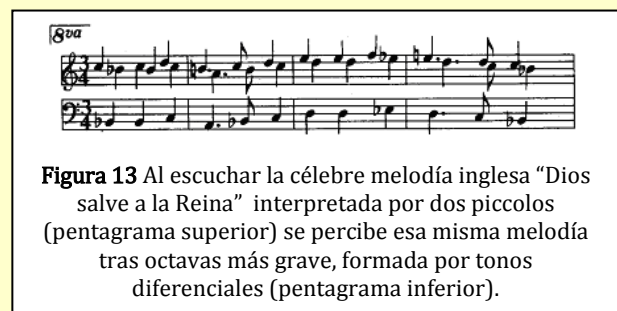


Figura 13 Al escuchar la célebre melodía inglesa "Dios salve a la Reina" interpretada por dos piccolos (pentagrama superior) se percibe esa misma melodía tras octavas más grave, formada por tonos diferenciales (pentagrama inferior).

³ Georg Andreas Sorge (1703-1778) teórico y compositor alemán que destacó como organista y clavecinista.

⁴ Giuseppe Tartini (1692-1770) compositor, violinista y teórico italiano

Efecto "reunión"

Cuando cuatro contertulios conversan animadamente formando un corro, hablando todos al tiempo (situación demasiado frecuente y que exaspera a muchas personas), es posible entender lo que dice el interlocutor de enfrente, pese a la verborrea de los personajes laterales.

La capacidad de distinguir una voz entre muchas se llama efecto de reunión, pudiendo ser muy interesante al presenciar una representación operística o bien para pasar a primer plano los sonidos de los instrumentos de un conjunto de cámara, si tocan cerca del oyente.

Pudiera pensarse que este efecto es sencillamente una cuestión psicológica de atención, pero realmente hay algo más, como demuestra el hecho de que el efecto de reunión se pierde al escuchar por un solo canal de audición (es el caso de las audiciones monoaurales). Supongamos que la persona que habla, a la cual queremos oír está delante de nosotros mientras que las fuentes sonoras que queremos ignorar están dispuestas lateralmente. El sonido emitido por la persona de enfrente, llega a nuestros oídos al mismo tiempo y en fase, lo que da lugar a que sus efectos se sumen y refuercen, cosa que no sucede con los sonidos procedentes de las restantes fuentes.

Efecto de precedencia

Se puede demostrar de forma muy sencilla mediante un equipo estereofónico que reproduzca una grabación monofónica, de manera que salga el mismo sonido por los dos altavoces. Si el oyente se sitúa en posición equidistante de ambos, percibirá el sonido como si proviniese de un foco sonoro imaginario situado en un punto intermedio entre los dos altavoces; pero si está colocado de forma que la diferencia de distancias a uno y otro altavoz sea superior a 30 cm., todo el sonido parecerá llegar del altavoz más cercano.

Este efecto se produce siempre en el interior de un automóvil. Si la intensidad de los dos altavoces es la misma, el conductor escucha sólo el de la izquierda y su acompañante el de la derecha. Uno de los dos puede remediar su situación actuando sobre el mando del balance aunque, eso sí, desarregla definitivamente a la otra persona y, por si fuera poco, él mismo tampoco quedará satisfecho, pues ahora la voz del locutor le parecerá ensanchada y difusa.

Como vemos, el efecto de precedencia es malo para la estereofonía, si bien es bueno para la vida ordinaria y también para escuchar música en vivo.

Cuando se oye a un instrumento o a un cantante en una sala de conciertos, sólo una porción del sonido percibido procede de la fuente sonora, mientras que el resto es sonido reflejado en las paredes y en el techo. Este sonido reflejado llega al oído algo más retrasado (en general, unos pocos milisegundos) y se suma a la sonoridad.

Los mecanismos psicofísicos por los que el cerebro interpreta la sensación auditiva le permiten identificar la posición del foco de la forma que ya se explicó (véase la audición binaural), aprovechando para ello el sonido directo. Las ondas sonoras reflejadas, que llegan al oído algo más tarde, sirven para que nos demos cuenta de la distancia a la que se halla el foco. Esto último parece bastante razonable si se tiene en cuenta por ejemplo, que al escuchar la homilía dominical desde la primera fila de bancos de la iglesia, lo que se oye es el sonido directo de la voz del sacerdote, mientras que desde el último banco, se oye un sonido reverberante compuesto en su práctica totalidad por reflexiones.

Es indiscutible que el efecto de precedencia y los ecos son muy importantes en la audición musical. En general, si una de las dos fuentes de un mismo sonido se retrasa en más de 1 milisegundo, la primera fuente "oculta" a la segunda, por cuanto a nuestro sentido de la dirección respecta. Pero si la diferencia de tiempo rebasa los 60 milisegundos, percibiremos un eco (es decir, dos sonidos no simultáneos). Cuando la diferencia de tiempos es inferior al valor anteriormente mencionado, percibiremos el sonido como procedente de la dirección por la que llega el primero y las llegadas posteriores incrementarán su intensidad, dándole una calidad reverberante, imprescindible para todo sonido musical que aspire a ser bueno.

Batidos virtuales

Cuando dos tonos puros de frecuencias próximas f_1 y f_2 se superponen en nuestro oído, percibimos los batidos, caracterizados por una frecuencia promedio $\frac{1}{2}(f_1+f_2)$ cuya intensidad fluctúa periódicamente con la frecuencia (f_1-f_2) .

Demostración 20: Batidos.

Ahora bien, cuando oímos dos tonos puros separados por un intervalo consonante (octava, quinta, cuarta, etc.) ligeramente desafinado, la diferencia de frecuencias es lo suficientemente grande como para que no parezcan batidos reales. Sin embargo, nuestro cerebro percibe esa desafinación bajo la forma de ligeros altibajos periódicos de la intensidad. A este fenómeno psicoacústico se le denomina *batidos virtuales*.

El fenómeno se puede demostrar presentando, por ejemplo, un tono puro de 1000 Hz y luego otro de 1004 Hz. Al superponer ambos, percibiremos un tono de 1002 Hz cuya intensidad sube y baja con frecuencia de 4 Hz. En segundo lugar se presenta al oído un tono de 1000 Hz seguido de otro a intervalo de octava desafinada (2004 Hz), quinta desafinada (1502 Hz) y cuarta desafinada (1334,67 Hz). En los tres casos, al superponer ambos sonidos, se perciben ligeros batidos virtuales, todos ellos de 4 Hz.

Demostración 21: [Batidos reales y virtuales.](#)

Otra variante de batidos virtuales es el fenómeno conocido como *batidos binaurales*. Consiste en que, si con ayuda de auriculares estereofónicos, nuestros oídos derecho e izquierdo oyen tonos de frecuencias muy próximas, realmente no hay superposición física de ambas frecuencias, sin embargo nuestro cerebro percibe claramente batidos. Así, por ejemplo, se presenta en el oído izquierdo un tono puro de 250 Hz al tiempo que se presenta en el oído derecho un tono puro de 251 Hz se producirá una sensación virtual en la que la intensidad fluctúa con período de 1 s.

Demostración 22: [Batidos estereofónicos.](#)

Ilusiones acústicas

Lejos de ser algo negativo, la subjetividad en las respuestas del sistema psicoacústico ante los estímulos es una manifestación de su sofisticación y una prueba de su alto grado de eficiencia. Esta subjetividad no es sólo privativa del sentido de la vista (son muchas las ilusiones ópticas conocidas, siendo algunas de ellas verdaderamente populares) sino que también el sentido del oído es capaz de generar no pocas sensaciones ilusorias.

Nuestro sistema psicoacústico tiende a agrupar de diversas maneras los conjuntos de sonidos presentados como una secuencia compleja. La agrupación de estímulos tiene lugar con arreglo a ciertas reglas basadas en las frecuencias, las amplitudes, en la localización espacial de los emisores e incluso en el timbre. Deutch (1982)⁵ establece cuatro reglas o mecanismos cerebrales de agrupación de sonidos:

A) *Principio de proximidad.* El cerebro tiende a agrupar preferentemente aquellos sonidos que sean próximos espacial o temporalmente. La proximidad espacial da la razón por la que los instrumentos o cantores de una misma “cuerda” se sitúan juntos, ello

no solo facilita que se oigan entre sí para una mejor afinación de todas las voces sino que, por añadidura, los espectadores reciben los sonidos de cada ejecutante como si provinieran de un mismo foco. Los mecanismos cerebrales de agrupación proporcionan así la cohesión acústica de todo el grupo, necesaria para que la “cuerda” suene bien. Igualmente, la proximidad temporal de los sonidos motiva la puesta en marcha de los mecanismos cerebrales de agrupación. Cuando se escucha una interpretación musical en un recinto cerrado se oyen, primero, el sonido directo y luego las distintas reflexiones en paredes, suelo y techo. Sucede que todas aquellas reflexiones que llegan con un retardo no superior a 60 ms son agrupadas o “añadidas” por el cerebro al sonido directo, aumentando la intensidad de este, la definición de su tono y su calidad *loudness*. Este fenómeno psicoacústico recibe el nombre de *reverberación*, y tiene una importancia capital en la música.

Demostración 23: [Importancia de la reverberación en la música.](#)

B) *Principio de similaridad.* El sistema psicoacústico tiende a agrupar todos aquellos sonidos simultáneos que sean similares en frecuencia, timbre, intensidad, etc. La *ilusión de timbre*, que se verá más adelante, es un claro ejemplo de agrupación basada en la similaridad.

C) *Principio de la buena continuación.* Según este postulado, el cerebro tiende a agrupar sonidos no simultáneos que la intuición considera secuenciados en una dirección dada. Ese es el caso de las ilusiones de *escala y cromática*. En ambos casos se pone en juego el recuerdo muy asumido de la escala diatónica, el cual actúa como elemento de agrupación de los sonidos presentados a ambos oídos, aparentemente caóticos.

D) *Principio del destino común.* La mente tiende a agrupar secuencias de sonidos que apuntan a un destino o resolución determinada. En cierto modo, la consistencia de una coda o un obstinado en una composición musical debe tener su razón de ser en el efecto de agrupación que genera en el cerebro tras su audición repetida.

El conocimiento de las ilusiones acústicas es importante en la comprensión del fenómeno musical toda vez que, con frecuencia, se producen a lo largo de una audición. Veamos algunas de ellas.

Ilusión de octava

Para percibir esta ilusión, mediante cascos de auriculares estereofónicos, se presentará al oído derecho un sonido agudo y, simultáneamente al izquierdo, un sonido grave a octava baja del primero. Luego la situación se invertirá, de forma que al oído

⁵ DEUTCH, D. (1982) *The psychology of Music*. Academic Press. (London)

derecho se le presentará el sonido grave y al izquierdo el agudo. De nuevo la situación se invertirá, una, y otra, y otra vez.

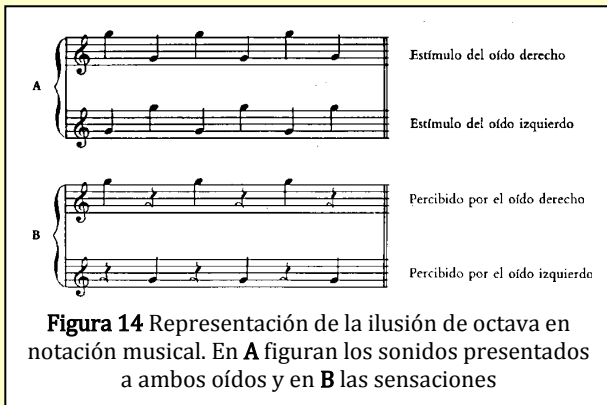


Figura 14 Representación de la ilusión de octava en notación musical. En **A** figuran los sonidos presentados a ambos oídos y en **B** las sensaciones

En estas condiciones el cerebro reacciona, de forma que el oído derecho ignora los sonidos graves y el izquierdo los agudos. A este fenómeno psicoacústico se le conoce como "la ilusión de octava"

Demostración 24: [Ilusión de octava.](#)

Ilusión de escala

A los oídos izquierdo y derecho se les presenta alternativamente notas de una escala descendente y ascendente. De nuevo el cerebro "pone orden en el caos" especializando al oído derecho en la percepción de tonos agudos y al izquierdo en los graves. La sensación global es que el oído derecho oye una escala que primero desciende y luego asciende, en tanto que el oído izquierdo oye una escala primero ascendente y luego descendente.

Demostración 25: [Ilusión de escala.](#)

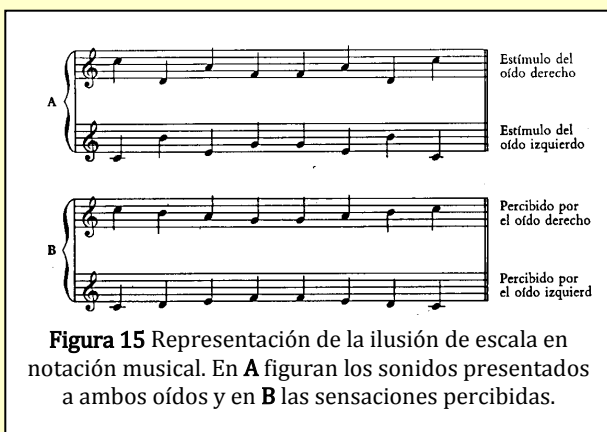


Figura 15 Representación de la ilusión de escala en notación musical. En **A** figuran los sonidos presentados a ambos oídos y en **B** las sensaciones percibidas.

Ilusión de timbre

Nuestro cerebro tiende a seguir sonidos sucesivos de timbre similar y distinta altura. Así, si a uno y otro oídos se presentan sucesiones rápidas de notas

interpretadas aleatoriamente con dos timbres suficientemente dispares, el cerebro tiende a "poner orden" en este caos "especializando" a cada oído en la percepción de un timbre, y sólo uno. El fenómeno se puede demostrar mediante casco de auriculares estereofónicos. Se presentan a ambos oídos, *en primer lugar*, series repetitivas de tres notas ascendentes interpretadas con el mismo timbre.

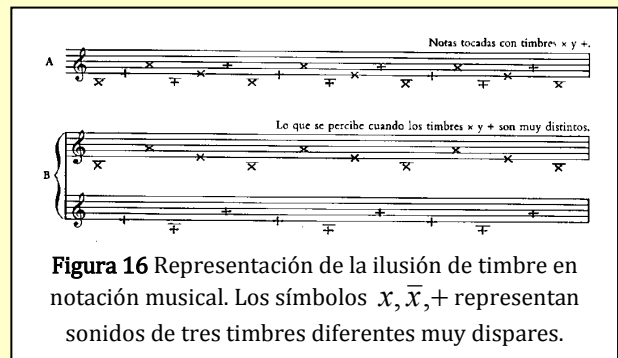


Figura 16 Representación de la ilusión de timbre en notación musical. Los símbolos $x, \bar{x}, +$ representan sonidos de tres timbres diferentes muy dispares.

En segundo lugar se presentan esas mismas series, si bien ahora todas las notas pares suenan con un timbre y las impares con otro bastante diferenciado. El oído derecho tiende a percibir sólo uno de ellos y el izquierdo el otro. De esta forma, parecerá que oímos series descendentes de tres notas con distinto timbre a uno y otro lado de nuestra cabeza.

Demostración 26: [Ilusión de timbre.](#)

Ilusión de Shephard

Cuando oímos un sonido complejo cuyos parciales son desplazados regularmente hacia arriba, en tanto que el nivel de intensidad de dichos parciales se mantiene fijo, tenemos la sensación de escuchar una escala permanentemente ascendente. A este fenómeno psicoacústico se le conoce como *ilusión de Shephard*

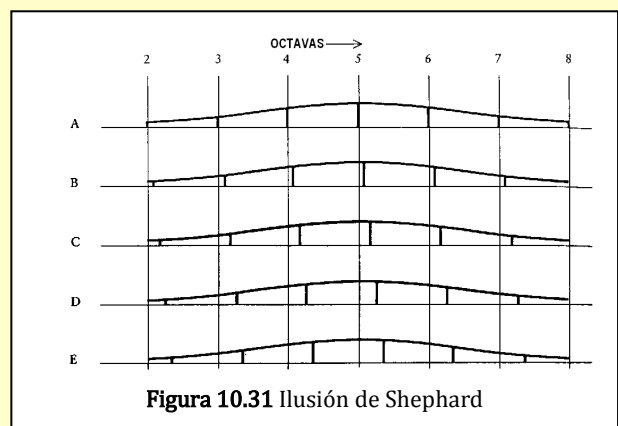


Figura 10.31 Ilusión de Shephard

Demostración 27: [Ilusión de Shephard.](#)

Pero este fenómeno puede ir aún más lejos. Si mientras las octavas se deslizan hacia abajo, el pico de la distribución espectral se desliza hacia arriba,

esto es, los componentes superiores se refuerzan mientras los inferiores se debilitan, el cerebro percibe un tono virtual que parece descender al tiempo que asciende.

Demostración 28: [Un tono a la vez ascendente y descendente.](#)

Conclusiones

En los textos de Física se aborda los conceptos de tono y timbre desde un planteamiento reduccionista, identificando el primero con la frecuencia fundamental del tono complejo y el segundo como la sensación detráida de la frecuencia fundamental y sus armónicos superiores.

Con frecuencia se asume que los sonidos reales son complejos, formados por una frecuencia fundamental responsable de la altura y unas frecuencias superiores duplo, triplo, cuádruplo, etc. responsables de la sensación tímbrica. En realidad los sonidos están formados por diversas frecuencias llamadas *parciales*, que no son múltiplos exactos de la frecuencia fundamental, reservándose el nombre *armónicos* para aquellas frecuencias que son múltiplos exactos, cosa que casi nunca sucede.

La sensación tonal la obtiene el cerebro por medios no suficientemente claros, por un lado parece que el ritmo con que llegan los impulsos acústicos es determinante, según postula la *Teoría de la Periodicidad* y por otro parece que lo importante es el punto de la membrana basilar que ha sido excitado, como preconiza la *Teoría de la Localización*. Sea cual fuere, los mecanismos cerebrales de la audición no solo se ajustan a uno y otro planteamiento sino van mucho más lejos, como se evidencia en la percepción de los tonos virtuales y

de combinación, donde la excitación física directa no existe.

Finalmente, las sensaciones acústicas ni son proporcionales a las excitaciones ni se corresponden directamente con ellas. Las ilusiones acústicas de octava, de escala, de timbre, etc. son algunas de las existentes, pero no todas y evidencian la complejidad de los mecanismos cerebrales de la audición y lo poco que se sabe de ellos.

Para saber más

- BÉKÉSY, G.V., (1960) *"Experiments in hearing"* Acoustical Society of America
- BLAUERT, J. (1997) *"Spatial Hearing"* The MIT Press, London
- EVEREST, F.A., (2001) *"Master Handbook of acoustics"* Mc Graw Hill, New York
- HALL, D.E., (1980) *"Musical Acoustics"* Brooks-Cole Publ. Company, Pacific Grove, California.
- HELMHOLTZ, H. (1954) *"On the sensations of tone"* Dover Publ., inc., New York
- KINSLER, L.E., FREY, A.R., COPPENS, A.B. Y SANDERS, J.V., (1992) *"Fundamentos de Acústica"* Editorial Limusa, S.A., Noriega Eds., México.
- MERINO, M. (1998) "Complexity of pitch and timbre concepts", *Phys. Educ.*, 33, 2,
- MOORE, B.C.J., (1997) *"An introduction to the Psychology of hearing"* Academic Press, San Diego.
- PIERCE, J.R., (1983) *"The science of musical sound"* Freeman and Company, Eds., New York
- RAICHEL, D.R., (2000) *The science and applications of Acoustics"* Springer-Verlag Eds., New York
- RAYLEIGH, J.W.S., (1945) *"The theory of sound"* Dover Publ., Inc., New York
- RECUERO, M., (2000) *"Ingeniería Acústica"* Paraninfo, Ed., Madrid
- ROSSING, T.D., (1990) *"The science of sound"* Addison-Wesley Publ., New York
- ROSSING, T.D. & FLETCHER, N.H. (1995) *"Principles of vibration and sound"* Springer-Verlag Eds., New York

Nota editorial

La descarga de los audiovisuales se produce en formato Power Point tipo auto presentación; sin embargo, dependiendo del navegador utilizado puede abrir el archivo en formato edición. El lector deberá reproducir la presentación para acceder al sonido de cada diapositiva. Se recomienda el uso de auriculares para la audición de las demostraciones.

La totalidad de los contenidos de este artículo, así como los de otros que pudieran ser continuación de éste, formaron parte de los materiales elaborados para la tesis de D. Eduardo Verde Romera, bajo la dirección del Dr. M. Merino (autor principal del artículo) quien fue galardonado con el Premio de la Real Academia de Doctores de España en 2010 y por el Colegio de Doctores y Licenciados en 2011.

Estos contenidos pueden ser consultados de forma más exhaustiva en el Tratado "Las vibraciones de la música", de J. M. Merino, cuya ficha puede ser consultada en el siguiente enlace URL:

<http://www.editorial-club-universitario.es/libro.asp?ref=2232>