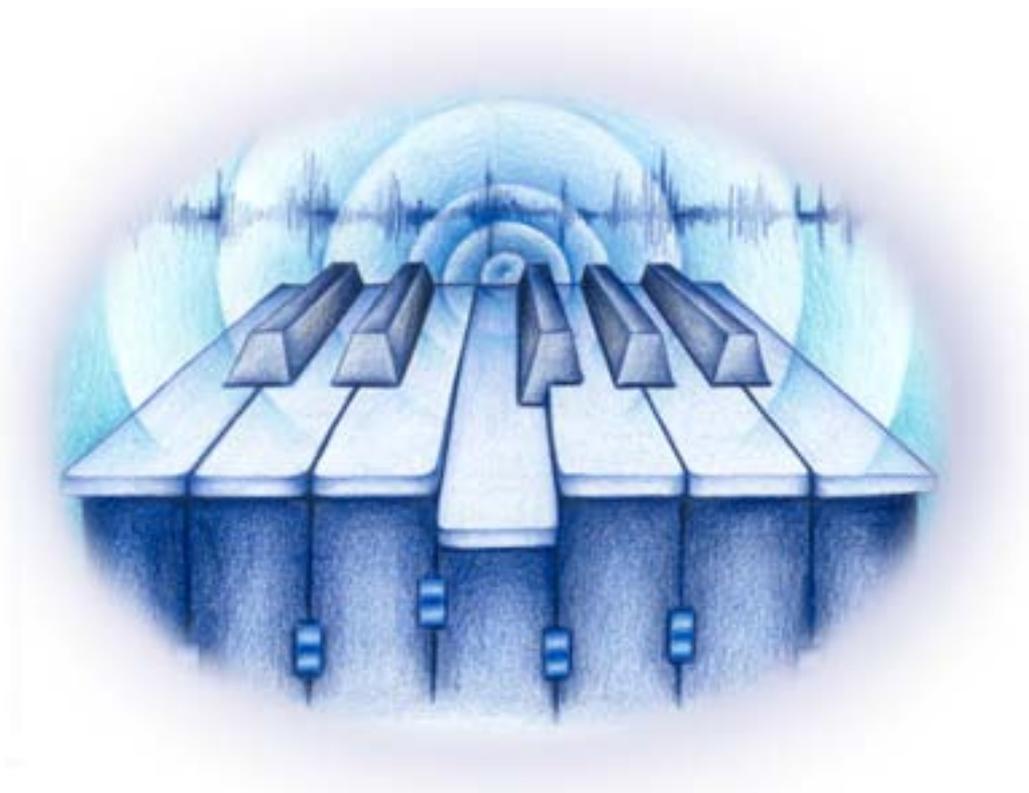


Fundamentos de psicoacústica musical



Índice

Etapa 1: Introducción a la psicoacústica musical	5
Audición musical	6
Límites musicales del sonido	6
Sistemas físicos y transducciones en la percepción del sonido musical	8
Diferencia apenas perceptible (DAP) para un estímulo y verificación de la ley de Weber-Fechner en la audición	10
Objeto sonoro	13
Objeto musical	13
Elección de criterios tipológicos	14
Hacia una clasificación tipológica de los objetos sonoros	15
Aparato del oído	16
Descripción funcional del oído externo	18
Descripción funcional del oído medio	19
El tímpano	20
La cadena de huesecillos	21
Descripción funcional del oído interno	21
El laberinto	21
La cóclea	24
Etapa 2: Percepción de la altura	28
Sensaciones de tono puro	28
Efectos psicoacústicos de primer orden	29
Superposición de dos tonos puros de igual amplitud y distinta frecuencia	30
Dos tonos puros con igual amplitud y aumento gradual de una de las frecuencias	31
Límite de discriminación de frecuencia	33
El batido de primer orden	34
La banda crítica	34
Los tonos diferenciales	35
Los armónicos aurales	36
Efectos psicoacústicos de segundo orden	37
Codificación auditiva en el sistema nervioso periférico	41
El papel del sistema nervioso central en la reconstrucción de la fundamental y la teoría de la distribución temporal	43
Etapa 3: Percepción de la intensidad. Sonoridad	45
Ley de Weber-Fechner para la percepción dinámica del sonido y mínima diferencia apreciable para la intensidad del sonido	46
Mínima diferencia apreciable para la intensidad del sonido	50
Nivel de intensidad de sonido y sonoridad	50

Sonoridad subjetiva y nivel de sonoridad	52
Banda crítica y sonoridad subjetiva.....	53
Mezcla de sonidos y niveles de máscara	55
Sonoridad relativa de tonos puros de corta duración	56
Mecanismo de percepción de la sonoridad	57
Etapa 4: Aproximación musical a la percepción del timbre	60
Algunos detalles de interés sonoro acerca del teorema de Fourier	60
Hacia una definición multidimensional de timbre	67

Etapa 1: Introducción a la psicoacústica musical

En esta etapa se estudian las características del sonido en función de su experiencia perceptiva y se concluye que ningún parámetro físico del sonido se corresponde totalmente con las dimensiones psíquicas en que dicha experiencia tiene lugar.

En todas las culturas se confirma la existencia de tres sensaciones primarias asociadas a la percepción musical del sonido. Se trata de **altura, intensidad y timbre**.

La sensación de altura se vincula tradicionalmente a la frecuencia o periodo de la fundamental; la intensidad, al flujo de energía o amplitud de la presión de oscilación de la onda; el timbre, al espectro o proporción de intensidades de los armónicos. Sin embargo, la realidad no es tan simple, ya que se constata fácilmente que la sensación de altura debida a un tono puro de frecuencia estable cambia ligeramente en función de una variación del flujo de energía de la onda sonora.

También es fácil observar que la sensación de intensidad de un sonido de intensidad constante cambia en función de las eventuales variaciones de frecuencia a las que se le puede someter.

Por otra parte, en la superposición de tonos de altura diferente, la sensación de intensidad no se relaciona de forma simple con el flujo total de energía del sonido. Tampoco es estable para sonidos de corta duración. En este último caso, depende directamente de la duración de cada sonido.

Finalmente, está claro que la percepción sutil del timbre requiere mucha más información que aquella cuyo espectro de un sonido es portador. Tan importantes son a tal efecto las características transitorias de la forma de ataque o de caída como los detalles espectrales particulares que en un instrumento dado se asocian a cada región de su tesitura.

Tales sutilezas de la percepción acústica determinan profundamente la integración psíquica de los hechos musicales, y dependen tanto de la estructura física de los sonidos que estimulan el oído como de los detalles formales y funcionales que caracterizan este órgano.

Audición musical

Límites musicales del sonido

En física, el término sonido se aplica no sólo a aquellos fenómenos que tienen lugar en el aire para dar lugar a la sensación de audición, sino también a todos aquellos que se rigen por principios físicos análogos.

En un sentido amplio, se entiende por sonido toda variación de presión o de velocidad del movimiento de partículas que se propaga en un medio elástico.

El sonido también tiene lugar en los sólidos, en los líquidos y en otros gases diferentes del aire.

No todos los sonidos son susceptibles de ser percibidos por el oído humano. Tradicionalmente, se afirma que éste percibe variaciones periódicas de presión entre 20 Hz y 20.000 Hz; pero lo cierto es que oscilaciones de frecuencia inferior a los 20 Hz, habitualmente denominadas infrasonidos, pueden ser percibidas. Es el caso del ritmo, cuya integración perceptiva tiene lugar en instancias cognitivas de alto nivel.

Entre las variaciones de presión que se producen a muy bajas frecuencias, a menudo distinguidas por el nombre de *infrasonidos*, se encuentran las que caracterizan la onda expansiva de la explosión de una bomba o los producidos por máquinas industriales y vehículos motorizados. Los primeros son dañinos por su capacidad destructiva, especialmente de los tejidos biológicos; los segundos pueden causar somnolencia.

Los ultrasonidos, es decir, las oscilaciones de frecuencia superior a los 20.000 Hz, no se perciben directamente. Entre éstos, por ejemplo, se encuentran los armónicos superiores de gran parte de sonidos naturales. Sin embargo, los ultrasonidos se producen en gran cantidad de ámbitos. Una de sus aplicaciones a la ingeniería de audio es la de construir altavoces altamente direccionales. Los ultrasonidos pueden actuar sobre la materia orgánica y producir roturas de las cadenas proteicas y los ácidos nucleicos. Con suficiente intensidad serían capaces, por tanto, de producir mutaciones.

Las variaciones periódicas de presión cuya intensidad es suficiente para producir dolor reciben el nombre suprasonidos. Para los 1.000 Hz, esa intensidad es del orden 1 W/m^2 .

Las que no son acusadas por el aparato auditivo por no ser suficientemente intensas son llamadas subsonidos. Para una variación periódica de 1.000 Hz, la intensidad umbral es de 10^{-12} W/m².

Los límites clásicos de la audición se representan en el siguiente gráfico, donde la zona de audio aparece rodeada por las zonas en que el sonido existe a pesar de no manifestarse al sentido del oído humano.



Si bien los límites de la percepción auditiva pueden enmarcarse entre algunos hercios y los 20.000 y entre 10^{-12} y 1 W/m², a lo largo de la historia, el uso musical del sonido siempre se ha mantenido lejos de ellos hasta la aparición de los instrumentos electrónicos.

El *pianissimo* –representado por pppp en la notación tradicional de los instrumentos acústicos tradicionales– nunca fue de intensidad inferior a los 10^{-11} W/m². En ese mismo contexto, el *fortissimo* –representado por ffff en la notación tradicional– significa una intensidad máxima de 10^{-2} W/m².

En el dominio de la frecuencia, si el Do1 se produce cuando la vibración tiene una frecuencia de 35 Hz, el Do8 responde por una frecuencia de 4.480 Hz. El Sol8, la nota más aguda representada en el sistema MIDI, se da por una vibración de 5.600 Hz.

La escritura musical tradicional, que se caracteriza por una notación bastante precisa de las alturas en función del tiempo, no considera con tanta resolución la notación de sonidos musicales –los armónicos– cuya frecuencia e intensidad excede los límites anteriormente citados. Con la introducción de los instrumentos electrónicos en el ámbito de la estética de los sonidos, los límites de lo que actualmente se considera como música y arte sonoro han crecido hasta el punto de que existen manifestaciones artísticas y musicales que integran sonidos en los límites de la audición e, incluso, más allá. Al margen de cualquier consideración estética, se puede constatar el hecho de que en arte sonoro y música a veces se incluyen sonidos que no se oyen y otras, sonidos capaces de producir dolor e incluso daño físico.

Sistemas físicos y transducciones en la percepción del sonido musical

En la audición de música interviene una serie de sistemas físicos que se describen en este subapartado.

- En primer lugar se encuentra la fuente sonora. Se trata de un solista, por ejemplo, una orquesta, un conjunto, un grupo de altavoces o cualquier híbrido que se pueda formar entre los anteriores.
- En segundo lugar está el aire, que propaga el sonido en todas direcciones.
- En tercer lugar, el oyente.

Esta situación se describe en el gráfico siguiente:



Lo que los une durante la ejecución musical es ese tipo de forma de vibración, el sonido, que se propaga de un punto a otro del espacio en forma de ondas y a la que el oído humano es sensible.

El siguiente gráfico lo explica en términos más generales:



La fuente emite energía, el medio la transmite y el receptor la detecta. En el paso de uno a otro sistema, la energía sufre una serie de modificaciones llamadas **transducciones**.

En el caso musical, cada uno de los sistemas es complejo.

En la fuente se distinguen tres componentes diferentes:

1. La fuente de energía, el mecanismo primario de excitación que el instrumentista activa y que puede tratarse de los siguientes elementos:

- a) Frotamiento o pulsación de una cuerda
- b) Movimiento de la caña de un instrumento de madera
- c) Movimiento de los labios sobre la embocadura en un instrumento de metal
- d) Paso de la corriente de aire en el bisel de la embocadura de una flauta
- e) Movimiento de las membranas de los altavoces

2. El elemento vibrante fundamental. De este dispositivo depende la altura de la nota y los armónicos. Puede ser:

- a) Una cuerda
- b) Un parche
- c) Una columna de aire
- d) Un trozo de metal
- e) Un trozo de madera
- f) Una membrana de material flexible

3. El resonador adicional, cuya función consiste en convertir de la forma más eficiente posible las oscilaciones del elemento vibrante en variaciones periódicas de presión del aire circundante. Es:

- a) La caja de los instrumentos de cuerda
- b) El pabellón de los instrumentos de viento
- c) Distintas cavidades en los instrumentos de percusión
- d) Las cajas de los altavoces

En el medio se distingue entre los dos siguientes:

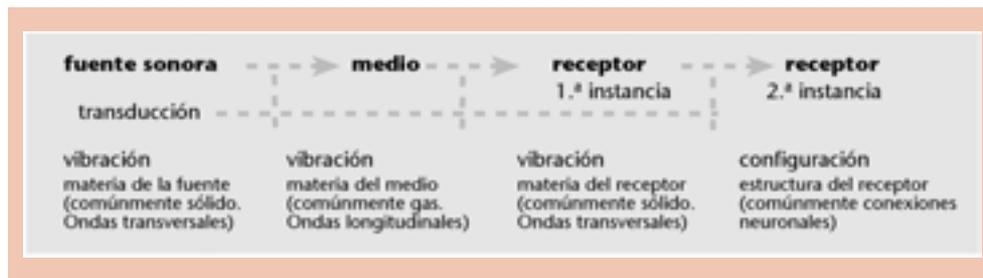
- a) El medio próximo a la fuente, que transmite el sonido.
- b) Los límites del medio (paredes, suelo, techo, la gente), que afectan a la propagación del sonido por medio de mecanismos de reflexión y absorción de las ondas sonoras y cuya configuración determina la calidad acústica del espacio en que la música tiene lugar.

En el oyente se distinguen cuatro dispositivos diferentes:

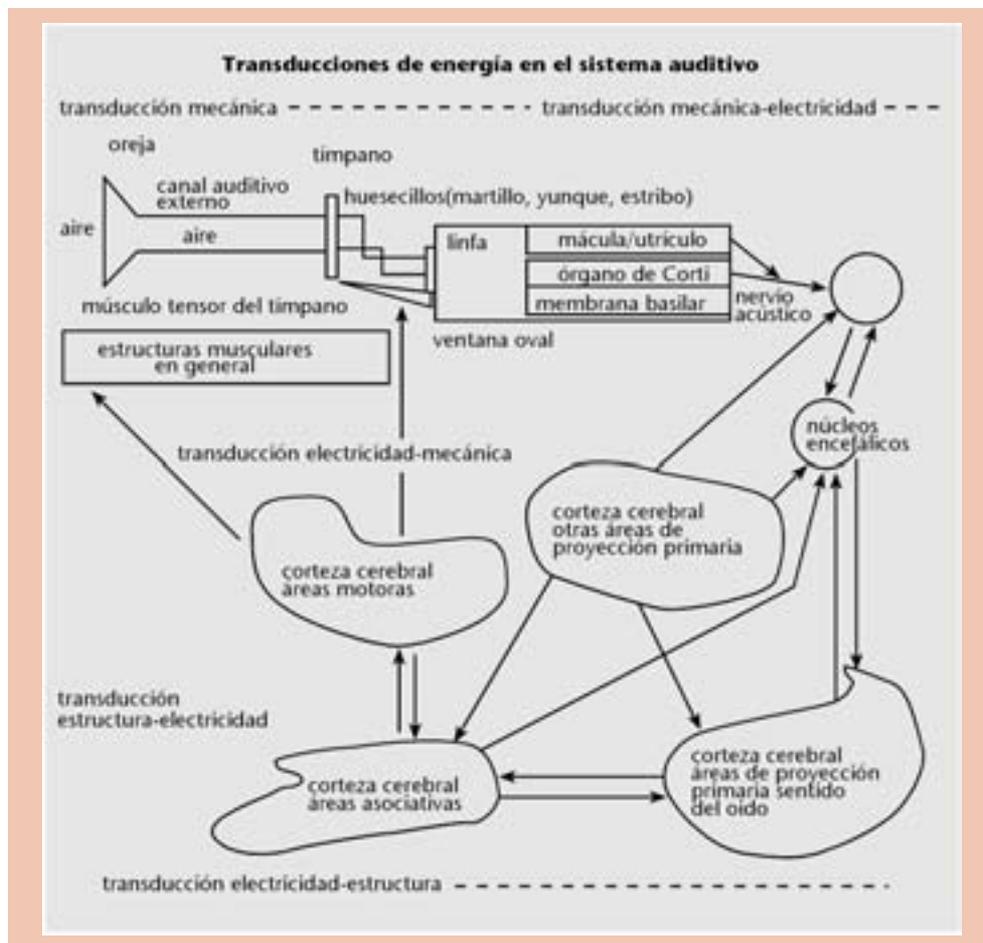
- a) El oído externo, que recibe las oscilaciones de presión sonora de llegada al oído para convertirlas en vibraciones mecánicas.
- b) El oído medio, que toma dichas vibraciones mecánicas y las transmite al oído interno.
- c) El oído interno, básicamente la cóclea, en cuyo interior las vibraciones son separadas en función de su frecuencia para convertirlas en impulsos nerviosos.
- d) El sistema nervioso auditivo, que transmite las señales nerviosas al cerebro, donde son procesadas, representadas como imágenes auditivas en algún lugar de la corteza cerebral, identificadas, almacenadas en la memoria y transferidas a otros centros del cerebro.

Estos últimos pasos llevan a la percepción consciente de los sonidos musicales.

De una forma muy esquemática, lo anterior se resume en el siguiente gráfico:



Con algo más de detalle, aunque no en un grado máximo –que excedería los presupuestos de este texto–, el siguiente gráfico esquematiza las transducciones de energía que tienen lugar en el dispositivo humano para la percepción del sonido.



Diferencia apenas perceptible (DAP) para un estímulo y verificación de la ley de Weber-Fechner en la audición

A mediados del siglo XIX, Weber ya veía posible que proporciones iguales de un estímulo produjeran diferencias iguales en la percepción. Pensaba igualmente que dicha proporción tenía que ser diferente para cada sistema sensorial.

G.T. Fechner expresa las conclusiones de su predecesor en la ley de Weber según la ecuación:

$$\Delta I / I = K \quad (1)$$

donde

ΔI es la modificación que se debe introducir en el estímulo original para que se perciba diferente de éste.

I es el estímulo original.

K es una constante diferente para cada dispositivo sensorial, que puede variar entre $1/3$ y $1/250$. De hecho, como se verá posteriormente, también varía en mayor o menor grado a lo largo del rango de aplicación del estímulo.

Todo ello implica una **diferencia apenas perceptible** (DAP).



Suponed, a modo de ejemplo, que para percibir una diferencia en la sensación de peso en la palma de la mano cuando ésta sostiene un estímulo de 10 gramos de peso, sea necesario añadir como mínimo 1 gramo. En ese caso, si a un estímulo que pesa 100 gramos se le añade sólo 1 gramo, no se aprecia diferencia alguna: para percibir una diferencia de peso ante un estímulo de 100 g es necesario añadir un mínimo de 10 g. Mientras la variación de un estímulo se encuentra entre unos determinados límites (DAP), la sensación asociada se juzga invariable.

Cuando la excitación sobrepasa la DAP, se detecta un cambio de sensación.

Fechner llegó a la conclusión de que la relación entre estímulo y sensación correspondiente puede evolucionar hasta convertirse en una relación logarítmica; lo expresó en la ecuación:

$$R = K \times \log S \quad (2)$$

donde

R es la sensación;

K es una constante;

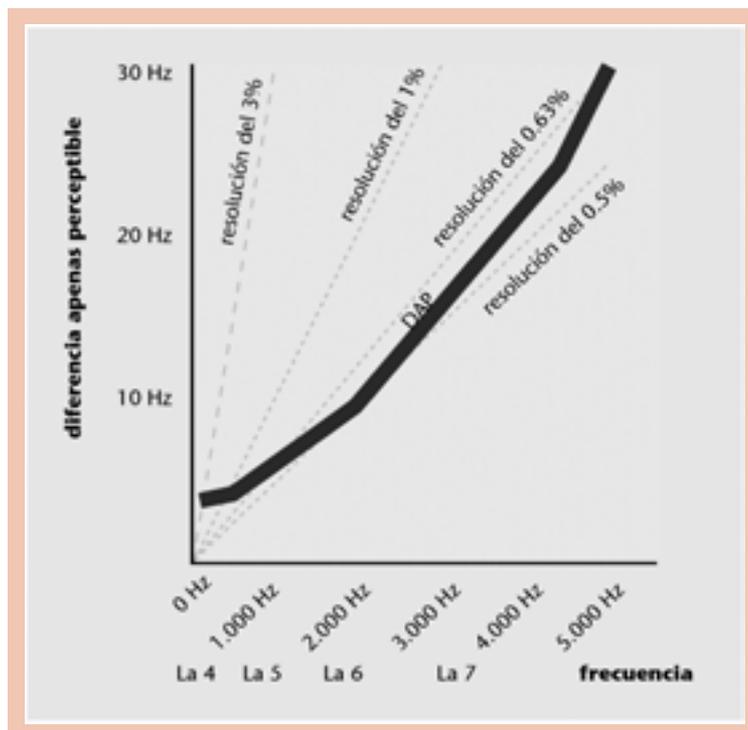
S es la intensidad del estímulo.

Esta relación se conoce como ley de Weber-Fechner, o simplemente ley de Fechner. Tiene muchas aplicaciones musicales, como se verá a lo largo de esta etapa.

El oído humano es capaz de establecer relaciones de orden entre la altura de los tonos puros (sinusoidales) que se le presentan sucesivamente, uno tras otro. Tal capacidad tiene un límite natural y se manifiesta cuando la diferencia de frecuencia es lo bastante pequeña. Por debajo de un cierto valor en la diferencia entre las frecuencias de los sonidos puros que se presentan sucesivamente al oído, las alturas correspondientes serán juzgadas iguales.

Como en el caso de cualquier estímulo físico con efectos psicofísicos, cuando la frecuencia sobrepasa la DAP, se percibe un cambio en la sensación de altura. El grado de sensibilidad a los cambios de frecuencia del mecanismo primario de percepción de la altura depende, evidentemente, de la frecuencia. Sin embargo, también se ve afectado por la intensidad y la duración de los sonidos que intervienen, así como por lo repentino que se haga el cambio de frecuencia.

Dicho grado de sensibilidad a la frecuencia se denomina **resolución de frecuencia**. Varía mucho de una persona a otra y parece ser función del grado de entrenamiento musical, así como del método de medida empleado.



El gráfico muestra la DAP media para la frecuencia de tonos puros de intensidad constante a 80 dB. Se aprecia que para un tono de 2.000 Hz, un cambio de 10 Hz –sólo el 0,5%, una fracción muy pequeña de semitono– es apreciable. Del gráfico puede deducirse también que la resolución de frecuencia es peor a bajas frecuencias.

Objeto sonoro

El concepto de objeto sonoro (OS), tal como lo introduce Pierre Schaeffer en el *Traité des Objets Musicaux*, es lo que se oye cuando no se identifica la fuente que lo origina. Esto puede ocurrir tanto por falta de información –el caso de un sonido desconocido–, como debido a un entrenamiento previo encaminado a despojar las sensaciones sonoras de sus significados habituales.

Se trata, pues, de algo radicalmente diferente de la fuente –un violín, un gato o un despertador–, diferente también del soporte en que se almacena, y diferente al fin y al cabo de la señal acústica correspondiente codificada en cualquier soporte –cinta magnética, memoria viva, disco duro, etc.–. Para un perro, un niño, un extraterrestre o un ciudadano de una cultura remota, aquellas señales –el violín, el gato, el despertador– pueden adquirir sentidos diferentes de los que un adulto del entorno cultural occidental pueda atribuirle.

Un objeto sonoro es una imagen sonora de una escucha realizada por un ser humano, es relativo a ella y está enteramente contenido en la consciencia perceptiva.

Las manipulaciones que podamos realizar sobre las codificaciones de los objetos sonoros almacenadas en soporte no afectan, pues, al objeto sonoro en sí, que tiene una existencia intrínseca. Sólo crean otros objetos sonoros nuevos.

Los objetos sonoros pueden ser descritos y analizados según sus características perceptivas.

Objeto musical

Una vez el objeto sonoro se despoja de su significación habitual y aparecen en la consciencia sus particularidades perceptivas, es posible su utilización en contextos musicales.

Esto ocurre, por ejemplo, con la repetición: grabad un traqueteo de tren y realizad con ese material un bucle de dos o tres segundos. Con la repetición desaparece la significación: el significado habitual –traqueteo del tren– se irá perdiendo a medida que se manifiesten sus valores rítmicos.

Con la llegada de los instrumentos electrónicos, el mundo de todos los sonidos se abre a las producciones musicales y artísticas.

Aproximación a una clasificación de los objetos musicales

Sea un primer criterio, groseramente musical:

- Estabilidad mayor o menor en una determinada tesitura, ya se trate de tonos puros o de ruidos.

Sea otro criterio, de orden fonético:

- Se puede decir que ciertos sonidos como la voz son articulados, mientras que otros no lo son. Entre unos y otros puede establecerse una rica gradación.

El arroyo es inarticulado, como el proyector lo es después de empezar a proyectar, como un sonido largo de saxofón, mientras que las notas del sapo, los golpes del agua en la pared del bidón o el principio del funcionamiento del proyector son articulados como las sílabas del lenguaje articulan sus vocales por medio de las consonantes.

En estos criterios de clasificación se hace referencia a estructuras de sentido, o índices (identificación fonética o instrumental), pero no a las estructuras sonoras propiamente dichas.

Elección de criterios tipológicos

Un primer criterio de clasificación musical es el que hace referencia al empleo del sonido. El empleo de un sonido puede ser más o menos tosco, más o menos facetado y puede aplicarse a diferentes aspectos perceptivo-culturales del sonido como los siguientes:

1. La masa
2. La factura
3. La duración

1. Masa

- Si se tiene en cuenta la estabilidad, la masa del sonido puede ser percibida con nitidez o borrosamente.
- Si se considera la variación de la masa sonora, ésta puede ser compleja, como la caída de un árbol o simple, como un chispazo.

2. Factura

La factura es la forma como la energía se comunica y se manifiesta en la duración.

- Ello puede tener lugar de forma previsible como en el tictac del reloj de cuco o imprevisible como en las campanillas de viento.

3. Duración

- Un objeto sonoro puede ser de larga o corta duración.

Otro criterio de clasificación hace referencia a la complejidad. Un objeto sonoro puede estar compuesto de otros. En la medida en que esté compuesto de otras unidades identificables, puede decirse que es más o menos complejo.

El campanario es complejo en la medida en que está formado de varias campanas y también porque en cada una de ellas pueden distinguirse varios parciales.

El reloj de cuco es complejo en la medida en que también está compuesto claramente por otros objetos sonoros: el correr de la cadena, el sonido flautado con dos tonos en tercera mayor, la campana. De igual forma que en el caso del campanario, los componentes sonoros del reloj sonoro pueden ser también disecados en integrantes de menor complejidad, a saber, los parciales que los distinguen, así como su comportamiento variable.

Hacia una clasificación tipológica de los objetos sonoros

Existen innumerables clasificaciones de objetos sonoros. De hecho, es bueno que cada profesional trate de desarrollar la suya propia. Lo importante de una clasificación es que sea abierta a objetos que se presenten a la escucha como propuestas suficientemente manipulables, identificables y rememorables.

1. Manipulabilidad, identificabilidad y equilibrio

Los elementos centrales de esta clasificación deben constituir buenos escalones perceptivos y no deben ser ni demasiado elementales ni demasiado estructurados.

2. Rememorabilidad

El elemento central de una clasificación debe ser fácilmente recordable. Ello significa que su duración no será ni muy larga ni muy corta y que constituirá una unidad destacable.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que lo elemental no coincide con lo corto, lo complejo ni lo largo:

Los objetos sonoros son equilibrados si presentan un buen compromiso entre lo muy estructurado y lo muy simple.

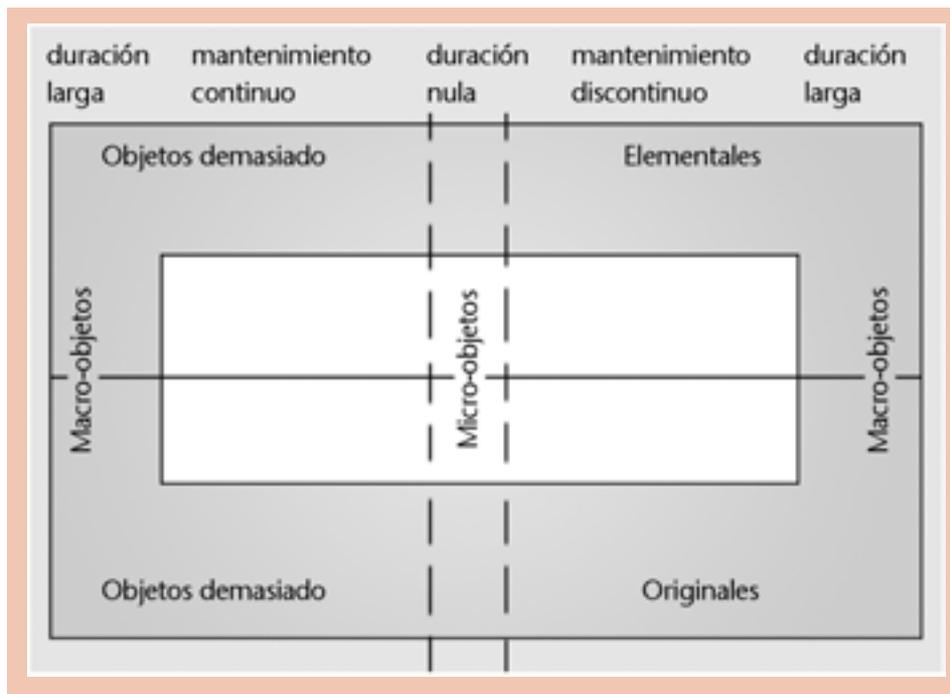
Los objetos sonoros son desequilibrados si son demasiado complejos o si son demasiado simples:

3. Originalidad

El grado de originalidad de un objeto sonoro es lo que sorprende a la previsión de los acontecimientos que lleva a cabo la consciencia durante la escucha.

Un sonido de un timbre que se mantiene estable es menos original que el de un timbre que toca una melodía.

Lo expuesto hasta este punto se resume en el siguiente gráfico.



Sin embargo, a renglón seguido se ofrece una esquematización más completa.

Aparato del oído

El oído es un dispositivo complejo que, en cierto modo, funciona como si se tratara de un micrófono extremadamente sofisticado, tanto que aún no se ha diseñado uno con tantas prestaciones.

Descripción funcional del oído externo

El oído externo, que consta del **pabellón auricular** y del **canal auditivo externo**, tiene el aspecto de una trompetilla. Sin embargo, contrariamente al caso de la trompetilla, su superficie se halla amortiguada por tejido epitelial, que presenta pelos y secreciones en forma de cerumen. Por lo tanto, su función no reside, como es el caso de la trompetilla, en la amplificación de un determinado espectro de frecuencias.

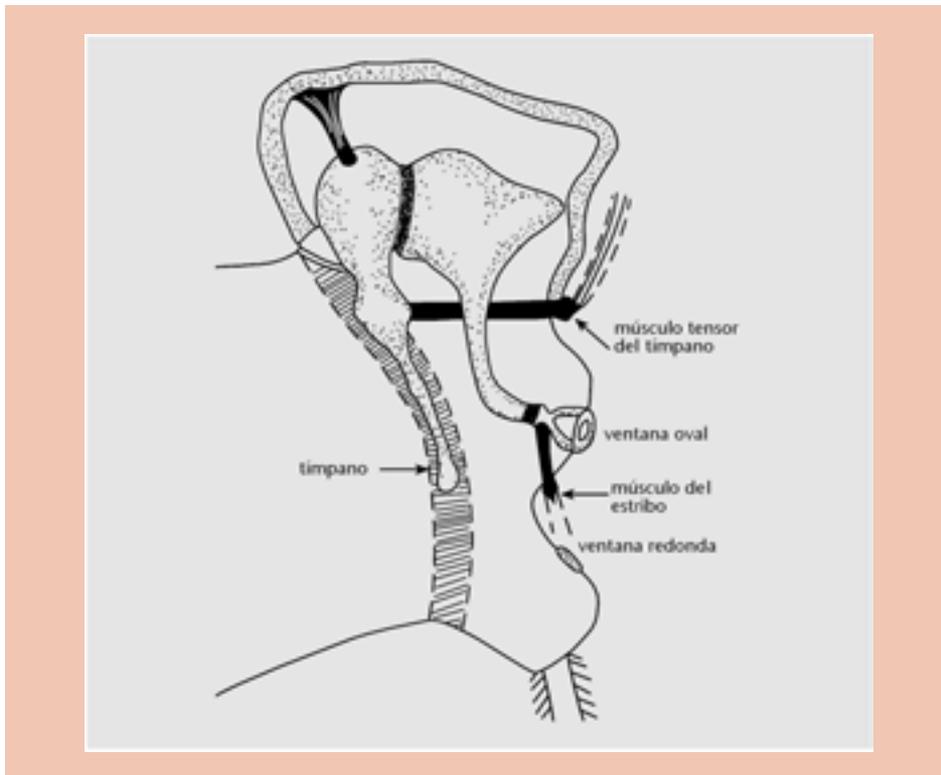
El pabellón auricular protege el tímpano de la acción del viento. Si no existiera esta estructura, el viento podría generar sonidos armónicos y ruidos al chocar con los límites del canal auditivo, como ocurre en la embocadura de una flauta. Ello enmascararía cualquier mensaje de entrada. En presencia de un viento fuerte que venga de cara o de lado, los recovecos y pliegues del pabellón sirven para dirigir el chorro de aire y dividirlo en varios filetes. Parece claro que la función básica del pabellón es la detener el viento.

El canal auditivo, que tiene una forma tortuosa, parece diseñado especialmente para amortiguar. De hecho, esa forma tortuosa amortigua las señales de baja frecuencia, mientras que las de alta frecuencia, mucho más direccionales, llegan con facilidad al fondo del canal y consiguen estimular el tímpano. De esa forma se puede identificar la dirección en que se encuentra una determinada fuente de sonido de frecuencia aguda, como son los chasquidos, los gritos de los animales y crujidos, etc., todos ellos posibles indicadores de situaciones de peligro.

El recubrimiento absorbente del canal auditivo externo lo amortigua al tiempo que ensancha la banda de frecuencias perceptibles.

Su función es la de conferir direccionalidad al sentido del oído, así como de atenuar las fuentes de sonido no deseadas.

Descripción funcional del oído medio



El oído medio está formado por una caja cerrada que, además de una serie de componentes, entre los que se encuentran huesos, membranas y músculos, contiene aire. Está comunicado con la boca por medio de un canal llamado **trompa de Eustaquio**.

Cuando la presión atmosférica es superior a la del interior del oído medio, el tímpano se pone tirante hacia el interior, de modo que da lugar a una clara atenuación de la percepción de los sonidos acompañada de una sensación desagradable muy característica. Si la presión externa es más baja, el tímpano se abulta hacia fuera y produce efectos perceptivos parecidos. La función básica de la trompa de Eustaquio es igualar la presión de la caja del oído medio y permitir su correcto funcionamiento sin dependencia de las condiciones atmosféricas externas.

En el oído medio, las vibraciones sonoras se transmiten en su mayoría a través de dos vías.

- Una es la vía sólida, formada por el conjunto del tímpano y los huesecillos –martillo, yunque y estribo– que termina en la ventana oval, situada a la entrada del oído interno. El sistema de los huesecillos permite transmitir vibraciones de frecuencias de hasta 10.000 hercios.

- Otra vía es la gaseosa, formada por la parte libre del tímpano debajo de la inserción del martillo, que estimula el aire de la cavidad, el cual, a su vez, lleva la vibración directamente a la ventana redonda.

El sistema auditivo puede recibir vibraciones directamente sin que éstas pasen por el oído medio. Se trata de la transmisión ósea, que tiene lugar, por ejemplo, cuando se aplica la cabeza a la vía del tren para saber si su llegada está próxima. Se experimenta transmisión ósea cuando se aplica un diapasón directamente sobre un hueso de la cabeza. La frecuencia se percibe claramente y no pasa a través del oído medio.

El tímpano

El tímpano es la membrana que limita el oído medio en la parte externa. Es el encargado de recibir las vibraciones de presión que llegan a través del canal auditivo externo.

Se trata de una membrana amortiguada. Esto constituye una primera protección de las delicadas estructuras del oído interno, pero también supone un ensanchamiento de la banda de frecuencias a las que puede resonar. La atenuación del tímpano es también crucial para el poder separador temporal del oído. Si no estuviera atenuado, se saturaría con facilidad, ya que mientras vibrara, se manifestaría refractario ante la llegada de nuevos estímulos.

Se experimenta la sensación de audición cuando el tímpano se pone en vibración.

Sin tener en cuenta el mecanismo que pone en movimiento dicha estructura, imaginad la generación de un sonido por las membranas de unos auriculares. La vibración del tímpano expuesto al movimiento de las membranas de los auriculares sigue muy de cerca la vibración de estas últimas. Cuanto más baja sea la frecuencia del sonido en cuestión, tanto más próxima será la vibración del tímpano a la de las membranas de los auriculares.

Para que se experimente la sensación de sonido a través del movimiento del tímpano, éste debe hacerlo dentro de unos límites. La mínima amplitud de movimiento de la membrana timpánica es del orden de 10^{-7} cm. El periodo de vibración más corto detectable a través del tímpano es de 7×10^{-5} s.

La cadena de huesecillos

La cadena de huesecillos está formada por el **martillo**, el **yunque** y el **estribo**; un grupo que se articula como una palanca extremadamente complicada y mediante una serie de músculos que facilitan o impiden el movimiento de sus partes. Constituye un segundo dispositivo de regulación de la impedancia acústica en el oído medio. Se aprecia en la figura del apartado “aparato del oído” que la forma del sistema es irregular, lo que necesariamente supondrá la presencia de distorsión armónica.

El hombre vive en un entorno acústico de intensidades que varían entre un ruido de fondo mínimo –unos 20 dB– y los truenos cercanos o los aviones –cercanos a los 120 dB–. El sistema auditivo se encuentra sometido a una variación dinámica de 100 dB, circunstancia que, como se verá con mayor detalle, supone variaciones extremas de amplitud en una relación de 10^{10} .

Ante estímulos sonoros fuertes, se producen contracciones reflejas de los músculos tensores del tímpano y del estribo. De esta forma, los movimientos del martillo y del estribo se limitan. La limitación del movimiento del tímpano impide que las vibraciones fuertes alcancen el sistema de los huesecillos, mientras que la limitación del movimiento del estribo impide la saturación del oído interno.

Descripción funcional del oído interno

El oído interno es un órgano muy frágil que se aloja en una cavidad del **peñasco del temporal**, un hueso muy duro del cráneo.

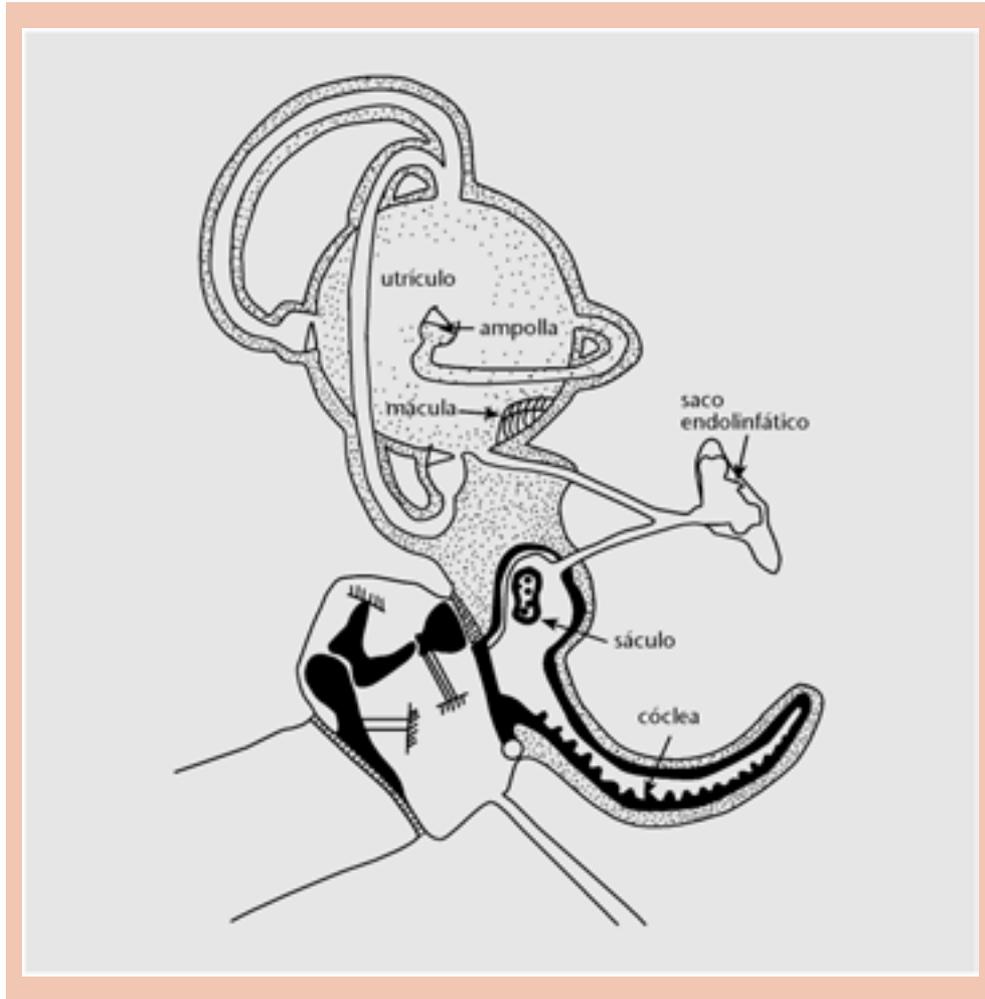
La cavidad ósea es muy pequeña. Sus dimensiones son $20 \times 10 \times 7$ mm y su forma es extremadamente complicada, seguramente para evitar la aparición de zonas de resonancia, lo cual podría dañar profundamente el sistema.

Básicamente, el oído interno se compone de dos partes que se distinguen claramente en el gráfico de introducción al aparato del oído: se trata del **laberinto** y de la **cóclea**.

El laberinto

El laberinto está formado por una cavidad llamada **utrículo** sobre la que se disponen tres ovoides diminutos. Se trata de las **ampollas**. De cada ampolla parte un conducto hacia otra parte del utrículo. Son los **canales semicirculares**.

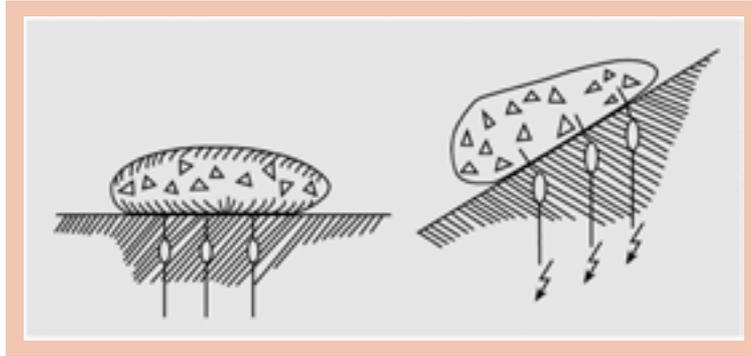
En la parte inferior del utrículo se aprecian dos aberturas, la ventana oval y la ventana redonda.



En el utrículo se encuentran varias estructuras sensibles a las vibraciones. Se trata de la **mácula utricular**, las **cúpulas ampulares** y la **mácula sacular**.

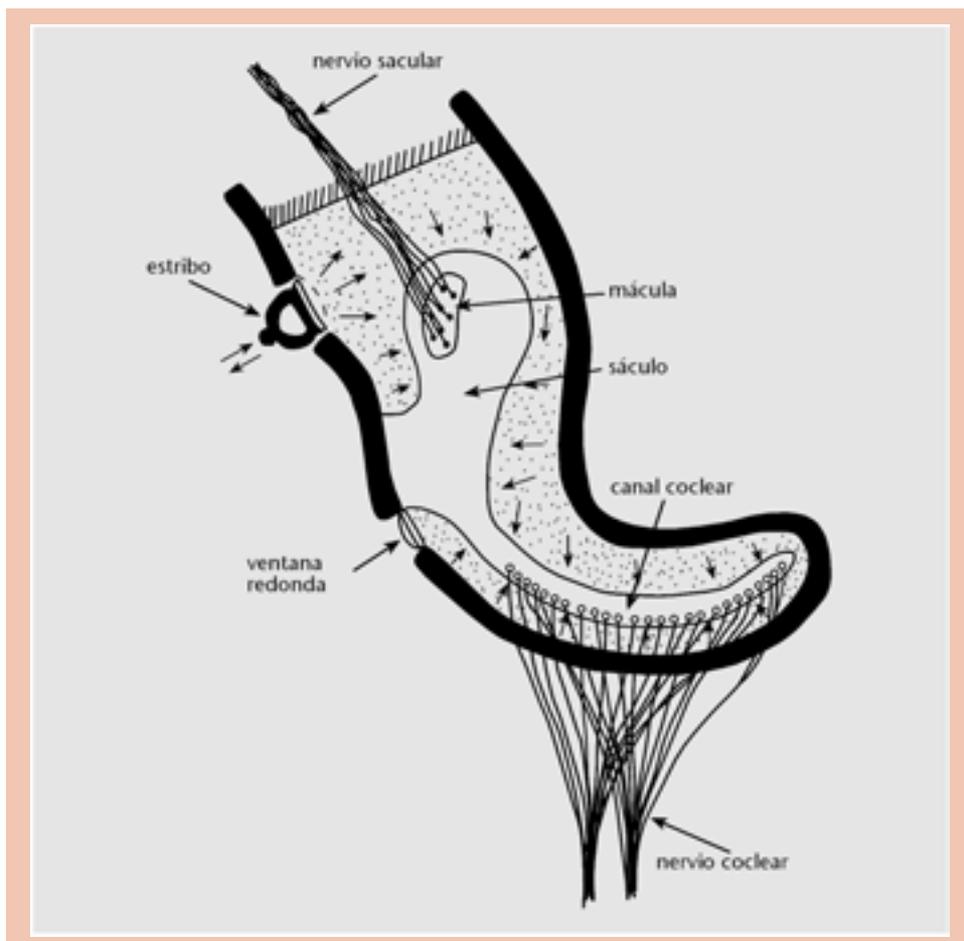
La mácula utricular es una pequeña masa gelatinosa aplanada bastante blanda, en cuyo interior hay piedrecitas, que le confieren algo de inercia. En el interior de la gelatina se insertan los cilios de un conjunto de células sensibles dispuestas en la pared que da soporte a la mácula. Cuando la mácula se inclina, las células ciliadas activan las terminaciones nerviosas a las que están conectadas. Este dispositivo es capaz de captar vibraciones de hasta algunos hercios.

Las ampollas del utrículo también dan soporte a unas estructuras llamadas cúpulas ampulares. Están bañadas por la endolinfa, un líquido de baja viscosidad. Las cúpulas alojan terminaciones de células ciliadas que se fijan a la pared de las ampollas.



La deformación de las cúpulas produce disparos en las terminaciones nerviosas conectadas a las células ciliadas asociadas. Las cúpulas ampulares son capaces de detectar vibraciones entre 5 y 30 hercios.

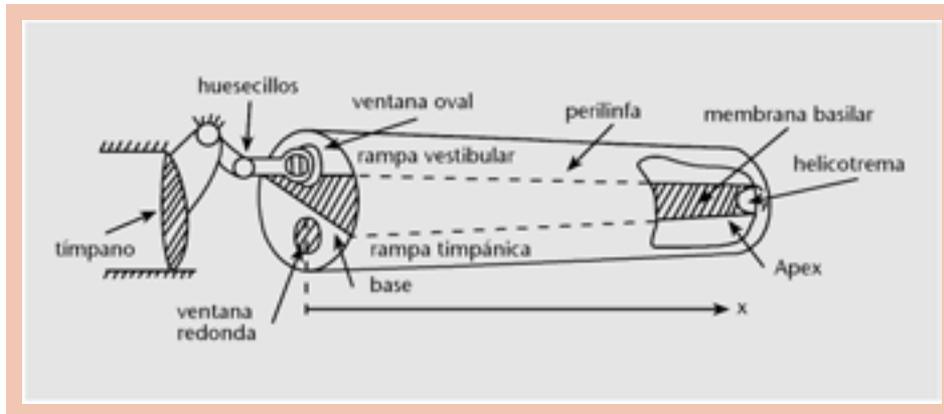
La mácula sacular, cuyo papel no está aún claramente definido, es una masa gelatinosa en la que se alojan células ciliadas cuyo cilio está fijado a la pared de un saco lleno de endolinfa. Se trata del *sáculo*. Cuando el sáculo lleno de endolinfa se deforma, la mácula se contrae y se expande de forma que las células ciliadas estimulan sus terminaciones nerviosas correspondientes.



El sáculo podría contribuir en la codificación de vibraciones de frecuencia entre 30 y 1.000 hercios.

La cóclea

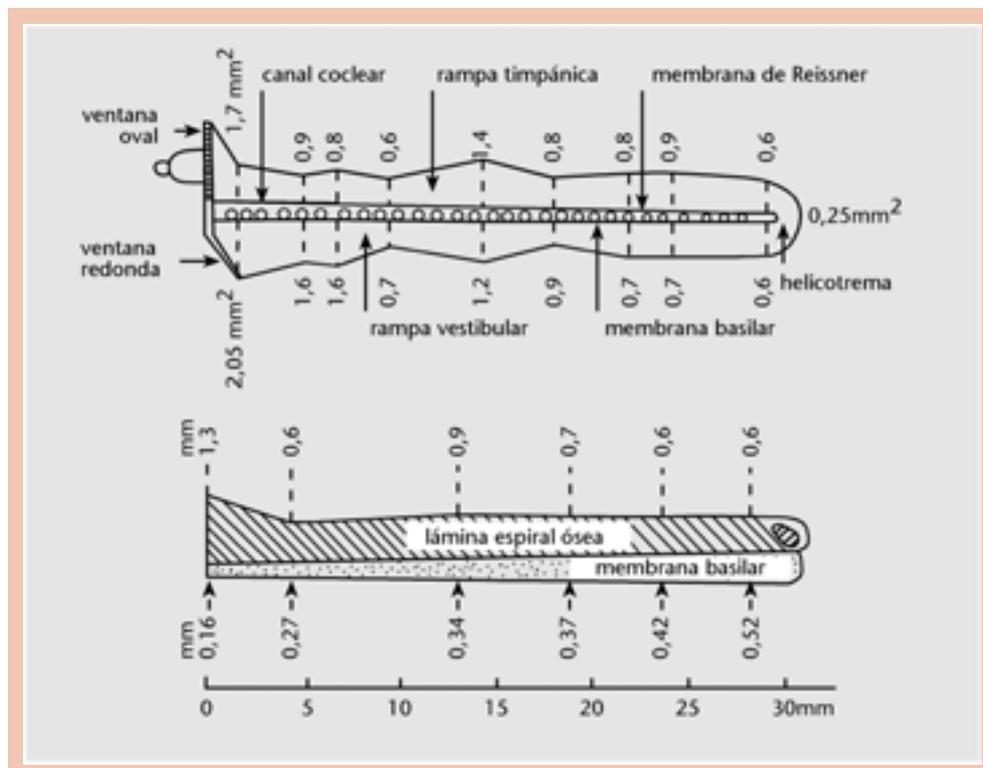
La cóclea es un órgano muy especial, enrollado en forma de caracol, se supone que debido a la necesidad de economizar espacio.



La figura muestra un esquema funcional de la cóclea, en contacto con el oído medio. Notad que aquí el conducto coclear, inicialmente en forma de caracol, está desplegado.

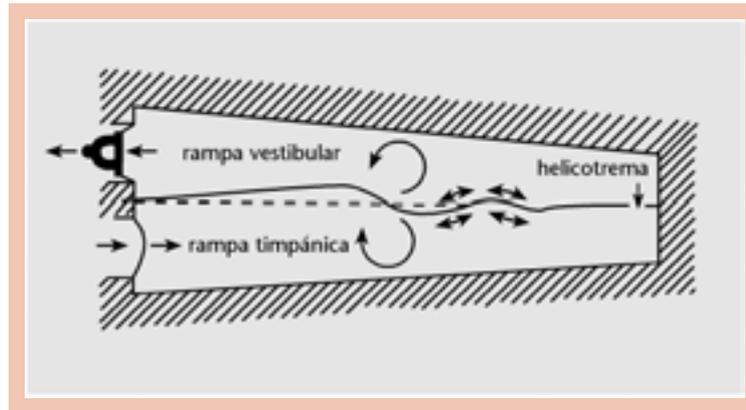
El conducto coclear, de 3,2 cm de largo, aparece dividido en dos cavidades llamadas **rampa timpánica** y **rampa vestibular**.

En la figura inferior se ofrece un detalle de las medidas de la cóclea.

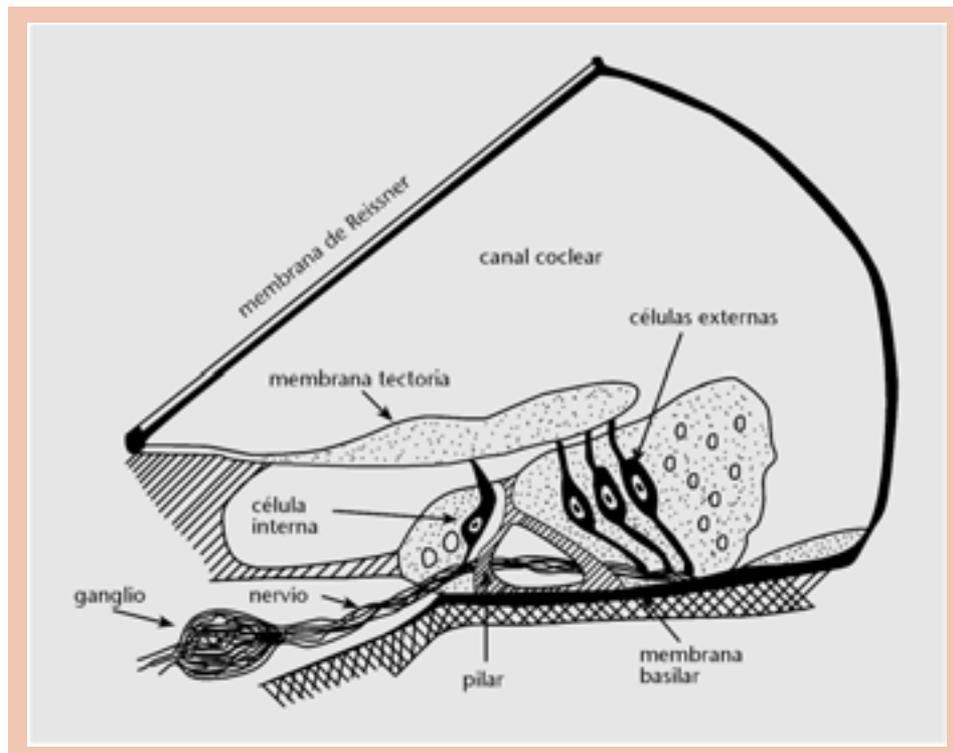


La membrana basilar aloja el **órgano de Corti** y las correspondientes terminaciones nerviosas. Ambas rampas, conectadas por un pequeño agujero llamado **helicotrema**,

están llenas de un fluido incompresible: la **perilinf**a. La sección inferior se cierra por otra membrana elástica que recibe el nombre de **ventana oval**.



Las vibraciones transmitidas por la cadena de huesecillos se convierten en oscilaciones del fluido perilinfático, las cuales al propagarse por el conducto coclear, pone en movimiento la membrana basilar como si fuera una bandera.



Hay en torno a 30.000 células ciliadas dispuestas en internas y externas a lo largo de la membrana basilar.

Estas células captan el movimiento y mandan señales a las terminaciones nerviosas que están en contacto con ellas.

Para un tono puro dado, las oscilaciones de máxima amplitud de la membrana basilar se dan en una región limitada y específica. La situación de esta zona de máximo movimiento de la membrana basilar depende de la frecuencia de la nota.

Para cada frecuencia existe una zona de sensibilidad máxima que recibe el nombre de **región de máxima resonancia**.

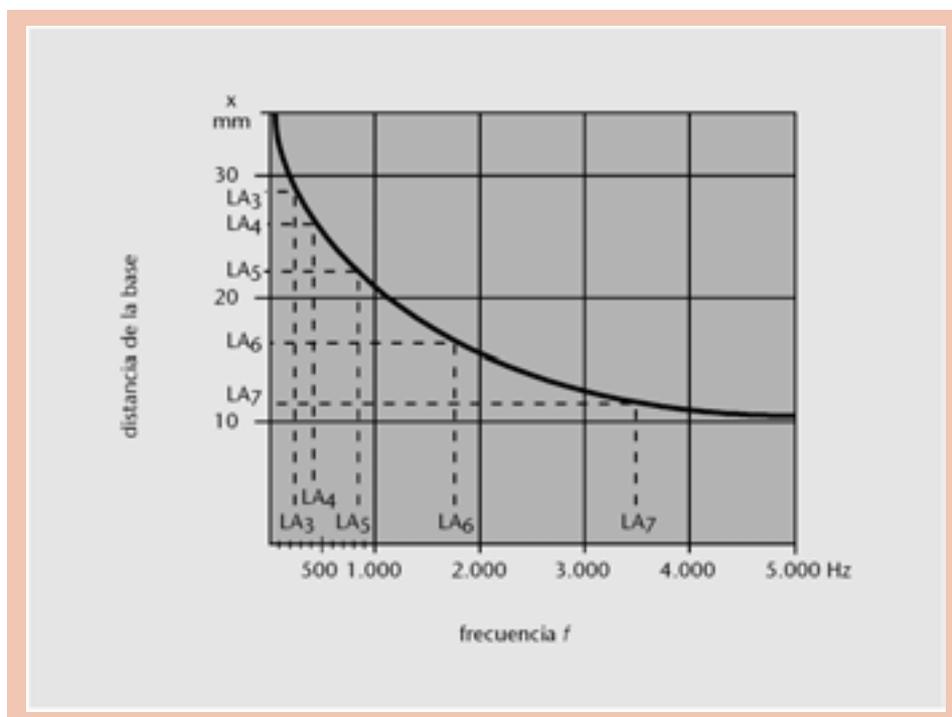
Cuanto más baja sea la frecuencia del sonido, más se acerca al ápex la zona estimulada. Se trata del punto donde la membrana es más sensible. Cuanto más alta sea la frecuencia, más se acerca la zona estimulada a la base, lugar donde la membrana es más rígida.

La posición espacial a lo largo de la membrana basilar de las células ciliadas y las células nerviosas asociadas determina la sensación primaria de altura. Un cambio de frecuencia causa un salto de posición de la zona activada. Este salto se interpreta como un cambio de altura.

La información primaria de frecuencia de tonos puros es codificada por el órgano de Corti, alojado en la membrana basilar, en forma de localización espacial de las neuronas activadas.

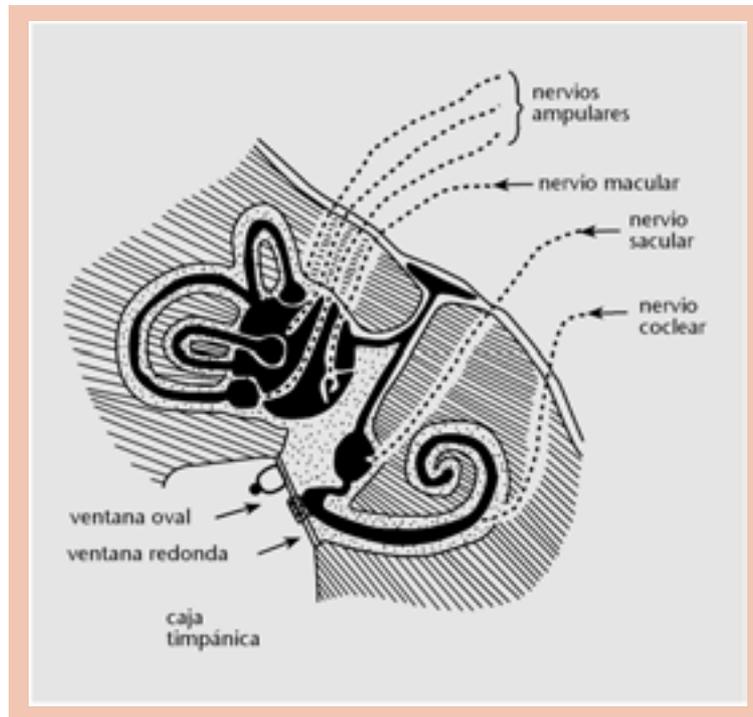
En función del grupo de neuronas activadas, la altura se manifiesta alta o baja. Cuando la frecuencia de un sonido varía de una octava, la región de resonancia correspondiente se desplaza una cantidad constante de 3,5 a 4 mm.

En general, si se multiplica la frecuencia por un determinado factor, la posición x de la región de resonancia no se multiplica. Se desplaza una cantidad constante.



Se aprecia en la figura una relación logarítmica entre la frecuencia y la localización de la zona de oscilación máxima en la membrana basilar.

De las consideraciones anteriores al respecto de las estructuras funcionales del oído interno, se deduce que no existe un mecanismo único de transducción de las señales mecánicas en eléctricas en el oído humano.



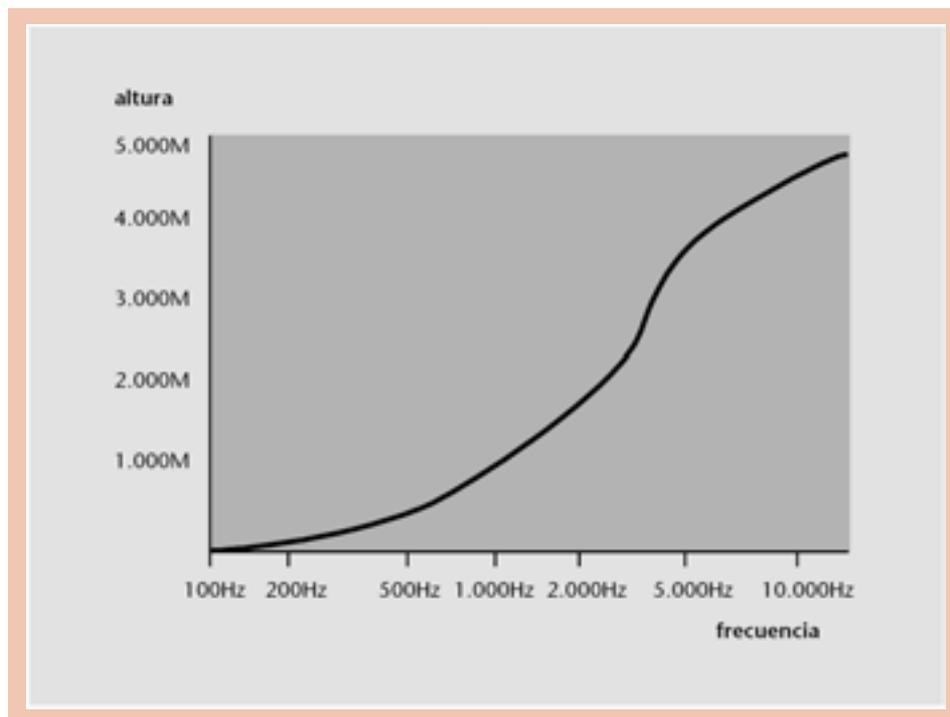
En la figura se representan las fibras nerviosas que llevan información sonora al cerebro. Se trata de los **nervios ampulares**, el **nervio macular**, el **nervio sacular** y el **nervio coclear**.

Etapa 2: Percepción de la altura

En esta etapa se tiene en cuenta la percepción de la altura de los tonos puros. Dichos sonidos se generan con instrumental electrónico adecuado. Aunque generalmente la música no esté hecha de sonidos puros: los sonidos de la flauta, especialmente los agudos, se acercan bastante a la forma de un sonido sinusoidal. En cualquier caso, ni los sonidos más puros producidos por instrumentación electrónica llegan en estado de total pureza tras recorrer el espacio que media entre el altavoz y el tímpano.

Sensaciones de tono puro

A medida que aumenta la frecuencia de un tono puro, aumenta la sensación de altura, aunque esto no ocurre de forma lineal. Desde los años cuarenta se sabe por los estudios de S.S. Stevens y J. Volkman que la relación se acerca a la ley de Weber-Fechner en algunos segmentos del rango de aplicación de dicho estímulo.



Definid arbitrariamente la unidad mel de la siguiente forma: considerad 1.000 mel como la percepción de altura correspondiente a 1.000 Hz a 60 decibelios. Asignad, entonces, 2.000 mel a una altura considerada subjetivamente de magnitud doble y 500 mel a una altura percibida como la mitad del patrón original.

En el gráfico se representan la frecuencia y la sensación de altura expresada en mel. Se observa que para alcanzar 3.000 mel es necesaria una frecuencia de 4.000 Hz.

En la introducción a la primera etapa (“Introducción a la psicoacústica musical”) se hizo constar que no siempre la sensación de altura depende únicamente de la frecuencia. Dicha sensación puede depender en igual medida de la intensidad. Se observa que en estímulos de frecuencia inferiores a 1.000 Hz, la sensación de altura disminuye cuando la intensidad del sonido aumenta. En sonidos superiores a 3.000 Hz, dicha relación se invierte, mientras que en los sonidos comprendidos entre los 1.000 y los 3.000 Hz no parece que la intensidad afecte a la altura.

Efectos psicoacústicos de primer orden

Los efectos psicoacústicos de primer orden se deben a procesos mecánicos que tienen lugar en estructuras auditivas de bajo nivel.

En este apartado se estudian aquellos que se deben a la superposición de tonos puros y se generan en el líquido coclear y a lo largo de la membrana basilar. Reciben el nombre de **efectos de superposición de primer orden**.

Se trata de fenómenos de fácil acceso a la experimentación psicoacústica.

El tímpano se mueve hacia adentro y afuera siguiendo las diferencias de presión que llegan a sus inmediaciones a través del canal auditivo.

Si se le hace oscilar con movimiento armónico simple de frecuencia y amplitud dadas, se oye un tono puro con cierta fuerza y altura. Sin embargo, si dos tonos puros de diferentes características suenan juntos, el tímpano reacciona respondiendo al mismo tiempo a dos vibraciones distintas. El movimiento resultante en el tímpano es la suma de los movimientos que tendrían lugar si cada sonido sonase solo.

El tímpano reacciona de esta forma, pero también lo hacen así el medio y todos los componentes vibratorios del aparato auditivo siempre que las amplitudes de los sonidos no excedan un cierto límite en el que la linealidad desaparece. Se trata de la **superposición lineal de dos vibraciones**, en la que un componente de vibración no perturba al otro.



Realizad el siguiente experimento:

Con la ayuda de una aplicación que nos permita generar dos tonos puros, como por ejemplo Sound Forge, sintetizad y disponed en canales diferentes dos tonos puros de igual frecuencia y fase. Teniendo cuidado de que ambos tonos se oigan por los dos auriculares, se obtiene la sensación de un tono puro de la misma frecuencia que los

sonidos originales y de amplitud igual a la suma de las amplitudes iniciales. La escucha, pues, debe ser monofónica. Notad que la sensación es la misma que si se hubiera realizado la mezcla de ambos tonos en un canal único cuya escucha se hubiera asignado a los dos auriculares.

Si los sonidos originales difieren en la fase, su superposición da un tono puro de la misma frecuencia pero con amplitud menor que la suma de las amplitudes de ambos sonidos.

Cuando la fase es de 180 grados, la suma de amplitudes es nula a lo largo de todo el periodo. Se habla entonces de **interferencia destructiva**.

Superposición de dos tonos puros de igual amplitud y distinta frecuencia

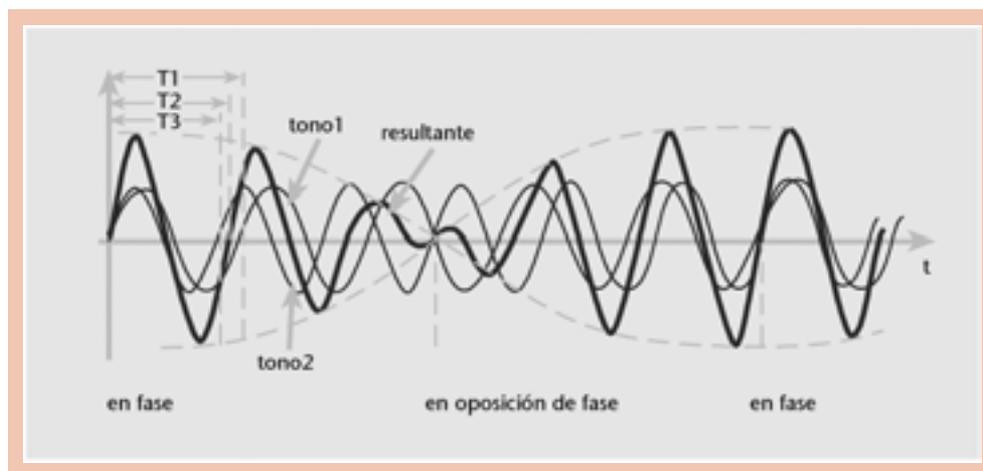
Se trata ahora de verificar lo que ocurre en una superposición de dos tonos puros con la misma amplitud pero con una diferencia de frecuencia pequeña tal como se expresa en la ecuación:

$$f_2 = f_1 + \delta f. \quad (1)$$

Para una mejor comprensión, llevad a cabo la siguiente prescripción: con la ayuda de la misma aplicación, sintetizad dos sonidos de igual amplitud –no muy fuerte– y frecuencias cercanas –300 Hz y 305 Hz, por ejemplo–. Disponed a cada uno en un canal independiente. También aquí es importante asegurarse de que el contenido de cada canal se escuche por los dos auriculares.

Si consideramos δf positivo, entonces f_2 es más alta que f_1 .

El patrón de vibración del tímpano viene determinado por ambos componentes de frecuencia al mismo tiempo. El resultado de la superposición es una oscilación de periodo intermedio entre f_1 y f_2 , con una amplitud modulada suavemente. El cambio suave de fase entre los dos componentes es notable: empiezan en fase y se desfasan paulatinamente hasta llegar a la oposición total en 180 grados. La diferencia de fase sigue creciendo hasta llegar a 360 grados, momento en el que vuelve a hacerse nula.



Este cambio suave y continuo de la fase es responsable del cambio de amplitud de la oscilación resultante en el tímpano, consistente en un único patrón de vibración que se transmite al fluido coclear y mueve dos regiones de resonancia distintas en la membrana basilar.

Si δt es lo bastante grande, las regiones de la membrana basilar están separadas. Vibran cada una de ellas con la frecuencia del componente que representan y así se oyen dos componentes de frecuencia totalmente diferenciados, correspondientes a cada uno de los tonos originales.

La capacidad de la cóclea, consistente en la separación de los componentes originales de un patrón de vibración complejo en el ámbito de la membrana basilar, se llama **discriminación de frecuencia**.

Se trata de un fenómeno mecánico debido a las propiedades hidrodinámicas y elásticas de los constituyentes del oído interno.

Si δf es menor que una cierta cantidad, las regiones de resonancia de la membrana basilar se solapan y entonces se oye sólo una nota de altura intermedia con fuerza modulada o batiente.

En este caso, la región de resonancia de la membrana basilar sigue un patrón de vibración esencialmente idéntico al del tímpano, y así es que la modulación de la amplitud del patrón de vibración causa la modulación de fuerza percibida. Este fenómeno se llama **batido de primer orden**.

La frecuencia del patrón de vibración resultante de dos tonos de frecuencia muy similar es el valor medio:

$$(f_1 + f_2)/2 = f_1 + \delta f/2. \quad (2)$$

El intervalo de tiempo Tb definido entre dos momentos cualesquiera en los que la amplitud resultante alcanza el valor inicial se llama **periodo de batido**. Su frecuencia es

$$fB = 1/TB = f_2 - f_1 = \delta f. \quad (3)$$

Su valor viene dado por la diferencia entre los dos tonos: a medida que las frecuencias f_1 y f_2 se acercan y δf se va haciendo nulo, la frecuencia de los batidos disminuye hasta cero.

$$\delta f = 0 \Rightarrow fB = 0.$$

Dos tonos puros con igual amplitud y aumento gradual de una de las frecuencias

A continuación se aborda el estudio de las sensaciones evocadas por la superposición de dos tonos puros de igual amplitud y frecuencia $f_2 = f_1 + \delta f$,

manteniendo f_1 estable y aumentando gradualmente f_2 desde el unísono. En este caso, δf aumenta desde cero.



Se aconseja realizar el siguiente experimento: en las mismas condiciones de asignación monofónica de canales, sintetizad dos tonos puros de igual frecuencia –en torno a 300 Hz–, fase, amplitud y duración de unos dos minutos. Disponed cada sonido en su canal correspondiente. Considerando uno invariable –de frecuencia f_1 –, aplicad al otro –de frecuencia

f_2 –, la modificación *Pitch Bend*, de forma que f_2 crezca linealmente a lo largo de su duración hasta alcanzar 350 Hz. Escuchad atentamente la variación en las sensaciones evocadas. Con la ayuda del cursor es posible desplazar el punto de atención a regiones aisladas del proceso durante el cual las frecuencias f_1 y f_2 se distancian.

En el momento inicial, cuando $f_1 = f_2$, la sensación resultante es la de una vibración con la misma frecuencia y cuya amplitud viene determinada por la diferencia de fase entre ambas. Si están en fase, como en el experimento propuesto en el contenido complementario anterior, la amplitud es doble.

Cuando f_2 es ligeramente mayor que f_1 , se oye una sola nota con frecuencia intermedia.

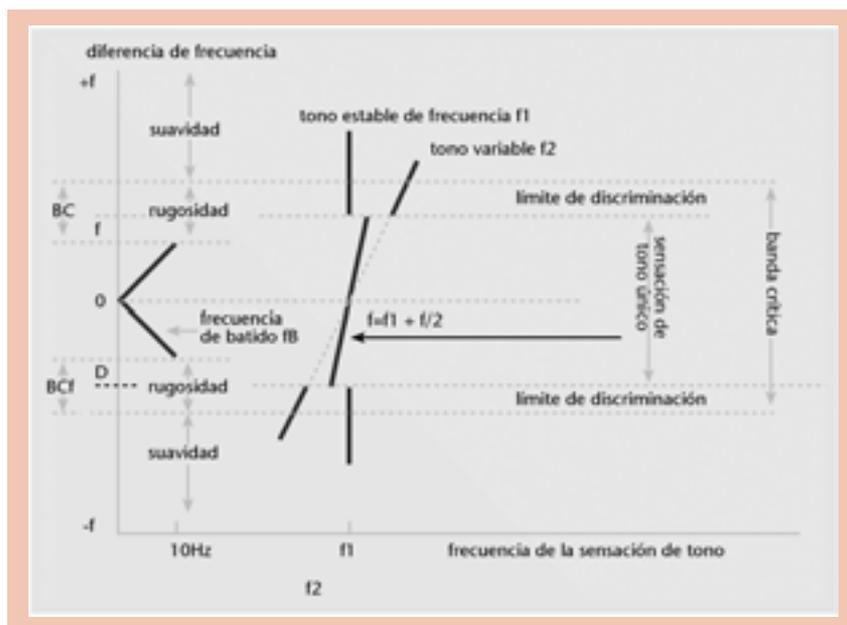
$$f_2 > f_1 \Rightarrow f = f_1 + \delta f / 2$$

La fuerza de esta nota bate con frecuencia δf . Mientras se mantenga por debajo de los 10 hercios ($\delta f \leq 10$ Hz) los batidos se percibirán claramente.

Cuando δf supere los 15 hercios ($\delta f \geq 15$ Hz), la sensación de batido se transforma en una nueva sensación muy característica de rugosidad que algunos pretenden desagradable.

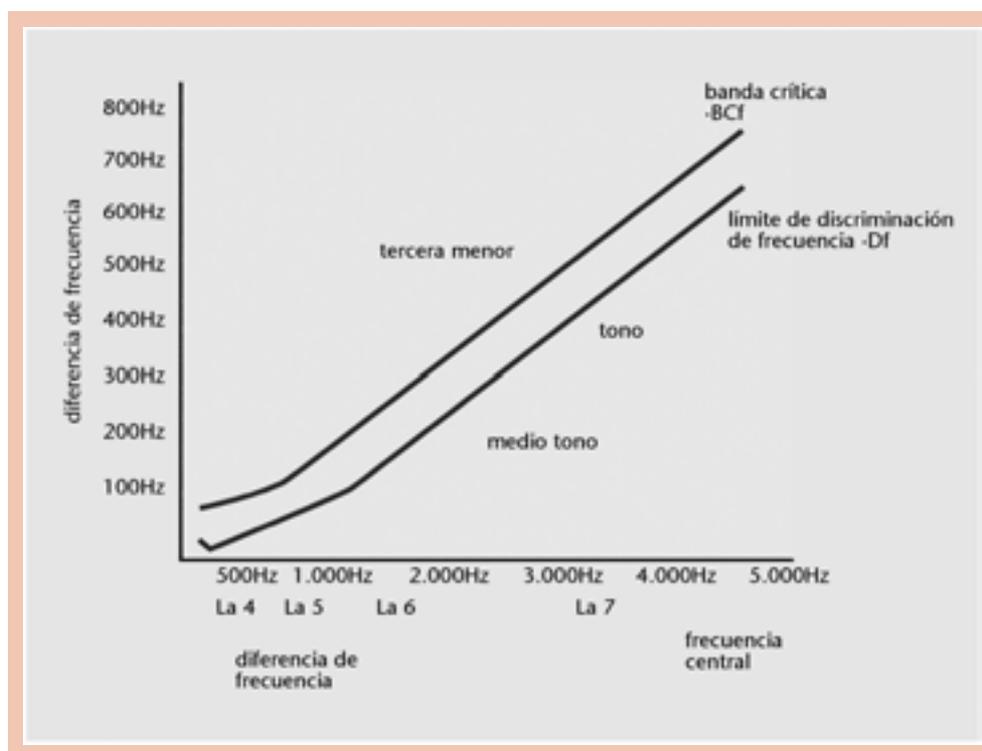
Al rebasar δf , el límite de discriminación de frecuencia (δDf), se distinguen separadamente dos tonos de frecuencias f_1 y f_2 : las dos zonas de resonancia de la membrana basilar vibran en este caso separadamente, por lo que el oído aprecia dos señales de diferente altura. Sin embargo, en este punto la sensación de rugosidad persiste, circunstancia que se aprecia tal vez con mayor claridad en la parte baja del rango audible del estímulo de frecuencia.

Mucho después de sobrepasar un nuevo límite llamado **banda crítica** (δBCf), la sensación de rugosidad desaparece gradualmente.



Límite de discriminación de frecuencia

El límite de discriminación de frecuencia depende en gran medida de la frecuencia media $(f_2 - f_1)/2$, llamada también **frecuencia central**. No depende de la amplitud y está sometido a amplias variaciones individuales.



El límite de discriminación es mayor que el semitono y a veces, incluso, mayor que el tono. Notad también que en el registro alto la banda crítica está entre un tono –considerado tradicionalmente como disonancia– y la tercera menor –una consonancia, también según la tradición–. En el registro grave, la discriminación

de frecuencia y la banda crítica es incluso mayor que la tercera menor. Seguramente ésa es la razón por la que las terceras menores se han usado poco en el registro grave a lo largo de la tradición musical occidental.

De lo observado hasta ahora se concluye que el límite de la discriminación de frecuencia es unas treinta veces mayor que la diferencia mínima apreciable.

Observad también que si los tonos puros de frecuencias f_1 y f_2 se hacen sonar asignados independientemente a auriculares distintos, de forma que el tono de frecuencia f_1 estimula un oído y el de frecuencia f_2 , el otro, los batidos no se presentan. Ocurre así incluso por debajo de δDf .

El batido de primer orden

El fenómeno del batido de primer orden es importante en música. Los batidos de primer orden son procesados por el cerebro y producen sensaciones que van del desagrado al placer dependiendo de la frecuencia de batido y de las circunstancias musicales individuales.



Un instrumento mal afinado produce sensación de desagrado, en parte por la generación de batidos de primer orden. El sonido entre curioso y divertido de una pianola se debe a los batidos generados porque las cuerdas de los órdenes correspondientes a las notas de los registros

medio y agudo están desafinadas entre. Por otra parte, es de dominio común considerar un instrumento afinado en el momento en que los batidos desaparecen. Muy a menudo, las guitarras se afinan de esa forma.

La banda crítica

La banda crítica también juega un papel importante en música. Independientemente de la frecuencia central, la banda crítica se corresponde anatómicamente con una extensión casi constante de 1.300 células ciliadas receptoras –alojadas en el órgano de Corti, en el interior de la membrana basilar–. Este hecho está en la base de que un estímulo sonoro complejo cuyos componentes se extienden a lo largo de un margen de frecuencias comprendido en el interior de la banda crítica cause una sensación subjetiva totalmente distinta del caso en que la frecuencia de los componentes se extienda en un rango mayor que la banda crítica.

La existencia de la banda crítica condiciona la percepción de la calidad de los sonidos y permite establecer las bases de una teoría psicoacústica de la consonancia y la disonancia de los intervalos musicales.

Cuando f_2 supera los límites de la banda crítica de f_1 mientras ésta se mantiene constante, se manifiesta una nueva categoría de efectos psicoacústicos de primer orden, designada por **tonos de combinación**. Se trata de sensaciones adicionales de afinación que se dan cuando dos tonos puros de frecuencias f_1 y f_2 suenan a un tiempo. Se perciben fácilmente cuando el nivel de intensidad es alto y son

sensaciones que podrían ser generadas por estímulos de frecuencia igual a la diferencia entre f_2 y f_1 . De ahí que reciban también el nombre de **tonos diferenciales**.

Los tonos diferenciales

Los tonos diferenciales no están presentes en el sonido original y se producen debido a una distorsión no lineal que tiene lugar en el oído cuando la amplitud de las señales supera determinados límites.



Se experimentarán sonidos diferenciales si se realiza la siguiente práctica: en las mismas condiciones monofónicas que rigen las experiencias anteriores, sintetizad dos tonos puros de igual duración –unos cuatro minutos–, igual frecuencia –en torno a 400 hercios–, igual fase e igual amplitud y disponed cada uno en un canal. La amplitud debe ser mayor que en los casos anteriores, pero no debe dañar los oídos. Por ello es necesario verificar la intensidad del sonido

sin ajustarse los auriculares. Con la ayuda de la función *Pitch Bend*, aplicad una variación de frecuencia a f_2 de forma que vaya de 400 Hz a 800 Hz a lo largo de los dos primeros minutos y de 800 Hz a 400 Hz a partir de este punto hasta el final. Escuchad atentamente las sensaciones auditivas obtenidas con el estímulo así configurado. Si es necesario, con la ayuda del cursor se puede escuchar el resultado en regiones específicas.

Además de los tonos de frecuencia f_1 y f_2 , se oyen sonidos en el registro grave. Son uno o más, en función de la diferencia de frecuencia entre los tonos iniciales. En el momento en que f_2 abandona el unísono, empieza a oírse uno muy grave de altura creciente. Si f_2 desciende desde la octava ($f_2 = 2 \times f_1$), se escucha otro muy grave que va subiendo. Con la suficiente atención es posible oír más de un tono. El que se percibe con mayor claridad se denomina **primer sonido diferencial** de frecuencia

$$fc_1 = f_2 - f_1 \quad (4)$$

Cuando f_2 es casi igual a f_1 el sonido diferencial coincide con el batido.

En el momento en que f_2 llega a la octava de f_1 ($f_2 = 2 \times f_1$), el primer sonido diferencial tiene frecuencia próxima a f_1 .

$$fc_1 = 2 \times f_1 - f_1 = f_1.$$

Si f_2 está en relación de quinta ($f_2 = 3/2 \times f_1$), entonces

$$fc_1 = 3/2 \times f_1 - f_1 = 1/2 \times f_1.$$

Es decir, se experimenta una sensación correspondiente a un tono de frecuencia igual a una octava por debajo de f_1 .

Los otros sonidos de combinación que se identifican a altos niveles de intensidad son el **segundo sonido diferencial**, de frecuencia

$$fc_2 = 2 \times f_1 - f_2 \quad (5)$$

y el tercer sonido diferencial, de frecuencia

$$fc_3 = 3 \times f_1 - f_2 \quad (6)$$

Su altura decrece cuando f_2 aumenta desde el unísono hasta llegar a la quinta; es decir, cuando se da que $f_2 = 3/2 \times f_1$. Se oyen mejor cuando f_2 se encuentra entre $1,1 \times f_1$ y $1,3 \times f_1$.

$$1,1 \times f_1 < f_2 < 1,3 \times f_1$$

Notad que la frecuencia del primer sonido diferencial es igual a la del segundo cuando f_2 es una quinta de f_1 :

$$f_2 = 3/2 \times f_1 \Rightarrow fc_1 = fc_2$$

Los sonidos diferenciales no están presentes en la vibración del tímpano, ni tampoco en la ventana oval. Sin embargo, parecen producirse por la activación de zonas de la membrana basilar en las posiciones correspondientes a las frecuencias de los tonos diferenciales.

Parecen deberse a la distorsión no lineal del estímulo de la onda primaria en la cóclea, ya que se demuestra matemáticamente que cuando dos oscilaciones armónicas entran en un transductor de respuesta distorsionada –no lineal–, la salida presenta componentes del tipo $f_2 - f_1$, $2 \times f_1 - f_2$, $3 \times f_1 - f_2$, $f_2 + f_1$, $2 \times f_2 + f_1$, etc.

Sin embargo, algunos experimentos parecen indicar que los sonidos diferenciales distintos del primero pueden originarse en otros mecanismos cocleares independientes. El umbral de intensidad para la generación de estos últimos es considerablemente más alto que para el primer sonido diferencial.

Los armónicos aurales

Otro efecto psicoacústico de primer orden es el constituido por otra categoría de fenómenos denominados genéricamente **armónicos aurales**. Se trata de sensaciones de altura que aparecen a la escucha de un tono puro de nivel de intensidad muy alto. Los armónicos aurales son sensaciones correspondientes a estímulos de tono puro de frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia original ($2 \times f_1$, $3 \times f_1$, $4 \times f_1$). Como en el caso de los tonos de combinación, no es necesario que esos componentes se hallen en el sonido original. Igualmente se deben a fenómenos relacionados con la distorsión producida en las partes mecánicas del aparato auditivo.

Instrumental electrónico e Hi-Fi de baja calidad pueden generar sonidos de este tipo. Cuando esto ocurre, se debe a una distorsión no lineal producida en la circuitería electrónica o en el mecanismo de los altavoces

Efectos psicoacústicos de segundo orden

Los efectos psicoacústicos del segundo orden se generan en el sistema nervioso, en un ámbito más elevado, pues, del de la membrana basilar y del órgano de Corti. No tienen, pues, una explicación mecánica inmediata. A menudo son también mucho menos evidentes y su estudio resulta más complicado.

Sea una situación experimental parecida a la descrita en los casos anteriores, donde mientras un tono puro se mantiene con frecuencia constante f_1 , otro, de frecuencia f_2 , varía lentamente. Para obtener los mejores resultados, el tono de frecuencia f_2 debe ser de amplitud ligeramente inferior. Para evitar confusiones con los tonos de combinación, es bueno no excederse demasiado en los niveles de intensidad. En este caso, la frecuencia f_2 varía en la vecindad de la octava de f_1 . Es decir que

$$f_2 = 2 \times f_1 + \partial \quad (7)$$

donde ∂ es un número entero de valor absoluto pequeño, que representa algunos hercios.

Al evolucionar lentamente hacia arriba la frecuencia de f_2 en ese rango vecino a $2 \times f_1$, se aprecia con claridad una sensación de batido bastante característica totalmente diferente del batido de primer orden que se produce cuando f_1 y f_2 están muy próximas.

Al alcanzar f_2 la octava de f_1 , el batido desaparece, y a medida que se desafina la octava aumentando nuevamente la frecuencia de f_2 , la sensación de batido vuelve a aparecer. La frecuencia de batido se corresponde con ∂ . No es fácil identificar qué es lo que bate. No se trata de la intensidad del sonido, pero tampoco se puede decir que lo que bata sea la altura. Para algunos, lo que oscila es la calidad del sonido. En realidad, lo que varía es el patrón de vibración en virtud del desfase de periodicidad ∂ que tiene lugar. Es importante resaltar el hecho de que en este caso no hay cambio macroscópico en la amplitud del patrón de vibración, al contrario de lo que ocurre en el batido de primer orden. Esto pone de manifiesto el hecho de que el oído es sensible a lentos cambios de fase. Dicho de otra forma, el oído es capaz de percibir cambios cíclicos en la forma del patrón de vibración; es decir, la forma de onda.

Este efecto, que sólo tiene lugar cuando f_1 y f_2 se mantienen por debajo de los 1.500 Hz, recibe el nombre de **batido de segundo orden**. También puede llamarse **batido subjetivo**. Si los tonos de frecuencias f_1 y f_2 se mandan separadamente a una pareja de auriculares, de forma que el de frecuencia f_1 afecte sólo a un oído y el de frecuencia f_2 , sólo al otro, el batido de segundo orden continúa oyéndose. Se experimenta entonces una sensación de rotación espacial de la imagen del sonido en el interior de la cabeza.

Se verifica que si f_2 oscila alrededor de la quinta justa,

$$f_2 = 3/2 \times f_1 + \partial \quad (8)$$

y de la cuarta justa,

$$f_2 = 4/3 \times f_1 + \partial \quad (9)$$

también se producen batidos de segundo orden, aunque bastante menos evidentes, ya que su patrón de vibración es más complejo que el que se genera con f_2 en la vecindad de la octava.

La frecuencia de los batidos de segundo orden en la vecindad de la quinta justa es

$$f_{B_V} = 2 \times \partial \quad (10)$$

La frecuencia de los batidos de segundo orden en la vecindad de la cuarta justa es

$$f_{B_{IV}} = 3 \times \partial \quad (11)$$



Mientras que para la música tradicional, especialmente aquella que se apoya mayoritariamente en cuestiones vinculadas a la melodía, los batidos de segundo orden no son demasiado importantes, el interés por los batidos de segundo orden ha aumentado a medida que la estética musical se ha ido basando en otros aspectos del sonido, más vinculados al color que a la frecuencia y al uso de dispositivos informáticos y electrónicos.

Otro fenómeno de segundo orden de importancia crucial para la comprensión de la percepción auditiva es el denominado **reconstrucción de la fundamental**.

Tiene gran importancia musical, ya que se trata del dispositivo que permite al oído humano asignar una única sensación de altura a estímulos complejos formados por varios tonos puros, como es el caso de los instrumentos musicales tradicionales.

Para percibir este efecto, escuchad dos tonos puros cuya diferencia de frecuencia sea la quinta justa. Sea pues:

$$f_2 = 3/2 \times f_1 \quad (12)$$

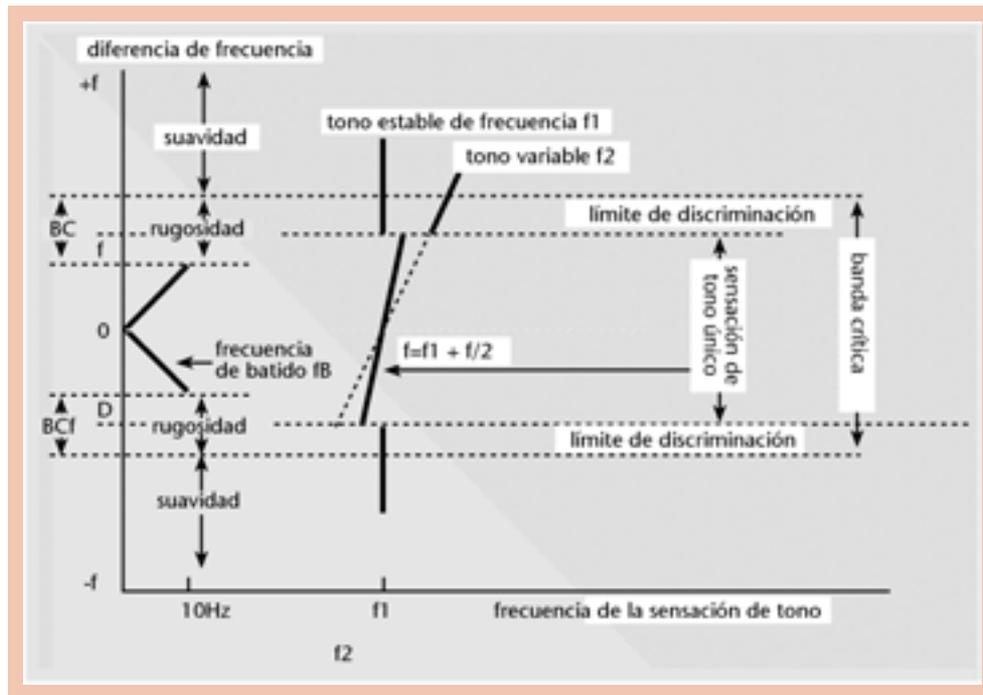
La figura muestra el patrón de vibración resultante para una diferencia de fase inicial nula. Su periodo es dos veces el periodo de la frecuencia más grave, lo que significa que la frecuencia del patrón de vibración es la mitad de la frecuencia más grave.

$$f_R = 1/2 \times f_1 \quad (13)$$

La frecuencia de este patrón recibe el nombre de **frecuencia fundamental**.

Para dos tonos puros separados por una cuarta justa,

$$f_2 = 4/3 \times f_1 \quad (14)$$



la frecuencia de la fundamental reconstruida resultante es la tercera parte de la frecuencia más baja:

$$f_R = 1/3 \times f_1 \quad (15)$$

lo que significa una doceava por debajo de f_1 .

Para dos tonos de frecuencias separadas por una tercera mayor,

$$f_2 = 5/4 \times f_1 \quad (16)$$

la frecuencia de reconstrucción resultante es la cuarta parte de la frecuencia más baja, es decir

$$f_R = 1/4 \times f_1 \quad (17)$$

lo que significa dos octavas por debajo de f_1 .

Estos fenómenos sólo se experimentan para sonidos de corta duración. Cuando dos tonos puros suenan durante un largo tiempo, el sistema auditivo deja de tener una única sensación de altura.

Las frecuencias de reconstrucción de los tonos complejos descritos coincide con la de los tonos de combinación descritos anteriormente. Sin embargo, se trata de fenómenos diferentes, ya que la reconstrucción de la fundamental de tonos complejos tiene lugar incluso a bajos niveles.

La reconstrucción de la fundamental es una característica del oído utilizada ampliamente a lo largo de la historia de la música. En muchos órganos es corriente el uso de un registro que hace sonar, además de los correspondientes a la nota escrita,

tubos afinados una quinta por debajo de ésta. Se pretende crear una nota virtual una octava más baja que la escrita. Otro registro, también muy utilizado, simula la doble octava baja en los pedales, al hacer sonar, simultáneamente a la vez que la nota escrita, tubos afinados una tercera mayor por debajo.

Es importante destacar el hecho de que la fundamental reconstruida no responde a la presencia de ningún tono de la frecuencia correspondiente presente en el estímulo.

El tono correspondiente a la sensación de fundamental reconstruida se llama **fundamental perdida**. La sensación de altura correspondiente recibe el nombre de **altura de periodicidad**, pero también recibe otros nombres como **altura subjetiva**, **tono residual** o **altura virtual**.

La fundamental perdida no se encuentra en el líquido coclear, pero continúa oyéndose incluso habiendo saturado la membrana basilar con una banda de ruido blanco. La sensación de fundamental perdida se experimenta incluso cuando los componentes puros del tono complejo se escuchan separadamente cada uno a través de un oído distinto. Todo ello justifica la idea de que la reconstrucción de la fundamental tiene lugar por medio de dispositivos neuronales en instancias altas del aparato auditivo.

La reconstrucción de la fundamental únicamente ocurre a frecuencias inferiores a los 1.500 hercios. Por otra parte, cuanto menor es el intervalo entre los componentes puros del tono complejo, mayores son las dificultades para percibir la fundamental perdida.



En el pentagrama superior, en clave de sol, se representan composiciones de tonos complejos con reconstrucción de la fundamental común, la cual se expresa en el pentagrama inferior escrito en clave de fa.

Vale la pena subrayar el hecho de que las frecuencias de los tonos simples especificados en el pentagrama superior muestran una particularidad muy conocida. Coinciden dos a dos con los armónicos superiores de la fundamental perdida f_R : $2 \times f_R - 3 \times f_R$, $3 \times f_R - 4f_R$, $4 \times f_R - 5 \times f_R$, $5 \times f_R - 6 \times f_R$, $6 \times f_R - 7 \times f_R$ y $7 \times f_R - 8 \times f_R$.

Tonos complejos compuestos de mayor número de tonos puros en relación armónica generan también sensaciones de reconstrucción de la fundamental perdida.

Cuanto mayor es el número de armónicos incluidos, mayor es la claridad con que se percibe la altura de periodicidad.

Inversamente, cuanto más alto sea el orden del armónico de menor frecuencia, menor será la sensación de fundamental reconstruida.

Los armónicos más importantes para la percepción de este efecto de segundo orden son los cuatro primeros.

Codificación auditiva en el sistema nervioso periférico

Cuando su estimulación mecánica sobrepasa un determinado umbral, las células ciliadas del órgano de Corti, que agrupadas en externas e internas se disponen a lo largo de la membrana basilar, dan órdenes para disparar estímulos nerviosos a las terminaciones nerviosas del nervio acústico en contacto con ellas. Las terminaciones nerviosas internas contactan con unas pocas células ciliadas situadas en una misma vecindad de la membrana basilar. Por ello reciben mensajes de una región limitada de aquélla.

Las externas, por su parte, contactan con varias células ciliadas pertenecientes a zonas diferentes de la membrana basilar, a varios milímetros de distancia, por lo que reaccionan ante estímulos de frecuencias diferentes.

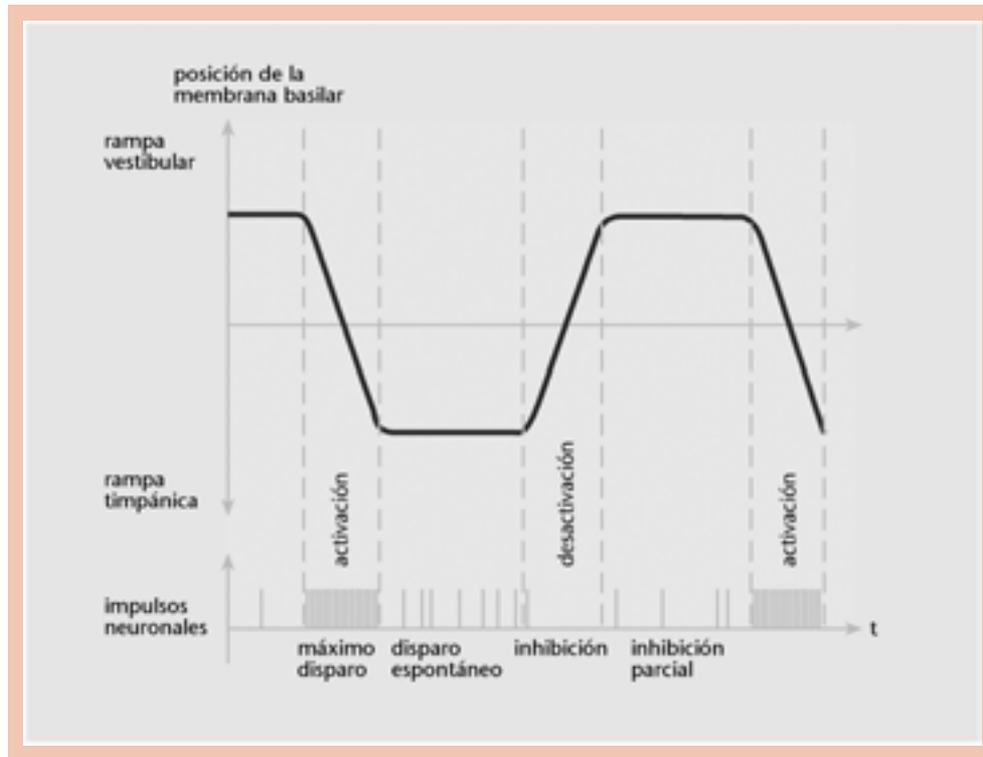
Mientras que las fibras conectadas a la parte interna de la membrana basilar parecen ser sensibles a la velocidad del movimiento de la porción de membrana basilar a la que están conectadas, las externas son más sensibles a la cantidad de desplazamiento.

Todo esto sugiere diferentes funciones para las fibras externas y las internas.

Cuando una señal acústica consistente en un tono puro alcanza el aparato auditivo, la membrana basilar se pone en funcionamiento y sus oscilaciones estimulan las células ciliadas situadas en la región de resonancia correspondiente a la frecuencia del tono puro en cuestión.

Se sabe que una fibra nerviosa dada tiene un umbral mínimo de disparo propio y específico para una frecuencia dada que evoca una oscilación máxima en el lugar de la membrana basilar al que está conectada. La frecuencia a la que cada fibra nerviosa presenta una respuesta máxima ha sido llamada la **mejor frecuencia** de la fibra.

Para las fibras internas, la máxima frecuencia de disparo se asocia a una velocidad máxima del movimiento de la membrana basilar hacia la rampa timpánica. La frecuencia de disparo se inhibe cuando el movimiento de la membrana basilar se invierte hacia la rampa vestibular. Más aún, la posición instantánea de la membrana basilar posee efecto excitador o inhibitorio en función de si la membrana basilar se dirige hacia la rampa vestibular o si lo hace en sentido contrario. La suma de ambos efectos determina la respuesta total.



La figura muestra la distribución temporal de los impulsos nerviosos en una fibra del oído interno conectada a la región de resonancia de la membrana basilar específica para un tono de baja frecuencia con un patrón de vibración de forma trapezoidal.

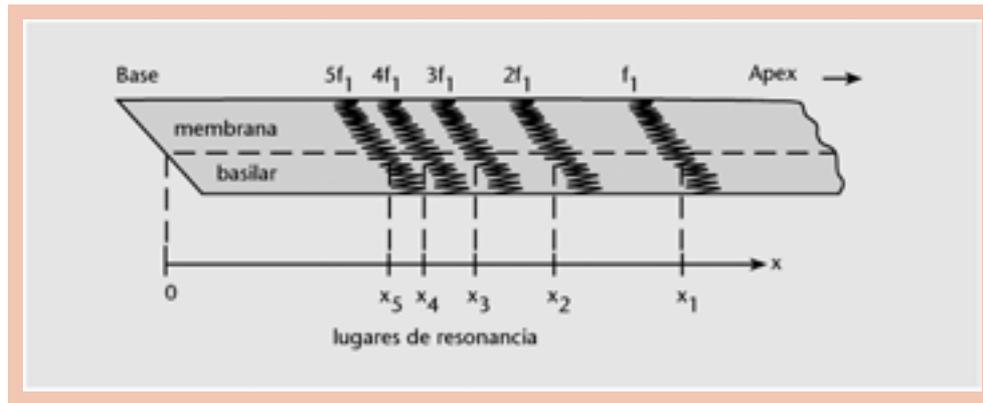
Normalmente, las frecuencias acústicas son mucho más altas que las frecuencias de disparo de las neuronas. Por ello, las zonas de excitación e inhibición nunca están, en la práctica, tan delimitadas como en la figura.

Para los tonos puros, el intervalo de tiempo entre disparos sucesivos tiende a ser un múltiplo entero del periodo correspondiente a su vibración. Cuanto más alta sea la frecuencia en cuestión, menor será la precisión con que esta codificación tendrá lugar, y para frecuencias mayores que algunos miles de hercios, este fenómeno dejará de ocurrir.

El papel del sistema nervioso central en la reconstrucción de la fundamental y la teoría de la distribución temporal

Una fibra nerviosa del nervio auditivo es capaz de transportar información de dos tipos.

Por el simple hecho de estar disparando, una fibra informa al sistema auditivo de que la membrana basilar se ha movido en un determinado punto. La llamada **organización tonotópica** de las fibras codifica la información en alturas primarias. Se trata de la **teoría de la posición**.



Esto ocurre para todas las frecuencias audibles, pero no explica cómo se identifican las formas particulares del patrón de vibración.

Para explicarlo es necesario recurrir a la segunda forma de vehicular la información. Para el rango de las frecuencias bajas, la distribución de impulsos nerviosos lleva información acerca de la periodicidad y, posiblemente, otros detalles del patrón de vibración.

Considerad la superposición de dos tonos puros con frecuencias separadas de una octava ($f_2 = 2 \times f_1$). Al estimular el oído con estas dos señales, aparecerán dos zonas de resonancia en la membrana basilar en posiciones x_1 y x_2 respectivamente. En el nervio coclear se encontrarán dos fascículos de actividad centrada en las fibras cuyas mejores frecuencias coincidan con f_1 y f_2 . Ello dará lugar a dos sensaciones primarias de altura separadas de una octava. Las regiones de la membrana basilar se solaparán entre x_1 y x_2 , donde los puntos de la membrana vibren de acuerdo con el patrón superpuesto relacionado con el movimiento original del tímpano. Las fibras conectadas a esta región de solapamiento responderán con disparos agrupados en intervalos de activación correspondientes a las porciones descendentes de la forma de onda.

En el caso de una falta de simetría, como ocurre en los batidos de segundo orden, en los que la forma del patrón de actividad varía debido a la diferencia de fase, los intervalos de excitación no tendrán la misma duración. Por otra parte, la secuencia de intervalos de activación correspondientes, por ejemplo, a la suma de dos tonos de frecuencias separadas por una quinta, tendrá una estructura totalmente diferente. Lo

mismo ocurrirá si la separación de frecuencias entre los tonos es de una cuarta o cualquier otro intervalo.

Mientras que la periodicidad de los intervalos de activación da información acerca de la frecuencia de la repetición del patrón de vibración, la estructura de la secuencia codifica su forma.

Este enunciado constituye la base de la llamada **teoría de la distribución temporal**.

Etapa 3: Percepción de la intensidad. Sonoridad

En esta etapa se estudia un conjunto de fenómenos que ayudan a comprender la forma en que el flujo de energía acústica condiciona la sensación de fuerza.

En la etapa anterior se establece que para un sonido puro, la amplitud de la vibración del tímpano lleva a la sensación de fuerza del sonido. Esta amplitud está directamente relacionada con la variación de presión (Δp) del sonido entrante y, por tanto, con el flujo de energía acústica o intensidad (I).

El rango de intensidades de los tonos puros a los que el oído es sensible depende de la frecuencia del sonido y presenta variabilidad interindividual.

Para un individuo dado, hay dos límites de sensibilidad a un sonido de una frecuencia dada:

- Un límite inferior de escucha que representa la mínima intensidad audible.
- Un límite superior de escucha más allá del cual se produce dolor fisiológico, lo cual implica daño del mecanismo del oído.

La mayor distancia entre esos límites se da aproximadamente cuando la frecuencia está en la vecindad de los 1.000 Hz, circunstancia que representa una sensación de altura superior a un Si 5.

En la etapa anterior se establecía que para un sonido de 1.000 Hz los límites inferior y superior son 10^{-12} W/m² y 1 W/m², respectivamente.

Así pues, el oído es sensible a una relación de intensidades de uno a un trillón.

En la siguiente tabla se ponen de manifiesto la sensación de intensidad sonora –en notación musical tradicional– asociada a una escala de intensidades.

Intensidad (W/m ²)	Sensación de intensidad
1	(dolor)
10 ⁻¹	fffff
10 ⁻²	fff
10 ⁻³	fff
10 ⁻⁴	ff
10 ⁻⁵	f
10 ⁻⁶	mf
10 ⁻⁷	mp

Intensidad (W/m^2)	Sensación de intensidad
10^{-8}	p
10^{-9}	pp
10^{-10}	ppp
10^{-11}	pppp
10^{-12}	ppppp (umbral de audición)

La notación musical sirve en este caso para dar una idea de gradación uniforme en la sensación de intensidad. Notad, sin embargo, que la elección de la notación musical como representante de una medida absoluta de la fuerza del sonido es arbitraria. De hecho, es posible percibir *pianísimos* y *fortísimos* incluso cuando el potenciómetro de volumen del amplificador está muy bajo y las intensidades y sus relaciones no se corresponden con las de la tabla.

Esto significa que la sensación relativa de intensidad está relacionada, además, con otras características físicas del sonido. Por otra parte, se sabe que la interpretación de la notación musical de la fuerza es altamente dependiente del instrumento y del registro.

Ley de Weber-Fechner para la percepción dinámica del sonido y mínima diferencia apreciable para la intensidad del sonido

A causa del gran rango de intensidades al que el oído manifiesta sensibilidad, la unidad W/m^2 no es práctica. Sin embargo, hay otra razón para ello, y es de orden psicofísico.

Se dejó intuir en la etapa anterior que la diferencia apenas perceptible (DAP) de un estímulo dado es un buen parámetro a tener en cuenta en la elección de una unidad para la magnitud física correspondiente al estímulo.

La DAP para la intensidad de sonido es casi proporcional a la intensidad del sonido.

Una unidad psicofísica apropiada debe incrementar gradualmente a medida que el incremento de intensidad describa incrementos de la sensación. Esto resulta muy complicado en la sensación de fuerza sonora a menos que se introduzca una magnitud diferente que sea una función apropiada de la intensidad (I).

La introducción de una nueva magnitud debe estar dirigida a los siguientes elementos:

- A la compresión del margen audible de la escala de intensidades a un menor margen de valores.

- Al uso de valores relativos (el umbral, por ejemplo).
- Al ajuste de la tasa de cambio de estímulo de intensidad de sonido más cercano al mínimo cambio perceptible de la intensidad del sonido (DAP).

En la tabla anterior, lo que parece más relacionado con la sensación de intensidad de sonido es el exponente al que se eleva 10, como se expresa en la siguiente tabla:

-12	ppppp (umbral de audición)
-11	pppp
-10	ppp
-9	pp
-8	p
-7	mp
-6	mf
-5	f
-4	ff
-3	fff
-2	ffff
-1	fffff
-0	(dolor)

Se pone así de manifiesto una relación logarítmica entre el nivel de intensidad sonora y su percepción.

Para definir la nueva magnitud es necesario introducir un punto de referencia arbitrario. Por conveniencia se adopta el umbral de audición a 1.000 Hz (10^{-12}W/m^2) como intensidad de referencia, que se simboliza por I_0 , y se usa para definir arbitrariamente el nivel de intensidad de sonido como:

$$IL = 10 \times \log_{10} (I/I_0) \quad (1)$$

En la terminología anglosajona el nivel de intensidad se simboliza por IL . En este apartado se usa dicha terminología por considerarla la más generalizada.

La unidad de nivel de intensidad IL es el decibelio, que se simboliza por dB.

De la aplicación directa de (1) resulta que para el umbral de audición (I_0), cuando $I/I_0 = 1$, $IL_0 = 0$ dB, ya que:

$$IL_0 = 10 \times \log_{10} (I_0/I_0) = 10 \times \log_{10} 1 = 10 \times 0 = 0 \text{ dB}$$

De igual forma, para el límite de dolor, cuando $I/I_0 = 10^{12}$, $IL = 120$ dB

$$IL_{\text{dolor}} = 10 \times \log_{10} (I_{\text{dolor}}/I_0) = 10 \times \log_{10} 1 \text{ W/m}^2 / 10^{-12} \text{ W/m}^2 = 120 \text{ dB}$$

El nivel de intensidad correspondiente a un *forte* (f) es 70 dB:

$$IL_f = 10 \times \log_{10} (I_f/I_0) = 10 \times \log_{10} 10^{-5} \text{ W/m}^2/10^{-12} \text{ W/m}^2 = 70 \text{ dB}$$

El de un *pianissimo* (ppp), es 20 dB:

$$IL_{ppp} = 10 \times \log_{10} (I_{ppp}/I_0) = 10 \times \log_{10} 10^{-10} \text{ W/m}^2/10^{-12} \text{ W/m}^2 = 20 \text{ dB}$$

Notad que se trata de una medida relativa con respecto a un valor de referencia, en este caso, el umbral de audición, aunque hubiera podido tratarse de otro valor de referencia distinto. El interés de la elección de este valor de referencia concreto reside en el hecho de que a la intensidad que indica ocurren hechos fácilmente constatables, a saber, que un tono puro de 1.000 hercios empieza a ser percibido por el dispositivo auditivo humano.

Es importante entender que IL es una definición y que, por tanto, su elección, como ocurre con la de cualquier patrón de medida, responde a criterios arbitrarios.

La definición del nivel de intensidad en los términos anteriores tiene bastantes ventajas. Una de ellas reside en el hecho de que aritmetiza un sistema de valores que de otro modo tendría características exponenciales. Por ejemplo, cuando la intensidad se multiplica por un valor de 10, se suman 10 dB a IL . Al multiplicar por 100, se añaden 20 dB a IL y al dividir por 100, se le restan.

A este respecto, la siguiente tabla ofrece algunas relaciones interesantes:

cambio en nivel de intensidad IL		cambio en intensidad
sumar o restar	1 dB a IL	multiplicar o dividir I por 1,26
sumar o restar	3 dB a IL	multiplicar o dividir I por 2
sumar o restar	10 dB a IL	multiplicar o dividir I por 10
sumar o restar	30 dB a IL	multiplicar o dividir I por 1.000
sumar o restar	70 dB a IL	multiplicar o dividir I por 10.000.000

La medida de la intensidad del sonido es difícil. Mucho más sencilla resulta la medición de la **presión media** (Δp). Es bien conocida una relación entre la intensidad y la presión media de una forma de onda asociada. Viene dada por:

$$I = 0,00234 \times (\Delta p)^2 \text{ (en W/m}^2\text{)} \quad (2)$$

donde la presión media debe estar expresada en newton/m².

Por tanto, es posible expresar la intensidad en términos de variación de presión. Aplicando (2) a I_0 , a 1.000 Hz le corresponde aproximadamente una variación media de la presión de:

$$\Delta p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ newton/m}^2$$

Dado que I es proporcional al cuadrado de Δp , es posible escribir:

$$\log_{10} I/I_0 = \log_{10} (\Delta p/\Delta p_0)^2 = 2 \times \log_{10} (\Delta p/\Delta p_0),$$

de donde se introduce la cantidad:

$$SPL = 20 \times \log_{10} (\Delta p/\Delta p_0) \quad (3)$$

Donde SPL es el llamado **nivel de presión sonora**, análogo a $IL = 10 \times \log_{10} I/I_0$ siempre que exista flujo de energía. Por ejemplo, en las ondas estacionarias no se puede usar la intensidad, ya que en ese caso no tiene sentido.

Por el contrario, el concepto de variación de presión en un punto del espacio mantiene el sentido y con él, el de nivel de presión sonora (SPL). Por esta razón, normalmente se utiliza más la relación (3) que la (1).

Notad que las definiciones de IL y SPL no implican para nada la frecuencia de la onda sonora. Aunque sea en referencia a I_0 , nada impide definir el nivel de intensidad de sonido (IL) y/o el nivel de presión sonora (SPL) para cualquier frecuencia arbitraria.

Lo que sí depende de la frecuencia, y muy fuertemente, son los límites subjetivos de la escucha. En general, como se verá, esto ocurre con la sensación subjetiva de fuerza sonora.

Cuando se superponen dos sonidos de la misma frecuencia y en fase, ocurren cosas que pueden parecer extrañas en los niveles de intensidad del sonido (IL) y de presión sonora (SPL).

Considerad la tabla anterior a efectos de lo que sigue:

Al sumar (mezclar) dos notas de la misma intensidad –que se multiplica por 2–, sólo se le añaden 3 dB al nivel de intensidad del sonido original para todo valor de IL .

La superposición de 10 notas iguales, en igual fase, sólo incrementan 10 dB el IL resultante.

Para superar en 1 dB un determinado nivel de intensidad sonora (IL), hay que multiplicar la intensidad por 1,26. Esto implica que hay que añadir una nota de intensidad 0,26 veces la del sonido original.

El mínimo cambio en SPL requerido para detectar un cambio en la sensación de fuerza del sonido –la diferencia apenas perceptible para la sensación de fuerza del sonido– es casi constante y del orden de 0,2 a 0,4 dB en los rangos musicalmente relevantes de afinación y sonoridad.

La unidad de IL o SPL tiene, pues, un tamaño razonable cercano a la DAP.

Mínima diferencia apreciable para la intensidad del sonido

Existe una forma alternativa de estudiar la DAP para la intensidad del sonido. En lugar de preguntarse acerca de qué valor debe tener la variación de la intensidad para obtener un efecto apreciable, es posible plantear una cuestión totalmente equivalente.

Se trata de investigar cuál es la intensidad mínima I_2 que debe tener una segunda nota de la misma frecuencia y fase, para ser apreciada en presencia de una primera, cuya intensidad I_1 permanece constante. Este valor mínimo recibe el nombre de **umbral de máscara**. El sonido original con intensidad I_1 recibe el nombre de **enmascarador**, mientras que el sonido adicional de I_2 es el **enmascarado**.

La **máscara** juega un papel fundamental en música.

La relación entre el nivel de máscara (LM) $-IL$ del sonido enmascarado en el umbral y la DAP puede encontrarse usando la relación $IL = 10 \times \log(I/I_0)$. Considerando las propiedades de los logaritmos, para una DAP de 0,2 dB se obtiene un nivel de máscara (ML), 13 dB por debajo del IL del tono enmascarador. Si la DAP es de 0,4 dB, la diferencia es de 10 dB.

Nivel de intensidad de sonido y sonoridad

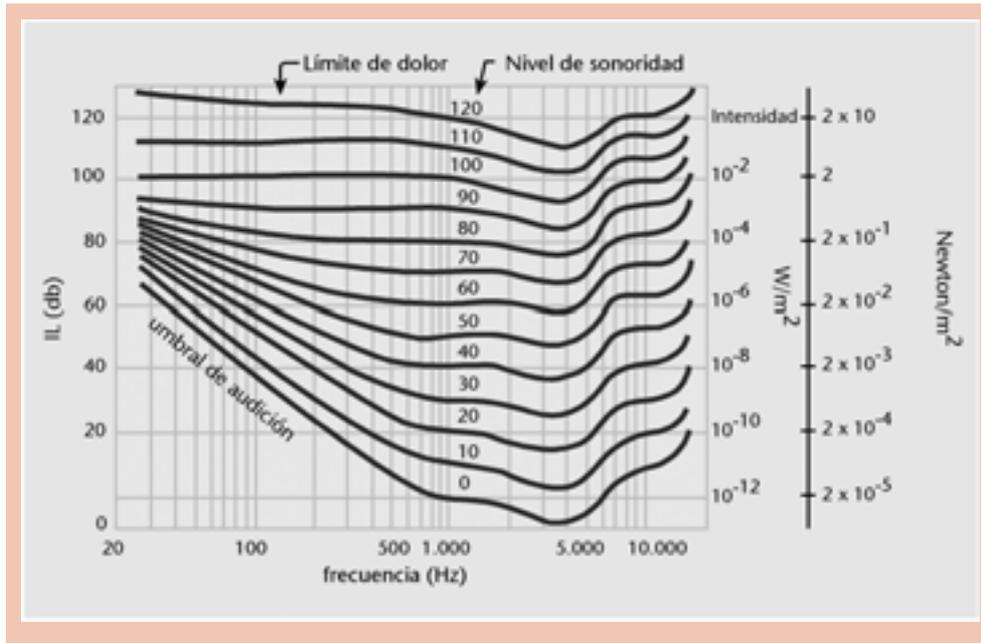
Todo lo anterior confluye en la definición de una nueva magnitud psicofísica: la **sonoridad** del sonido asociada a un SPL dado.

El sistema perceptivo humano presenta la capacidad de establecer niveles de fuerza para dos sensaciones del mismo tipo. Para la fuerza sonora, los juicios de cuando dos tonos puros suenan igualmente fuertes muestran una dispersión muy baja entre los diferentes individuos. La dificultad aparece cuando se pregunta cuánto más fuerte es un sonido en relación con otro. Para conseguirlo es necesario entrenar a los sujetos de análisis, pero aún en ese caso los resultados variarán mucho de un sujeto a otro.



En general, se verifica que sonidos puros de frecuencia diferente y con el mismo SPL producen sensaciones de fuerza sonora diferente. Por ello, cuando interesa comparar tonos de frecuencia diferente, el SPL no es una buena medida de la fuerza del sonido, llamada comúnmente **sonoridad**.

En los años treinta se llevó a cabo un gran número de experiencias para establecer curvas de fuerza igual, tomando el SPL a 1.000 Hz como referencia.



En el eje vertical centrado en 1.000 Hz, hacia ambos lados se dibujan curvas que corresponden a los SPL de los sonidos que se juzgan con igual sensación de sonoridad que el sonido de referencia de 1.000 Hz.

Se aprecia, por ejemplo, que mientras un sonido 1.000 Hz a un SPL de 40 dB ($10^{-7} W/m^2$) es perfectamente audible, un sonido de 60 Hz con el mismo SPL ya lo no es.

De la inspección del gráfico se deduce claramente que para producir una sensación de fuerza a bajas frecuencias se necesita una intensidad mayor que a 1.000 Hz. Ésta es la razón por la que es común la sensación de que los sonidos graves decaen más rápidamente que los agudos a medida que aumenta la distancia con la fuente.

La curva inferior representa el umbral de audición para diferentes frecuencias. Se observa que la máxima sensibilidad se encuentra cerca de los 3.000 Hz, punto en el que por el aumento de la depresión de la curva se aprecia que la intensidad necesaria para que el sonido sea audible está por debajo de los $10^{-12} W/m^2$. A esta frecuencia, el oído humano puede captar movimientos del aire de 10^{-8} mm, algo menor que el tamaño de una molécula de hidrógeno.

Notad que para que un tono puro de 100 Hz se haga audible es necesario que la intensidad crezca hasta los $10^{-8} W/m^2$ (40 dB más que el sonido de referencia).

La forma de la curva de umbral de audición está influenciada por las características del canal auditivo y por las propiedades mecánicas de los huesecillos.

Sonoridad subjetiva y nivel de sonoridad

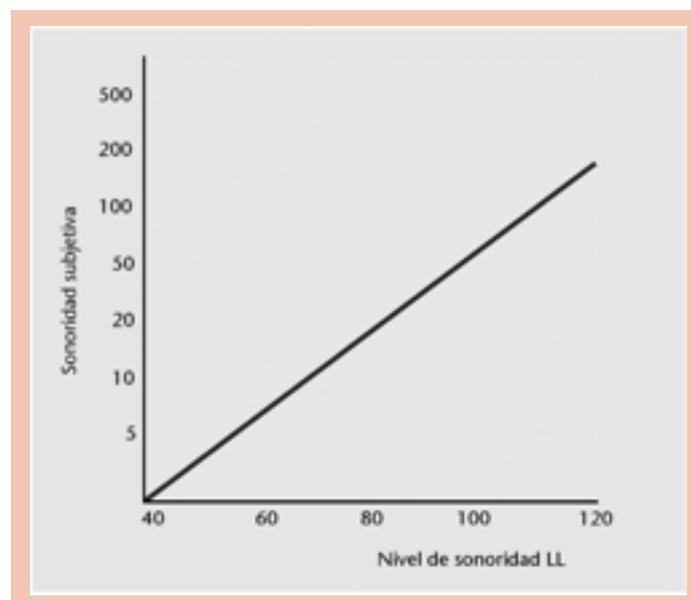
El nivel de sonoridad (LL) de un tono de frecuencia f viene dado por el SPL de un tono de 1.000 Hz que se juzga igualmente fuerte. La unidad de nivel de sonoridad es el fon.

Las curvas gruesas del gráfico de Fletcher y Munson indican niveles de la misma sonoridad para sonidos de frecuencia diferente. Reciben el nombre de isofónicas e indican un **nivel de sonoridad** constante. Se usan para encontrar el nivel de sonoridad de un determinado sonido de SPL y frecuencia conocidos.

Sea, por ejemplo, un sonido de 40 dB SPL a 200 Hz. La línea isofónica que pasa por el punto determinado por la frecuencia y el nivel especificados corta la línea de los 1.000 Hz a 20 dB. El nivel de sonoridad (LL) de un sonido de 40 dB SPL a 200 Hz es de 20 fonos. Los números situados en la línea de 1.000 Hz representan el nivel de intensidad correspondiente a las curvas de sonoridad constante.

Sin embargo, LL continúa siendo una magnitud física más que psicológica. Aunque representa aquellas intensidades de SPL que suenan igualmente fuerte, no da información absoluta acerca de la sensación de sonoridad. Notad que un tono cuyo LL es doblemente mayor no suena simplemente dos veces más fuerte. Es necesario introducir una nueva magnitud para dar cuenta del comportamiento de la sonoridad en términos absolutos.

Se trata de la **sonoridad subjetiva** y se representa por la letra L .



La figura muestra la sonoridad subjetiva L en función del nivel de sonoridad LL . Se trata, como puede verse en la figura, de una relación no lineal. La sonoridad subjetiva se representa de forma logarítmica. La cantidad L se escribe en sones.

Banda crítica y sonoridad subjetiva

La relación entre la sonoridad subjetiva y el nivel de sonoridad es tal que un incremento del nivel de sonoridad (LL) 10 fonos dobla la sonoridad subjetiva (L).

Así, diez instrumentos que tocan una misma nota con el mismo nivel de sonoridad LL se manifiestan en la percepción con una sonoridad de únicamente el doble de un instrumento que toca solo.

La relación entre la sonoridad subjetiva (L) y la intensidad o la variación media de presión Δp se puede describir aproximadamente por la función simple:

$$L = C_1 \times I^{1/3} = C_2 \times (\Delta p)^{2/3}, \quad (4)$$

donde C_1 y C_2 son parámetros que dependen de la frecuencia. Esta relación se representa por la línea fina de la figura.

Con esta nueva ecuación, la relación logarítmica desaparece porque ésta se establece directamente con la intensidad o la variación media de presión. Para variar la sonoridad subjetiva de 1 a 200, la intensidad debe experimentar un cambio de 8 millones.

Al superponer dos o más tonos de la misma frecuencia con fases aleatorias, el tono resultante tiene una intensidad igual a la suma de las intensidades.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

Dado que en este caso no se puede distinguir los tonos individuales unos de otros, la sonoridad subjetiva (L) viene dada mediante la fórmula $L = C_1 \times I^{1/3}$.

$$L = C_1 \times (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)^{1/3}$$

Se aprecia que la sonoridad subjetiva (L) no es igual a la suma de fuerzas de los tonos individuales.

El caso en que las frecuencias de los tonos son diferentes implica la consideración de otros puntos de vista. Hay tres posibilidades.

1. Si las frecuencias de los tonos integrantes están dentro de la banda crítica de la frecuencia central, la sonoridad subjetiva resultante se mantiene directamente relacionada con el flujo total de intensidad y por tanto:

$$L = C_1 \times (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)^{1/3}$$

2. Cuando el campo de frecuencias excede la banda crítica, la sensación de fuerza es mayor que la que se obtiene por la simple suma de las intensidades, se incrementa con la separación de frecuencias y tiende a un valor límite que viene dado por la suma de las fuerzas individuales:

$$L = C_1 (I_1^{1/3} + I_2^{1/3} + I_3^{1/3} + \dots + I_n^{1/3})$$

En este caso, si las fuerzas individuales L_1, L_2, \dots, L_n difieren considerablemente, deben tenerse en cuenta los efectos producidos por el enmascaramiento. El límite de integración de la fuerza nunca se alcanza en la práctica.

3. Por último, cuando la distancia entre la frecuencia de los tonos es grande, la situación se complica. Aparecen problemas para definir lo que significa la sonoridad subjetiva total. En estos casos se tiende a centrar la atención en uno de los componentes (el más fuerte, el más alto, el de timbre más especial, etc.). En general se asocia la sensación total de sonoridad subjetiva a la de un único componente:

$$L = (\text{máximo o más alto}) \text{ de } (L_1, L_2, \dots, L_n)$$

Todo ello arroja datos del más alto interés musical.



Dos flautas iguales tocando ambas una nota con la misma afinación suenan juntas aproximadamente 1,3 veces más fuerte que una sola. Cuando la altura entre las notas difiere de un semitono o un tono, continúan sonando 1,3 veces más fuerte que una sola. Esto se debe a que ambos tonos se encuentran en el interior de la banda crítica.

Cuando los dos tonos se separan una tercera mayor las flautas suenan más fuerte que en el caso anterior.

Este efecto es conocido desde hace cientos de años por los constructores de órganos.

Al no existir posibilidad de control manual de la fuerza de cada nota, como en los instrumentos de cuerda o las maderas, la sonoridad de los órganos podía ser alterada por el número de tubos que sonaban simultáneamente para dar una nota.

No sólo es conocimiento de los constructores de órganos, también lo es de los compositores que escriben para orquesta o de quienes se dedican a la música electrónica.

De acuerdo con lo dicho anteriormente, la suma de fuerzas es más eficaz cuando las frecuencias están muy separadas, de modo que se extienden más allá de la banda crítica de la frecuencia media; una orquesta de cuerda, por ejemplo, suena menos fuerte en el unísono que cuando el acorde cubre varias octavas.



Este efecto es fácilmente verificable con instrumentos electrónicos. Sintetizad una cantidad determinada de tonos puros de igual frecuencia, intensidad y fase y sumadlos. Sintetizad luego el mismo número de tonos puros de frecuencias distantes en torno a una octava e igual frecuencia, y sumadlos. Comparad los resultados. La segunda composición sonará sensiblemente más fuerte.

Inversamente, por más *piano* que toque un grupo de violines, nunca podrá hacerlo tan suavemente como uno solo. Este efecto se puede utilizar para regular el nivel de sonido de una formación orquestal sin necesidad de hacer indicaciones de dinámica.

Mezcla de sonidos y niveles de máscara

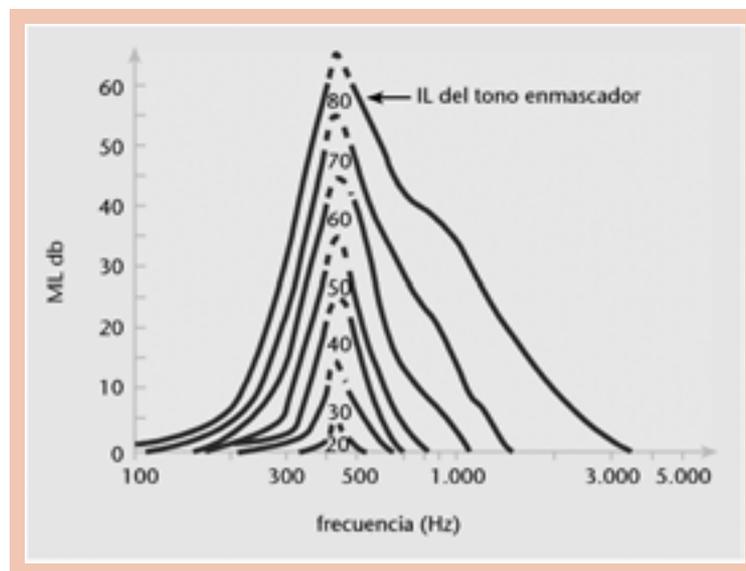
Se discute en este apartado lo que ocurre con el umbral de audición de una nota cuando suena en presencia de otra. Tal vez la experiencia más común y conocida de enmascaramiento sea aquella en la que no es posible seguir una conversación en presencia de un gran ruido de fondo.

Si las frecuencias son iguales, este umbral viene dado por el nivel de máscara (*ML*).

Si sus frecuencias difieren podemos determinar el nivel de enmascaramiento como la mínima intensidad de sonido que el tono enmascarado debe sobrepasar para ser independizado y oído separadamente en presencia de un tono enmascarador.

El umbral de intensidad de tonos puros aislados cambia si otras notas están presentes. En particular, aumenta.

En la siguiente figura se muestra el nivel de enmascaramiento de una nota de frecuencia f en presencia de otro tono puro de características fijas (450 Hz y nivel de intensidad (*IL*)).



Se representa, para varios niveles de intensidad del tono enmascarador, el nivel de máscara (*ML*) al que se debe elevar el tono enmascarado por encima del umbral normal de nivel de intensidad dadas las características del todo enmascarado.

La falta de simetría que se manifiesta a altos niveles de intensidad se debe a la generación de armónicos aurales, siempre de frecuencia mayor que el tono original ($2 \times f$, $3 \times f$, etc.). De ahí se justifica un fenómeno harto comprobado: un tono de

frecuencia dada enmascara más eficientemente los tonos de frecuencia superior que los de frecuencia inferior.



El enmascaramiento juega un papel de gran importancia en la música polifónica y en la orquestación. De la misma forma que unas combinaciones de instrumentos realzan el color del sonido, la introducción de otros en determinados contextos no tiene ningún

sentido, ya que puede que no lleguen a oírse. Esto último sucede en el caso de la adición de líneas melódicas de instrumentos débiles, como el fagot o el oboe en pasajes en los que suenan los metales con gran intensidad.

Sonoridad relativa de tonos puros de corta duración

Ahora consideraremos el efecto de la duración de una nota en la sensación de sonoridad.

Existe una duración mínima que un sonido puro dado debe tener para producir una sensación de tono. Es del orden de 10 a 15 ms, lo que equivale a dos o tres ciclos si la frecuencia está por debajo de los 50 Hz.

Los tonos de menor duración se perciben como clics y no tienen altura.

Los sonidos que duran más de 15 ms pueden ser percibidos como tonos con una cierta altura y una cierta sonoridad.

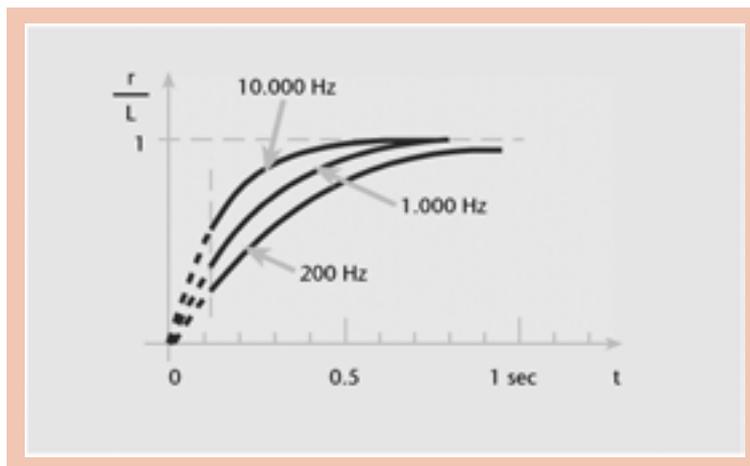
La sonoridad subjetiva depende de la duración del tono, pero no de la altura. Si la intensidad del tono se mantiene constante, cuanto más corto es el sonido, más flojo suena.

Cuando la duración del tono supera el medio segundo, la fuerza del tono alcanza un valor máximo que es independiente de la duración.



Todo lo anterior se puede comprobar con la ayuda de una aplicación de edición como Sound Forge: sintetizar un tono puro de unos 500 hercios a una amplitud que no resulte cansada de escuchar y de una duración de algunos segundos. Con la ayuda

de las herramientas de edición, cortar el tono en fragmentos de longitud decreciente hasta que su duración sea menor que 10 ms. Verificar las afirmaciones anteriores al respecto de la influencia de la duración en la percepción de la sonoridad.



La figura muestra la variación de la sonoridad relativa en función de la duración para tonos puros de diferentes frecuencias. Más específicamente, en abscisas se representa el tiempo y en ordenadas, la relación entre la sonoridad subjetiva evocada en la medición con la sonoridad subjetiva correspondiente a tonos largos estáticos de igual frecuencia y amplitud.

Notad que el valor final de respuesta es alcanzado antes por las frecuencias más altas. Todas estas consideraciones tienen implicaciones importantes para la música. Al tocar un pasaje *staccato* al piano con una cierta fuerza, *forte*, por ejemplo, es necesario pulsar las teclas más fuerte que si se desea interpretarlo *legato* al mismo nivel de sonoridad.

Este efecto se hace mucho más evidente con los sonidos que no decaen, tales como los instrumentos de viento o de cuerda frotada, pero más claramente incluso con los instrumentos electrónicos virtuales del ordenador. Así pues, es posible controlar la sonoridad subjetiva de una nota de corta duración, especialmente en el interior de un fraseo asignándole la justa duración.

Para notas cortas, el efecto de enmascaramiento, también está relacionado con la duración de los tonos. En general, para tonos que duran menos de medio segundo, el umbral de máscara aumenta a medida que la duración decrece.

Parece ser que para sonidos de corta duración, la sensación de sonoridad no está relacionada con el flujo de energía, sino con la energía acústica total librada al tímpano. Hay indicaciones de que está relacionada con el número total de impulsos neuronales transmitidos en asociación con el sonido.

Mecanismo de percepción de la sonoridad

En este punto cabe preguntarse sobre qué proceso físico o neuronal origina la diferencia entre las escalas subjetivas de sonoridad y el gran rango de intensidades del sonido original al que el oído presenta sensibilidad.

En el caso de la percepción primaria de altura, se encontró una cierta compresión de forma que al rango audible de frecuencias, de 20 a 16.000 hercios, le corresponde una extensión de nueve octavas. En este caso, la compresión se debe a las propiedades mecánicas de la división en zonas resonantes de la membrana basilar. Existe una clara relación logarítmica entre la posición de resonancia máxima de la membrana basilar y la frecuencia.

En el caso de la sonoridad, el origen de la compresión es en parte neuronal y en parte mecánico. Cuando se presenta un sonido puro al oído, las neuronas primarias conectadas a las células ciliadas localizadas en el centro de la región de máxima amplitud de resonancia incrementan su frecuencia de disparo por encima del nivel espontáneo.

Si bien dicho incremento es una función monótona creciente de la amplitud del estímulo, no es totalmente lineal. En efecto, cuando el estímulo se incrementa en un factor de 100, la frecuencia de disparo sólo aumenta en un factor de 3 ó 4. Por otra parte, a alto *SPL*, la frecuencia de disparo de una neurona primaria se satura a un nivel únicamente algunas veces mayor que al nivel espontáneo de disparo. Ningún incremento en intensidad altera profundamente la frecuencia de disparo máximo, porque las neuronas no pueden transmitir pulsos a una frecuencia mayor que el valor de saturación, que a su vez viene determinado por el periodo refractario que se inicia después de cada disparo.

Cuando el *SPL* sobrepasa el límite de saturación medio de la velocidad de disparo de la neurona, cuanto más intensa es la onda de sonido, más extensa es la zona de membrana basilar que queda afectada. De ahí que el número total de neuronas primarias cuyos umbrales son sobrepasados por el estímulo sea mayor en este caso.

Un incremento en la intensidad lleva a un incremento en el número total de impulsos transmitidos, ya sea por la frecuencia de disparo de cada neurona, ya por el número total de neuronas activadas.

Puesto que este último efecto depende de la forma de la distribución de la amplitud de oscilación de la membrana basilar, se trata de una propiedad puramente mecánica.

De lo anterior se deriva que la sensación de sonoridad debe estar relacionada de alguna manera con la frecuencia total de impulsos nerviosos disparados en el sistema auditivo periférico. A medida que la información neuronal se transmite a los centros más altos del sistema nervioso relacionados con la audición para ser procesada, la frecuencia total de disparo decrece. Las frecuencias de disparo de las neuronas corticales activadas por estímulos acústicos se encuentran entre los 50 Hz y los 100 Hz.

La relación entre la sonoridad subjetiva y la frecuencia total de disparo explica de forma cualitativa la mayor parte de las propiedades de la adición de sonoridades.

Para tonos simultáneos de frecuencias que se extienden más allá de la banda crítica, la cantidad total de impulsos transmitidos es igual a la suma de los impulsos emitidos por cada componente de manera separada. De ahí que la fuerza total tienda a igualar la suma de sonoridades individuales.

Por el contrario, para las sumas de aquellos tonos cuyas frecuencias se hallan en el interior de la banda crítica, con regiones de resonancia que se solapan sustancialmente, el número total de pulsos se controla por la suma de las intensidades de los estímulos originales.

Sin embargo, existe otro dispositivo codificador de la sonoridad. Se sabe que sonidos menos intensos que contactan las líneas internas excitan a las fibras nerviosas que inervan las líneas externas de las células ciliares.

Como en el caso de la codificación primaria de la frecuencia, se tiene así un componente de codificación en forma de distribución espacial de la actividad neuronal, pero la dependencia de la duración del tono que manifiestan la sensación de sonoridad y los umbrales de enmascaramiento apunta a la existencia en el sistema nervioso de un dispositivo de procesamiento de señales acústicas dependiente del tiempo.

Etapa 4: Aproximación musical a la percepción del timbre

El timbre es una sensación difícil de definir.

Normalmente se dice del timbre que es aquella característica de la sensación auditiva por la que es posible juzgar si dos sonidos son o no diferentes cuando se presentan al oído en condiciones similares de altura y sonoridad.

A menudo se relaciona el timbre con el espectro del estímulo o con su forma de onda, pero todos los parámetros físicos del sonido afectan a esa capacidad de diferenciar a la que aluden casi todas las definiciones de timbre.

El timbre es la calidad de la percepción del sonido. Es el sonido mismo, si por sonido se entiende el fenómeno que se experimenta y no la señal física que lo genera. Es el objeto sonoro.

Algunos detalles de interés sonoro acerca del teorema de Fourier

Desde los estudios de Von Helmholtz, se sabe que la percepción de la parte estable de los sonidos está profundamente determinada por el patrón de vibración de la variación de presión.

El teorema de Fourier es una herramienta que sirve para analizar la forma de onda, pero requiere que la forma de onda en cuestión se mantenga indefinidamente a lo largo del tiempo.

Los sonidos naturales empiezan y terminan y en su mayor parte nunca se estabilizan. Esto significa que los aspectos variables del sonido quedan fuera del campo estricto de aplicación de esta herramienta.

Fourier mostró que un fenómeno periódico cualquiera se podía descomponer en una suma de sinusoides elementales cuyas frecuencias respectivas son múltiplos enteros del componente más grave.

El componente más grave se llama fundamental y los demás, armónicos.

Si la frecuencia de la fundamental es f_0 , los armónicos tienen frecuencias

$$f_1 = 2 \times f_0$$

$$f_2 = 3 \times f_0$$

$$f_3 = 4 \times f_0$$

...

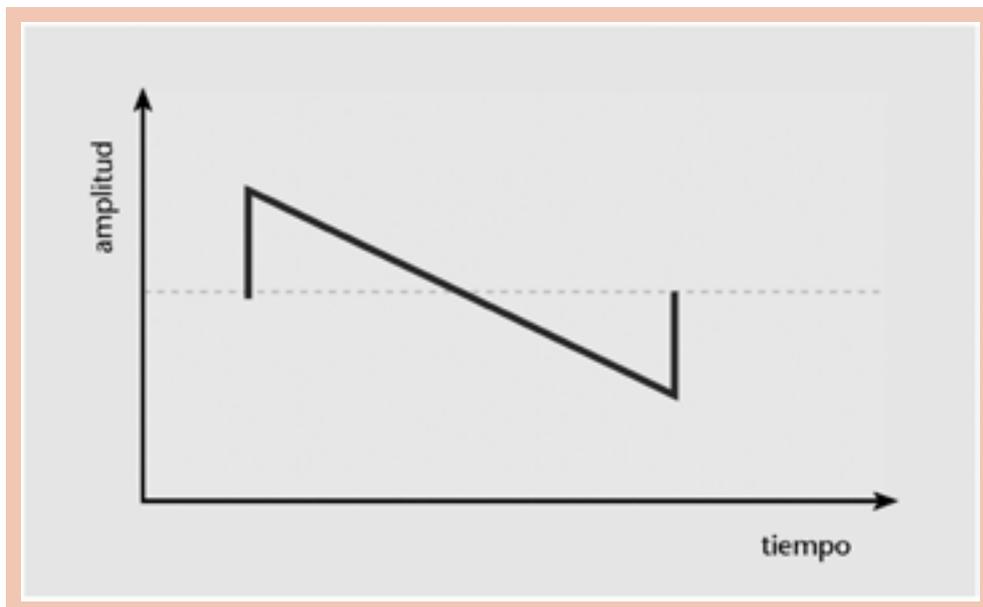
$$f_i = (i + 1) \times f_0$$

...

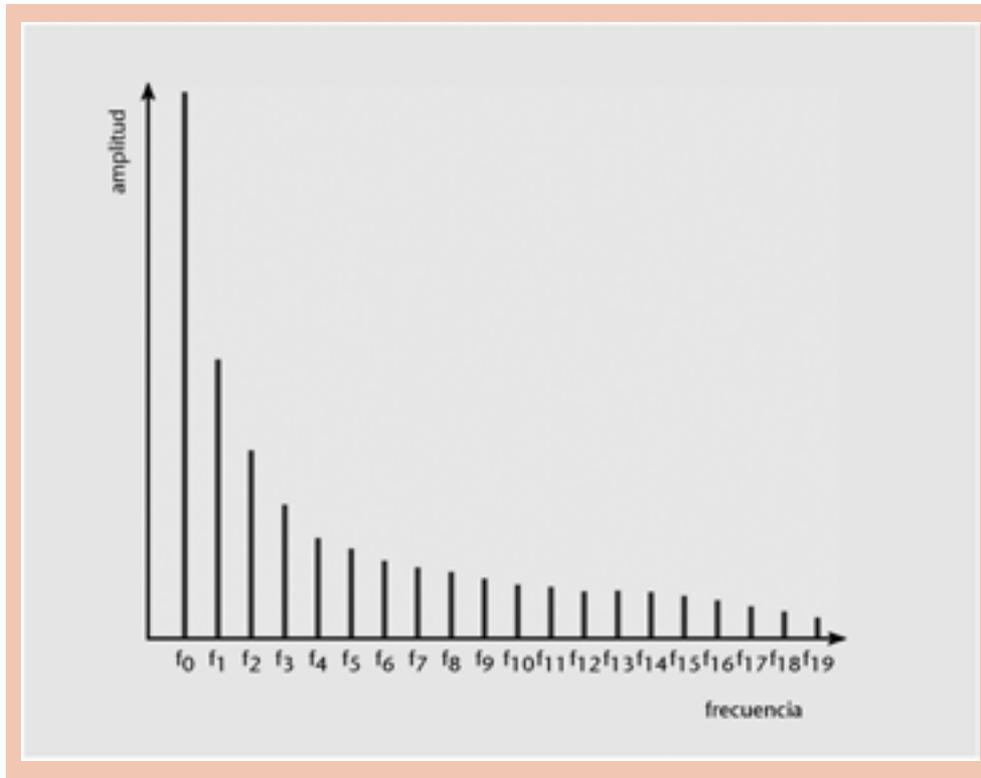
...

Así, dado un determinado patrón de vibración de un tono complejo, de forma compleja, no sinusoidal, existe un conjunto infinito de tonos sinusoidales cuya suma es equivalente.

Por ejemplo, una oscilación periódica de presión de la forma:

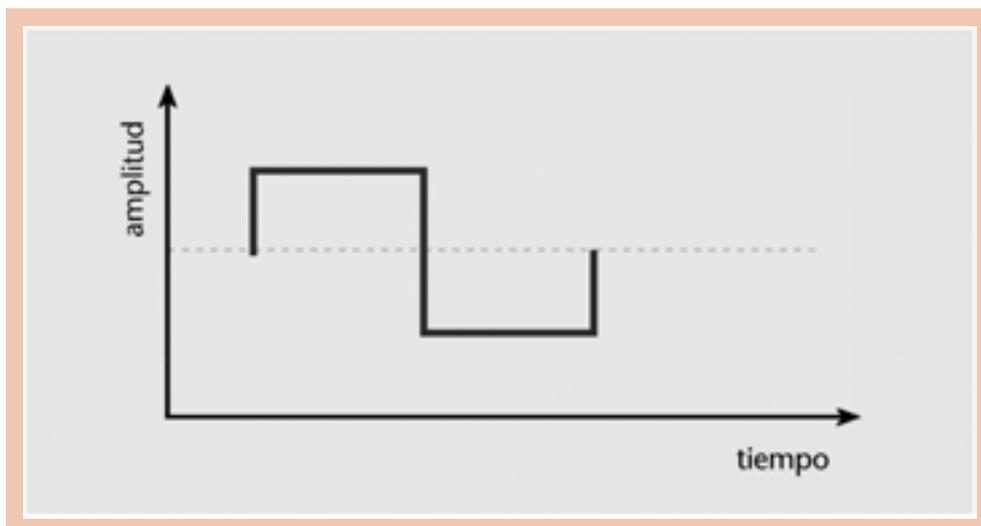


Recibe el nombre de **diente de sierra** (en inglés, *saw-tooth*), y se corresponde con una suma de infinitos armónicos cuya amplitud decrece de forma inversamente proporcional al número de armónicos.

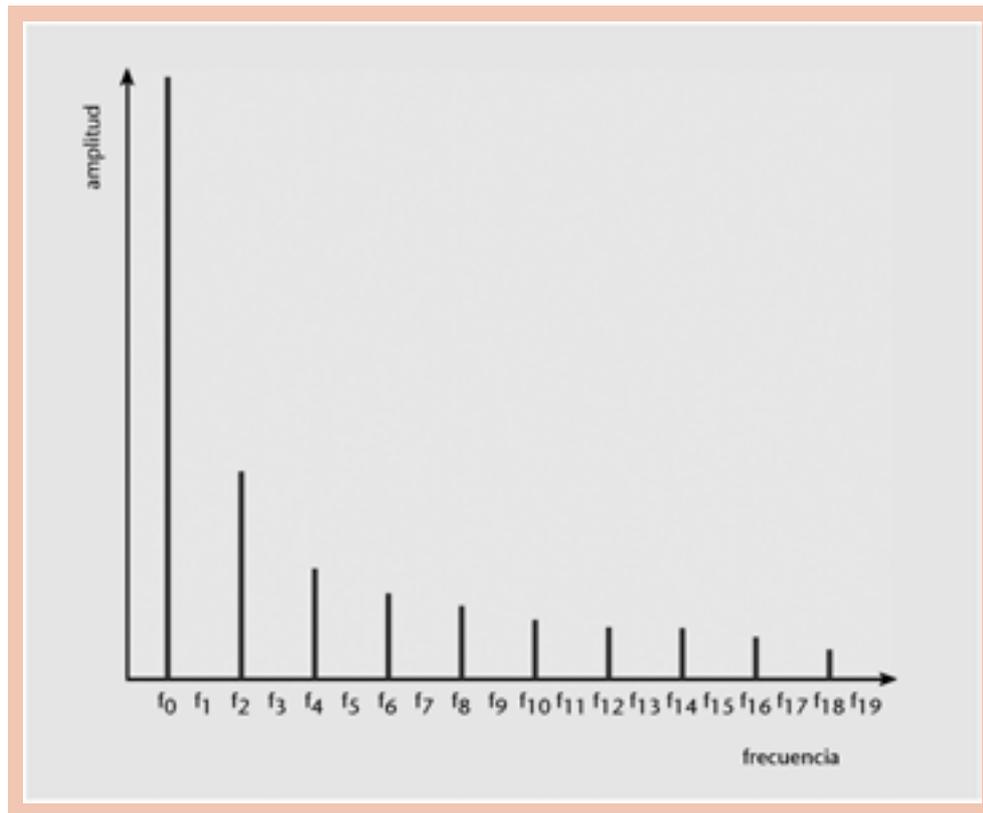


En la figura se representan los diecinueve primeros armónicos de una forma de onda en diente de sierra.

Una variación de presión de la forma:

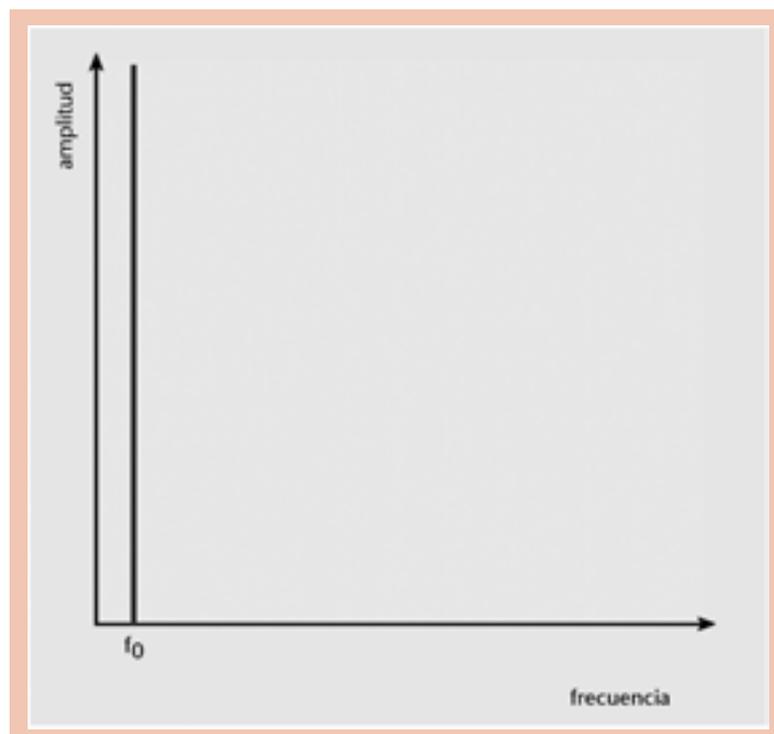


Recibe el nombre de **cuadrada** y es equivalente a una suma infinita de armónicos de rango impar cuyas amplitudes decrecen inversamente al número de armónico.



En la figura se muestran los diecinueve primeros armónicos correspondientes a una onda cuadrada. Notad que f_1, f_3, f_5 , etc. se consideran pares: $f_1 = 2 \times f_0$, $f_3 = 4 \times f_0$, $f_5 = 6 \times f_0$, etc., y que su amplitud es cero.

Una forma senoide tiene como espectro una única línea que representa la amplitud de su único componente; la amplitud de los restantes infinitos armónicos es 0.

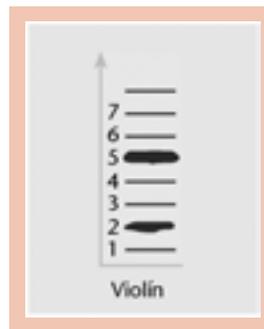


Sound Forge permite la generación de sonidos de estas características. La función *Simple Synthesis* permite seleccionar entre forma de onda senoide, cuadrada, triangular y diente de sierra.

Sintetizar sonidos con diferentes formas de onda y experimentar las sensaciones tímbricas generadas.

Con la ayuda de la función *Spectrum Analysis* se puede verificar lo anterior.

Cuando un violinista mantiene una nota con la mínima variación posible, la forma de onda generada por la cuerda es muy próxima a un diente de sierra. La caja hace resonar unos armónicos y atenúa otros. Es lo que se representa en el siguiente gráfico, cuyo nombre genérico es **sonograma**.



En abscisas se representa el tiempo; en ordenadas, el número de armónico.

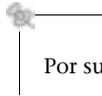
El grosor del trazo representa la amplitud del parcial correspondiente.

La forma de onda de un sonido largo de clarinete se aproxima a la forma de onda cuadrada. Por ello, el espectro tal como se representa en el sonograma tiene los armónicos impares a nivel muy bajo.



La forma de onda de un piano es más compleja y su espectro viene dado por el siguiente sonograma:

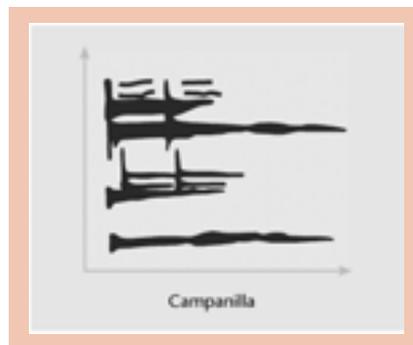




Por su parte, la flauta es el instrumento tradicional de espectro más simple.



Una campana presenta componentes cuyas frecuencias no guardan ninguna relación entera. El sonido de campana forma parte de una categoría de sonidos llamados inarmónicos.

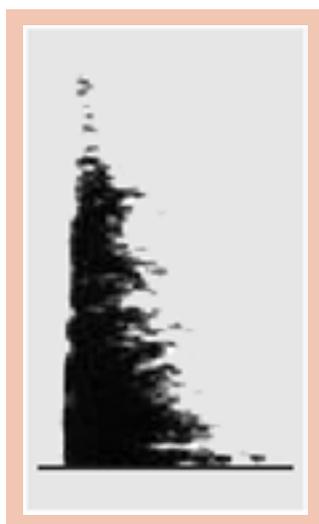
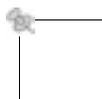


Un golpe sobre una madera tiene un espectro en el que se pueden apreciar casi todas las frecuencias. En el sonograma se aprecia que en la atenuación tienden a quedar unos componentes resonando, mientras que en otros se amortiguan antes.



Si el golpe se da sobre una plancha de metal, la atenuación resulta más larga y se pueden apreciar mejor los parciales que quedan resonando.





Sonograma de un golpe en el que quedan resonando componentes graves.



Sonograma de un golpe en el que quedan resonando las frecuencias medias.



Sonograma de un sopro con componentes agudos.

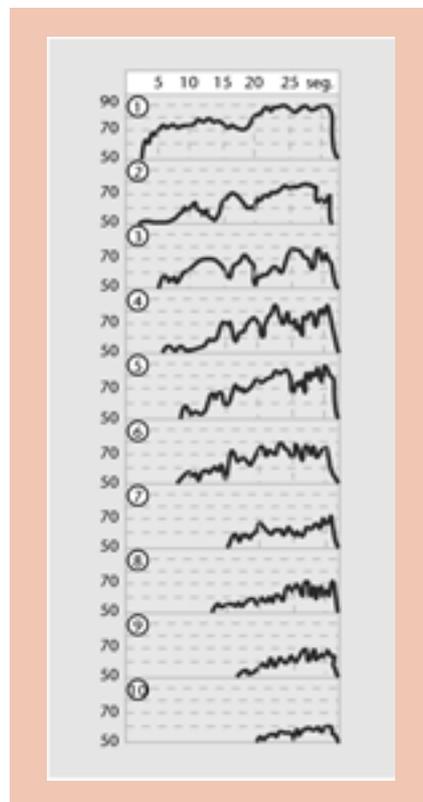


Sonograma de un sopro con componentes graves.

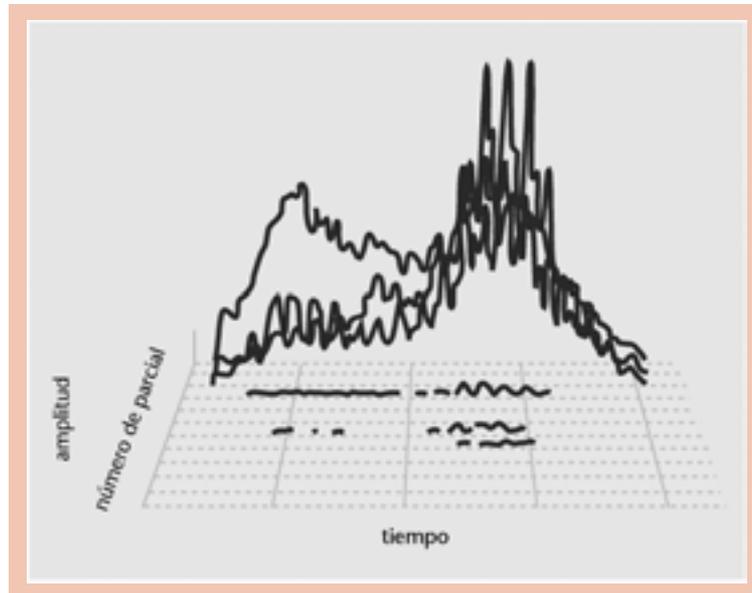
Hacia una definición multidimensional de timbre

De la inspección de los sonogramas anteriores se deduce que la amplitud de los parciales varía en función del tiempo.

Está claro entonces que el espectro no se mantiene estable en esas condiciones.

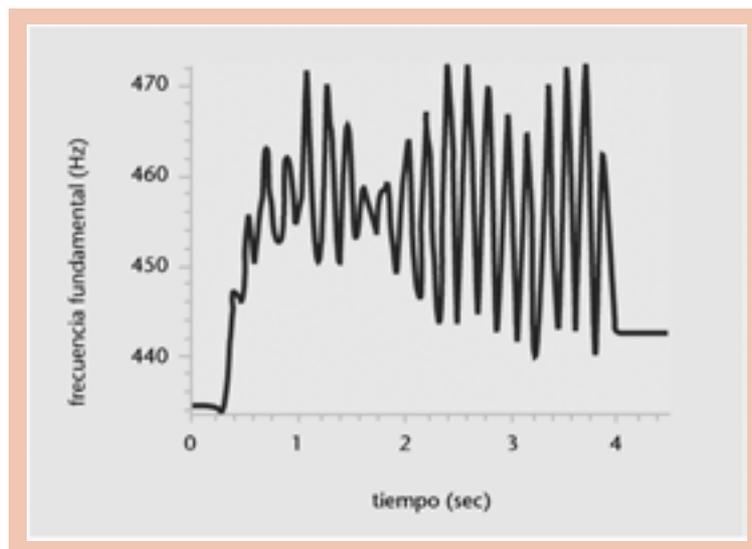


La figura muestra el comportamiento de amplitud en función del tiempo de los diez primeros armónicos de un sonido de clarinete de 25 segundos de duración. Se puede imaginar la enorme variabilidad espectral que supone un comportamiento dinámico como éste.



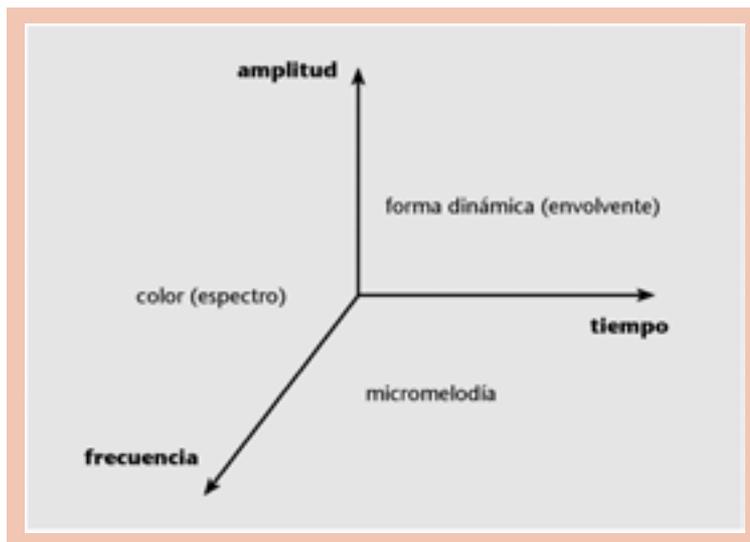
En realidad, el espectro de los sonidos es totalmente variable en el tiempo. Tomando instantáneas del espectro de un sonido desde el principio hasta que termina, se pueden conseguir gráficos como el de la figura.

Para complicar las cosas con respecto a las características que influyen en la percepción del sonido, resulta que la frecuencia de los parciales que componen un sonido complejo tampoco es estable.



La figura muestra el comportamiento de la frecuencia de la fundamental de un sonido de clarinete durante los cuatro primeros segundos.

Éstas y otras características que no se tienen en cuenta por motivos de extensión contribuyen en la sensación de timbre.



La figura muestra diferentes planos en los que pueden ocurrir cambios capaces de evocar sensaciones tímbricas. Se trata, en conjunto, de un espacio de tres dimensiones que constituye una primera aproximación a la idea de multidimensionalidad del timbre y, por tanto, del objeto sonoro, ya que, como se ha visto anteriormente, se trata de conceptos equivalentes.

En el plano correspondiente al **color** tienen lugar las proyecciones espectrales – amplitud frente a frecuencia–, cuya importancia ha sido discutida al principio de este apartado.

El plano de la **forma dinámica** recoge las proyecciones correspondientes a las variaciones que cada componente del sonido presenta en función del tiempo. Es evidente que en el reconocimiento de un determinado sonido tiene que ver su comportamiento dinámico habitual. Un clarinete no es un clarinete si no empieza o termina como un clarinete. Es otra cosa.



Comprobadlo de la siguiente forma: grabad de un disco el sonido de un instrumento de viento, como por ejemplo un saxofón. Con la ayuda del editor de sonidos, quitadle el principio y el final. Escuchad el resultado: ya no se trata de un saxofón.

El plano de la **micromelodía** da cuenta de las variaciones de frecuencia que cada uno de los parciales experimenta en función del tiempo. La importancia tímbrica de los límites de frecuencia asociados a los sonidos se comprueba fácilmente. Tomad un sonido de elefante de un disco de efectos de sonido. Aumentad la frecuencia en algo más de una octava. El elefante debe haber desaparecido.

