

Psicoacústica

En este capítulo se describen los conceptos y fenómenos relacionados con la percepción del sonido. Para ello, se estudiarán y discutirán en forma cualitativa los resultados de numerosos experimentos psicoacústicos que aparecen en la literatura, y se justificarán (siempre que sea posible) en términos de la estructura y fisiología del aparato auditivo.

No todos los fenómenos perceptuales auditivos están relacionados directamente con un fenómeno físico sino que reflejan un conjunto muy complejo de relaciones que, para poder ser descritos, requieren de calificativos subjetivos de difícil repetibilidad entre observadores. Esto se puede observar en la figura IV.1.

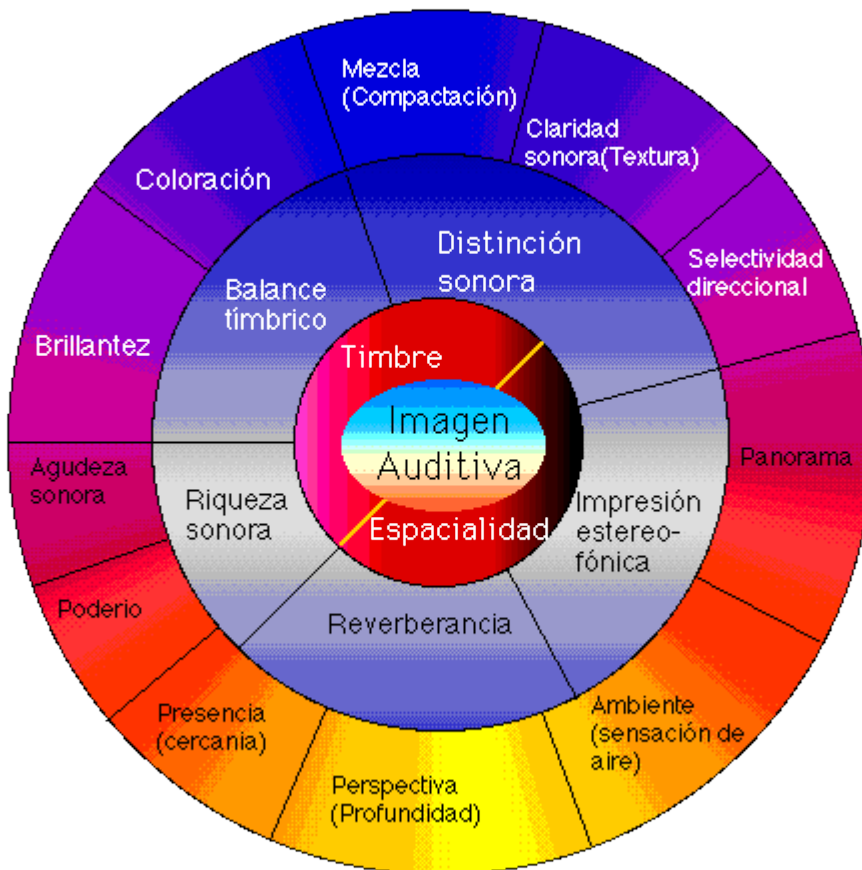


Fig. IV.1. Terminología utilizada en percepción auditiva

IV.1. Rango dinámico y respuesta en frecuencia del oído

IV.1.1. Área de audición

El ser humano es capaz de detectar únicamente aquellos sonidos que se encuentren dentro de un determinado rango de amplitudes y frecuencias. En este sentido, se puede establecer una analogía entre el aparato auditivo y un sistema electrónico de audio: en base al concepto convencional del **rango dinámico** [1].

Se define el rango dinámico del oído como la relación entre la **máxima potencia sonora que éste puede manejar y la mínima potencia necesaria para detectar un sonido**. Asimismo, el rango de frecuencias asignado convencionalmente al sistema auditivo va desde los **20 Hz hasta los 20 kHz**, aun cuando este rango puede variar de un sujeto a otro o disminuir en función de la edad del sujeto, de trastornos auditivos o de una pérdida de sensibilidad (temporal o permanente) debida a la exposición a sonidos de elevada intensidad [2].

Ahora bien, la sensibilidad del sistema auditivo no es independiente de la frecuencia; por el contrario, dos sonidos de igual presión sonora pueden provocar distintas sensaciones de intensidad o "sonoridad", dependiendo de su contenido espectral [3].

Estos tres parámetros del oído (**rango dinámico, respuesta en frecuencia y sensibilidad en función de la frecuencia**) se resumen en la siguiente figura, que ilustra el área de audición [2].

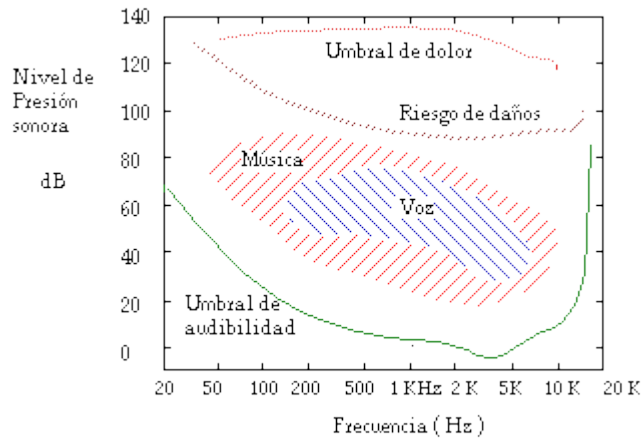


Fig. IV.2. Área de audición.

El extremo superior del rango dinámico está dado por el **umbral de dolor**, el cual define las presiones sonoras máximas que puede soportar el oído. Más abajo de este nivel, se encuentra el **límite de riesgo de daños**, el cual representa un umbral de presión sonora que no debe sobrepasarse por más de un cierto período de tiempo (ocho horas diarias por día laboral), o de lo contrario puede producirse un pérdida de sensibilidad permanente.

El extremo inferior, denominado **umbral de audibilidad (UA)**, representa la sensibilidad del aparato auditivo, es decir, el valor mínimo de presión sonora que debe tener un tono para que éste sea apenas perceptible. De la Fig. IV.2 resulta obvio que esta sensibilidad depende de la frecuencia de la señal sonora; a modo de ejemplo, un tono de 1 kHz y 20 dB SPL será audible (está por encima de la curva), mientras que un tono de 50 Hz e igual nivel será inaudible (está por debajo de la curva).

Como se ve en la Fig. IV.2, el aparato auditivo es capaz de operar sobre un rango de presiones sonoras muy amplio (unos 150 dB). Las presiones sonoras correspondientes al mínimo del umbral de audibilidad (A 0 dB SPL) equivalen a desplazamientos de la membrana basilar inferiores a 10^{-10} m, **distancia comparable al diámetro de un átomo** [4]. Tan extraordinaria sensibilidad se debe a los mecanismos activos y no lineales descritos en la sección III.6.3; es decir, a la acción combinada de varias células ciliares externas sobre cada célula interna [2].

IV.1.2. Umbral de audibilidad

La sensibilidad del aparato auditivo puede variar considerablemente de un sujeto a otro; además, como se verá más adelante, puede cambiar según las condiciones de propagación del sonido. Por esta razón, resulta conveniente definir un **umbral de audibilidad promedio**, también llamado **mínimo campo audible promedio**; éste se representa mediante una curva que indica la presión sonora de un tono puro de larga duración (> 200 ms), el cual se propaga en condiciones de campo libre y en ausencia de cualquier otro sonido, y que puede ser detectado por el 50% de una población de sujetos jóvenes (entre 18 y 25 años) y audiológicamente normales [3] [5].

Los valores medios del umbral de audibilidad han sido objeto de un proceso de estandarización, descrito en un documento de la ISO [25].

Dado que el UA así definido representa un promedio, algunos sujetos serán capaces de percibir tonos que se encuentren por debajo de esta curva, como se ve en la Fig. IV.3. Stuart [5] indica que algunos individuos jóvenes pueden detectar tonos que se encuentran 20 dB por debajo del UA promedio. Asimismo, si bien la curva del UA promedio es razonablemente "suave", mediciones cuidadosas revelan que en cada sujeto dicha curva de sensibilidad puede presentar fluctuaciones del orden de 10 dB en intervalos de frecuencia pequeños (de menos de 100 Hz).

Por lo tanto, es preciso tener en mente que el umbral de audibilidad promedio no representa un límite absoluto, sino una medida estadística asociada con la probabilidad de detección de un tono de determinada frecuencia y amplitud y que, por ende, debe ser empleado con cautela; por ejemplo, si el UA promedio se utiliza en un sistema que evalúa la calidad del sonido sometido a algún proceso de codificación, puede proporcionar resultados optimistas e inducir a errores [6].

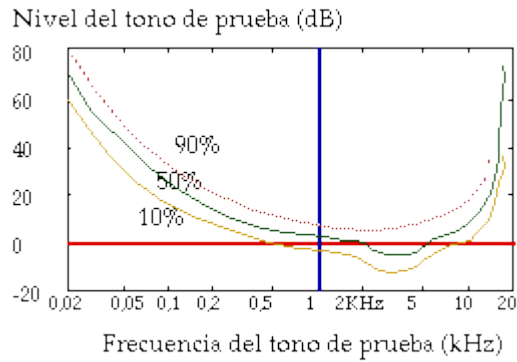


Fig. IV.3. Umbral de audibilidad para el 10%, 50% (umbral promedio) y 90% de una población.

La sensibilidad del sistema auditivo humano disminuye con la edad, especialmente en las altas frecuencias, debido al deterioro de las células ciliares del órgano de Corti; esto se refleja en el aumento del UA que se observa en la Fig. IV.4.

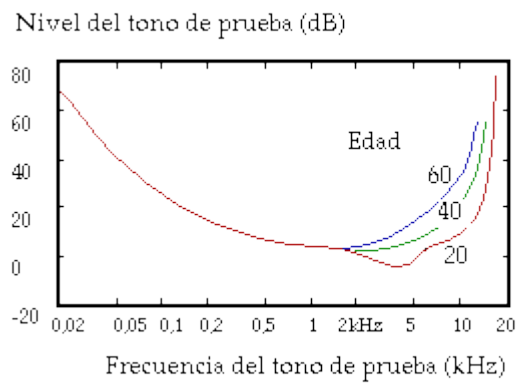


Fig. IV.4. Umbral de audibilidad según la edad de los sujetos.

El umbral de audibilidad no sólo es función del sujeto y de los parámetros ya mencionados, sino que además presenta una dependencia con respecto al modo de propagación de las ondas sonoras.

La curva del UA promedio antes definida corresponde a sonidos que se propagan en forma de ondas viajeras planas, y que inciden frontalmente sobre la membrana timpánica (condición de "campo libre").

Ahora bien, el modo de propagación de "campo libre" sólo es posible en ambientes anecoicos o utilizando audífonos cuya respuesta en frecuencia haya sido adecuadamente corregida [2]; sin embargo, en situaciones cotidianas (ambientes reverberantes; aplicación directa del sonido, sin audífonos) las características en frecuencia del lugar en el cual se encuentre el sujeto, por una parte, y la difracción provocada por la cabeza y el pabellón auricular (ver sección III.2.2), por otra, hacen que la propagación del sonido se asemeje a la condición de "campo difuso", en la cual el sonido incide desde todas las direcciones posibles. En esta condición, la sensibilidad del oído varía notablemente, como se observa en la Fig. IV.5.

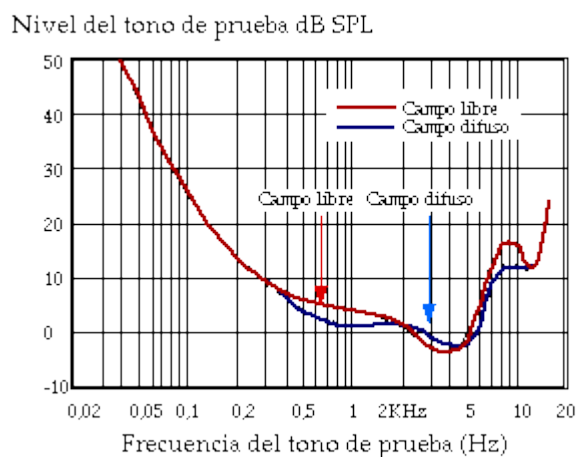


Fig. IV.5. Umbral de audibilidad en condiciones de campo libre y difuso.

IV.2 Excitación y nivel de excitación

Como se vio en la sección III.5, el comportamiento de la **membrana basilar** frente a los estímulos sonoros puede resumirse en tres propiedades: **existencia de ondas viajeras**, **dispersión de las componentes de distinta frecuencia a lo largo de la membrana** y **comportamiento pasabajos** (considerando la totalidad de la membrana).

Ahora bien, supóngase que se estimula a la membrana basilar con un tono puro, de nivel X dB SPL.

Debido a las propiedades antes descritas de la membrana basilar, la propagación del tono será tal que se producirá una **onda viajera**, cuya envolvente se muestra en la Fig. IV.6.

La amplitud máxima de la envolvente depende de la intensidad del estímulo. Por otro lado, debido a la naturaleza del mecanismo de transducción de la señal sonora (ver sección II.6), dicha envolvente está asociada directamente con la **actividad neural en el órgano de Corti**, puesto que la tasa de generación de impulsos nerviosos depende de la amplitud de la señal.

Así pues, se puede establecer una equivalencia directa entre la **intensidad de la señal**, la **envolvente de la onda viajera** y el **grado de estimulación o excitación de los receptores auditivos** (esto es, las células ciliares internas) y sus terminaciones nerviosas asociadas.

Por esto, se define el patrón de excitación como la curva que representa, en función de la frecuencia³, la magnitud de la actividad neural (o, lo que es equivalente, la envolvente de la onda viajera) expresada en unidades de intensidad sonora. De esta manera, es posible interpretar el patrón de excitación como una curva que resume las transformaciones de que es objeto la señal sonora en el oído interno.

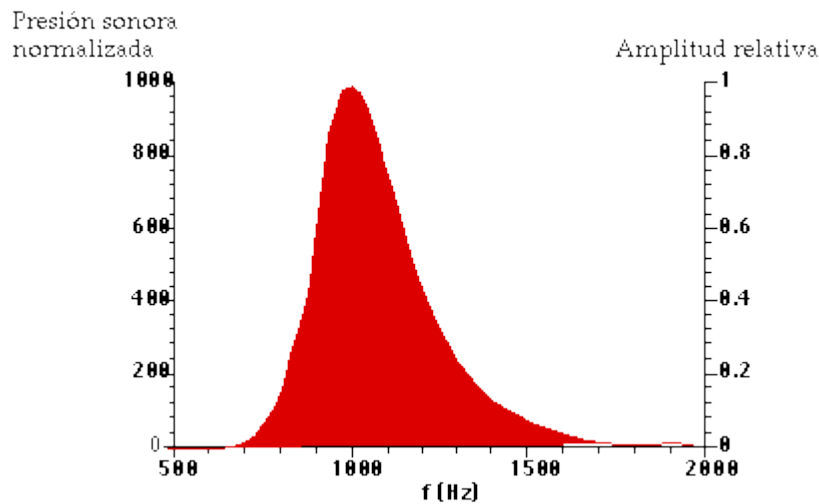


Fig. IV.6. Envolvente de la onda viajera provocada por un tono puro.

La Fig. IV.7 muestra el patrón de excitación correspondiente a un tono de 1 kHz y 60 dB SPL. El valor del patrón de excitación en cualquier punto de la curva, expresado en dB SPL, se denomina nivel de excitación; por definición, el **nivel de excitación máximo** en la curva corresponde al **nivel de presión sonora** del tono [2].

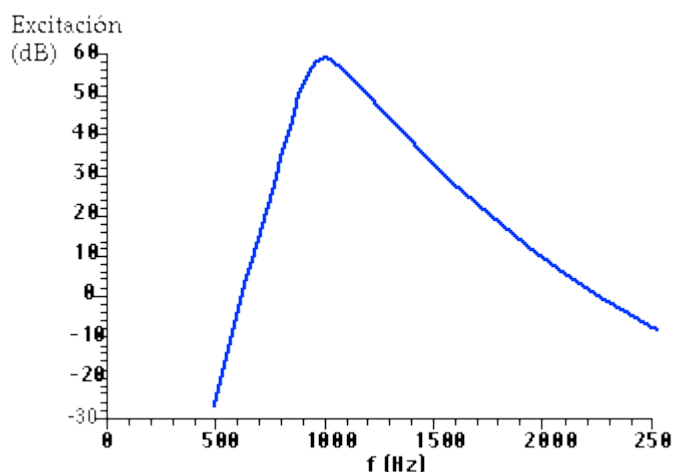


Fig. IV.7. Patrón de excitación producido por un tono.

A pesar de que, obviamente, no es posible determinar directamente el patrón de excitación mediante experimentos psicoacústicos, éste puede inferirse indirectamente a partir de resultados de experimentos fisiológicos y de su relación con diversos fenómenos perceptuales, tales como el **enmascaramiento** y la **sonoridad** [5] [2].

IV.3 Enmascaramiento sonoro

IV.3.1 Definición

El enmascaramiento sonoro puede definirse como el proceso en el cual el umbral de audibilidad correspondiente a un sonido se eleva, debido a la presencia de otro sonido [5]. Para ilustrar mejor este fenómeno, imagínese el siguiente experimento:

Un sujeto audiológicamente normal se introduce en un ambiente anecoico y con bajo nivel de ruido acústico de fondo, y se le hace escuchar una **señal sonora A** (p. ej., un tono puro) que sea perfectamente audible, es decir, cuyo nivel de presión sonora esté muy por encima del umbral de audibilidad del sujeto a la frecuencia del tono. Se le pide al sujeto que juzgue (**subjetivamente**) la intensidad del tono de prueba A. Luego, se añade una **señal sonora B** (p. ej., una banda de ruido centrada en la frecuencia del tono) de bajo nivel SPL, y se va aumentando progresivamente el nivel de B, manteniendo constante el nivel de A. El sujeto notará que, a medida que aumenta el nivel de la señal B, la intensidad aparente o subjetiva de A disminuye hasta que, eventualmente, **A se hace inaudible**. En este caso se dice que **la señal A está totalmente enmascarada por la señal B**.

Se cree que el enmascaramiento sonoro tiene su origen en los **receptores auditivos situados en la membrana basilar** [7]. Los receptores que se encuentran estimulados por una señal A deben recibir un nuevo nivel de estimulación o excitación debida a otra señal B, tal que la diferencia entre la excitación debida a A y B juntas supere a la debida a A en una determinada magnitud: si esto ocurre, el sonido B será percibido; en caso contrario, B será inaudible.

De esta forma, cada componente en frecuencia de cada señal sonora ocasiona un nivel de actividad neural (excitación) en diversas zonas de la membrana basilar, lo que altera la detectabilidad de otras componentes [5]; de ahí la **relación entre excitación y enmascaramiento**.

Como se verá posteriormente, el enmascaramiento depende del nivel de presión sonora de las señales "**enmascarante**" y "**enmascarada**", así como de la separación en frecuencia y en tiempo entre las mismas.

En las siguientes secciones se discutirán diversas características del fenómeno de enmascaramiento sonoro. Por simplicidad, los ejemplos presentados se refieren únicamente al caso más sencillo de enmascaramiento, en el cual se tiene una sola señal enmascarante (la cual será siempre una banda de ruido) y una sola señal de prueba o enmascarada (la cual será siempre un tono puro).

Más adelante se estudiará el caso más complejo, en el cual se tiene un número indeterminado de bandas de ruido y tonos que pueden enmascararse entre sí, lo cual equivale a tener dos señales de espectro arbitrario (p. ej., una señal musical y el ruido de codificación asociado a ella) como señales enmascarante y enmascarada. Asimismo, a menos que se indique lo contrario, se ignorará el efecto que tienen el oído externo y el oído medio sobre el espectro de la señal (puede suponerse que el espectro de las señales utilizadas se corrige con la inversa de la función de transferencia del oído externo y medio).

IV.3.2 Umbral de enmascaramiento y nivel de sensación

Para medir cuantitativamente la magnitud del enmascaramiento, así como para distinguir entre el **umbral de audibilidad** en condiciones de "**silencio**" (es decir, en ausencia de otra señal distinta a la señal de prueba) y el UA en condiciones de enmascaramiento, se define el **umbral de enmascaramiento (UE)** como "**el nivel de presión sonora de un sonido de prueba necesario para que éste sea apenas audible en presencia de una señal enmascarante**" [2].

De la definición anterior resulta obvio que los **umbrales de audibilidad y de enmascaramiento deben ser idénticos en ausencia de señales enmascarantes**.

Si se representa en forma gráfica el valor del **UE** en función de la frecuencia (u otra variable análoga), se obtiene una curva denominada **patrón de enmascaramiento**. Como se verá, debido a la estrecha relación entre la excitación y el enmascaramiento, los patrones respectivos asociados a una misma señal son muy similares en su forma (no así en sus valores).

Adicionalmente, se define el nivel de sensación (**NS**) de una señal de prueba como la **diferencia, en dB SL, entre el umbral de enmascaramiento y el umbral de audibilidad** correspondientes a dicha señal y expresados en dB SPL:

$$NS_{dB_{SL}} = UE_{dB_{SPL}} - UA_{dB_{SPL}} \quad (4.1)$$

La unidad "dB SL", aplicada a cualquier parámetro relacionado con estímulos sonoros, se utiliza para recalcar el hecho de que es una medida relativa al umbral de audibilidad.

IV.3.3 Enmascaramiento simultáneo

Dependiendo de la ubicación temporal de la señal de prueba (P) con respecto a la señal enmascarante (E), se pueden distinguir tres situaciones posibles (Fig. IV.8):

- 1) **Enmascaramiento simultáneo**: E y P se presentan solapados en el tiempo (E está presente durante toda la duración de P).
- 2) **Enmascaramiento previo** a la presentación de la señal enmascarante, o pre-enmascaramiento: E se presenta después de P.

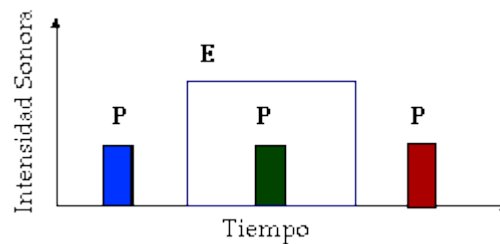


Fig. IV.8. Ubicación temporal de las señales enmascarante y enmascarada.

- 3) **Enmascaramiento posterior** a la presentación de la señal enmascarante, o post-enmascaramiento: E se presenta antes que P.

A continuación se examinan algunos ejemplos que muestran la dependencia del enmascaramiento simultáneo con el contenido espectral de la señal enmascarante y con su nivel de presión sonora.

Efectos espectrales

La siguiente figura muestra el patrón de enmascaramiento generado por ruido blanco (de espectro plano entre 20 Hz y 20 kHz) con distintas densidades espectrales. La curva punteada inferior corresponde al UA; los extremos izquierdo y derecho de las curvas de los UEs se superponen con el UA.

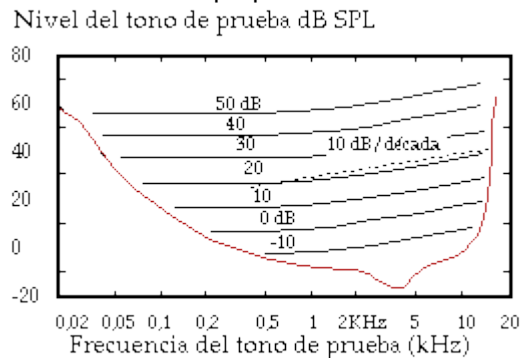


Fig. IV.9. Patrón de enmascaramiento producido por ruido blanco.

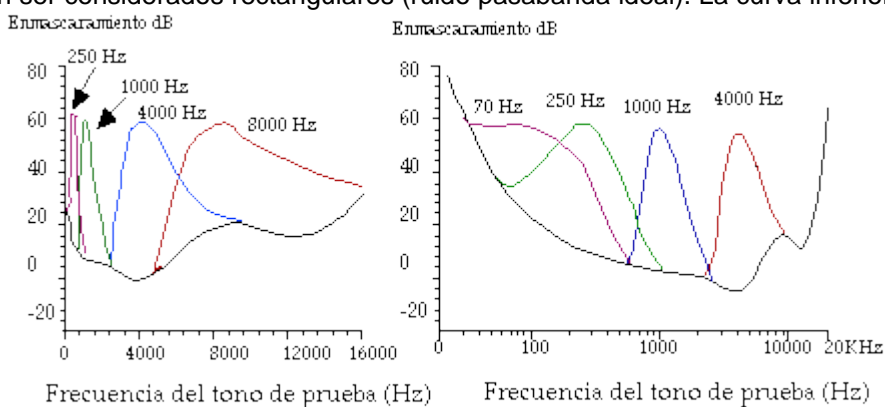
En la curva superior de la Fig. IV.9 (correspondiente al ruido de mayor intensidad), en la cual el efecto del UA es mínimo, se observa que:

- 1) **El umbral de enmascaramiento** asociado al ruido blanco es prácticamente constante (independiente de la frecuencia) en el rango de 20 a 500 Hz; por encima de los 500 Hz aumenta con la frecuencia, con una pendiente de aproximadamente 10 dB/década.
- 2) A pesar de que la intensidad de la señal enmascarante se encuentra distribuida uniformemente en frecuencia, resulta más fácil enmascarar (con ruido blanco) un tono de alta frecuencia que uno de baja frecuencia.

Como se verá posteriormente, el punto (1) es consecuencia de la no uniformidad de la resolución en frecuencia del sistema auditivo, aunada a un mecanismo de integración de la intensidad sonora en el dominio frecuencial; el resultado descrito en el punto (2) puede generalizarse a cualquier señal enmascarante, y se debe a las propiedades de la membrana basilar.

En la siguiente figura se puede observar el patrón de enmascaramiento provocado por bandas de ruido de una banda crítica de ancho y nivel de 60 dB SPL. Las bandas de ruido, centradas en 70, 250, 1000, 4000 y 8000 Hz, tienen anchos de 100, 100, 160, 700 y 1700 Hz, respectivamente.

Las pendientes superior e inferior de cada banda de ruido son superiores a 200 dB/octava, por lo que sus espectros pueden ser considerados rectangulares (ruido pasabanda ideal). La curva inferior corresponde al UA.



(a) Escala lineal de frecuencia. (b) Escala logarítmica de frecuencia.

Fig. IV.10. Patrón de enmascaramiento producido por bandas de ruido angostas.

Nótese que:

- 1) El efecto de **enmascaramiento** se extiende fuera del intervalo de frecuencias en el cual está confinada la señal enmascarante. En la Fig. IV.10 se observa que el efecto de enmascaramiento se extiende en un rango más amplio hacia las altas frecuencias que hacia las bajas.
- 2) El máximo valor del **UE** en cada curva decrece al aumentar la frecuencia central de la banda de ruido, a pesar de que el nivel SPL de cada banda es idéntico; en la banda centrada en 250 Hz, el máximo del UE es aproximadamente igual a 58 dB SPL, mientras que en la banda centrada en 4 kHz es de unos 55 dB SPL.
- 3) Existe una fuerte dependencia del **UE con la frecuencia**; en la Fig. IV.10(b) se ve que, en una escala logarítmica de frecuencias, la forma y las pendientes de la curva correspondiente a la banda de ruido centrada en 1000 Hz son muy similares a las de la curva centrada en 4000 Hz. Por otro lado, en una escala lineal de frecuencias (Fig. IV.10(a)) las curvas de las bandas de ruido centradas por debajo de los 500 Hz son similares entre sí.

A partir del punto (3) anterior y del punto (1) en el caso del ruido blanco como señal enmascarante, podría pensarse que el **efecto de enmascaramiento depende de la frecuencia en forma lineal, por debajo de los 500 Hz, y en forma logarítmica por encima de 500 Hz.**

Dependencia del nivel de señal

En la siguiente figura se muestra el patrón de enmascaramiento correspondiente a bandas de ruido centradas en 1 kHz. Todas las bandas de ruido tienen el mismo ancho de banda (160 Hz), pero difieren en el nivel de presión sonora.

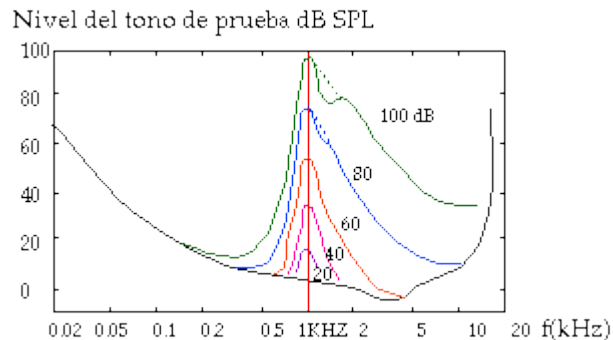


Fig. IV.11. Patrón de enmascaramiento producido por bandas de ruido de distinta intensidad sonora.

En esta figura se nota que **el valor máximo del patrón de enmascaramiento depende del nivel de la señal enmascarante**, en forma tal que un incremento de X dB en la presión sonora de la señal provoca un incremento de X dB en el **UE máximo** (situado aproximadamente en la frecuencia central de la banda de ruido).

Por otro lado, la dependencia de las pendientes con respecto al nivel de señal resulta un tanto inesperada: hacia las frecuencias inferiores a la frecuencia central de la banda de ruido, la pendiente permanece prácticamente constante (es casi independiente del nivel), mientras que hacia las altas frecuencias la pendiente aumenta (en magnitud) a medida que disminuye el nivel de señal.

Este fenómeno está relacionado, aparentemente, con **el mecanismo de realimentación** a cargo de las células ciliares externas [2] (ver sección III.6): un tono o banda estrecha de ruido de gran intensidad provoca la saturación de las células (es decir, desaparece la realimentación), por lo que la selectividad en frecuencia de la membrana basilar es más pobre y, por ende, la excitación neural se distribuye en una zona más amplia de dicha membrana; por el contrario, cuando la señal es de baja intensidad, la acción de las células ciliares externas aumenta drásticamente la selectividad, de modo que la envolvente de la onda viajera es más estrecha y, en consecuencia, la excitación se concentra en un intervalo de la membrana más pequeño.

Las pendientes hacia las bajas frecuencias permanecen casi constantes debido a la acción pasabajos de la membrana basilar: la señal se atenúa rápidamente una vez que sobrepasa la zona de la membrana en la cual produce la máxima vibración y se acerca al **helicotrema** (ver sección III.5.1), por lo que el nivel de actividad neural provocado por dicha señal es bajo y, en consecuencia, el umbral de enmascaramiento es menor (es decir, es más difícil que la señal pueda enmascarar a un tono de menor frecuencia).

Umbral de audibilidad y de enmascaramiento

En las Figs. IV.9, IV.10 y IV.11 se observa que los patrones de enmascaramiento se superponen con el umbral de audibilidad en las bajas y altas frecuencias. Este solapamiento es de esperarse, puesto que, a medida que la distancia en frecuencia entre las señales enmascarante y enmascarada aumenta, el efecto de la primera debe disminuir y, eventualmente, desaparecer.

La relación entre el umbral de audibilidad y los patrones de enmascaramiento es aún más estrecha, puesto que el **UA** puede considerarse, en cierta medida, como un **umbral de enmascaramiento**. El umbral de audibilidad, tal como fue definido en la sección IV.1.1, puede descomponerse en varias partes:

- La atenuación introducida por la respuesta en frecuencia del oído externo y el oído medio, por encima de 1 kHz [2]. Esta atenuación altera la sensibilidad del oído, puesto que sonidos de igual intensidad y distinta frecuencia provocan vibraciones de distinta amplitud en la membrana basilar.
- Un patrón de enmascaramiento debido a ruidos corporales de baja frecuencia. Los ruidos intrínsecos al cuerpo, como por ejemplo los debidos a los latidos cardíacos [8] y al movimiento de los músculos [2], constituyen una señal acústica que está siempre presente, la cual es responsable del incremento del UA hacia las bajas frecuencias.
- Ruido neural, debido a la acción probabilística de los receptores auditivos [9].

La comprensión que se tiene del pre-enmascaramiento es pobre, puesto que los resultados experimentales obtenidos sólo son reproducibles con sujetos altamente entrenados [2], y en muchos casos no permiten concluir con certeza acerca de sus propiedades.

El fenómeno se extiende hasta unos 20 ms antes de la aparición de la señal enmascarante, independientemente del nivel de ésta. Debido a la corta duración del pre-enmascaramiento y a la escasa información disponible, los modelos perceptuales ignoran usualmente los efectos de pre-enmascaramiento, aun cuando éstos pueden ser de gran importancia en sistemas de codificación de audio basados en transformadas [5] [6].

Post-enmascaramiento

El post-enmascaramiento, por el contrario, es un efecto fácil de medir aun en sujetos no entrenados. Por regla general, se determina experimentalmente mediante señales de prueba de corta duración (del orden de los 5 ms o menos), aplicadas luego de una señal enmascarante de duración variable.

El efecto de post-enmascaramiento existe durante un intervalo máximo de unos 200 ms después de la desaparición de la señal enmascarante [2].

En la Fig. IV.14 se observa el comportamiento del umbral de enmascaramiento en función del retardo entre el instante en que desaparece la señal enmascarante y el instante en que desaparece la señal de prueba, y de la intensidad de la señal enmascarante. La señal de prueba en este caso es un impulso de presión de forma "gausiana", de 20 ms de duración; la señal enmascarante es ruido blanco de 0,5 s y nivel de densidad espectral variable.

En el instante $t_d = 0$, el UE alcanza su valor máximo, el cual es idéntico al obtenido en el enmascaramiento simultáneo. Para $t_d > 0$, el UE decae con el tiempo hasta que, eventualmente, se hace igual al UA. El decaimiento es tal que se alcanza el UA en un intervalo no mayor de 200 ms, por lo que la tasa de decaimiento es mayor para señales enmascarantes de mayor intensidad].

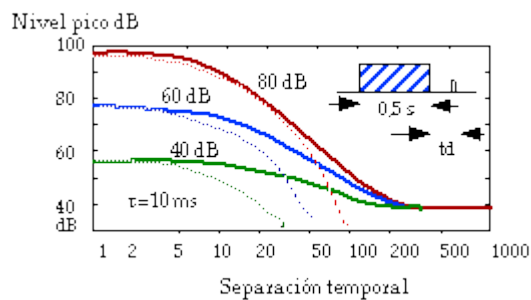


Fig. IV.14. Decaimiento del post-enmascaramiento en función del tiempo y de la intensidad de la señal enmascarante.

Las líneas punteadas de la figura muestran el decaimiento correspondiente a una constante de tiempo de 10 ms; las diferencias entre estas curvas y las curvas de post-enmascaramiento indican que el fenómeno no puede ser modelado mediante una única constante de tiempo [2]. Sin embargo, en ciertos intervalos es posible suponer que el UE decae linealmente en función del logaritmo del retardo [44], como se observa en los tramos casi rectos de las curvas de decaimiento de la Fig. IV.14.

A diferencia de lo que ocurre en el enmascaramiento simultáneo (ver Figs. IV.9 y IV.11), en el post-enmascaramiento un incremento de X dB en el nivel de presión sonora de la señal enmascarante no produce, en general, un aumento de X dB en la cantidad de enmascaramiento (es decir, en el nivel de sensación de una señal de prueba apenas audible).

La duración de la señal enmascarante influye también sobre el post-enmascaramiento, como se aprecia en la Fig. IV.15. El efecto de una señal enmascarante de corta duración (p. ej., 5 ms) decae más rápidamente que el de una señal de larga duración (p. ej., 200 ms); para señales de más de 200 ms no se observa ninguna alteración en la tasa de decaimiento, sin embargo, señala que algunos estudios indican que la tasa de decaimiento no cambia para duraciones de la señal enmascarante de más de 50 ms.

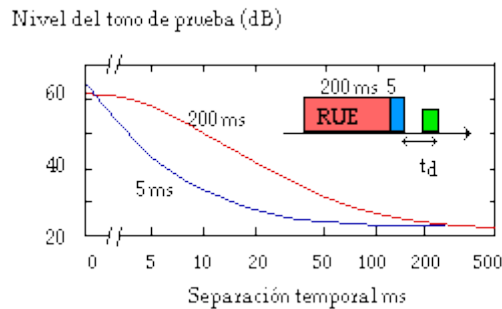


Fig. IV.15. Dependencia del post-enmascaramiento frente a la duración de la señal enmascarante.

Por último, el **post-enmascaramiento depende del contenido frecuencial de las señales enmascarante y enmascarada**. Diversos experimentos descritos en la literatura[11] permiten concluir que la cantidad de post-enmascaramiento es mayor en las bajas frecuencias que en las altas.

En cuanto a las causas del post-enmascaramiento, se cree que tiene su origen en dos procesos fisiológicos distintos [12] :

- Las propiedades mecánicas de la membrana basilar son tales que ésta vibra durante un cierto tiempo luego de la desaparición del estímulo sonoro. Este es un efecto de corta duración (< 20 ms).
- Efectos de "adaptación" o "acomodación" neural. Este es un efecto de mayor duración que el anterior.

Duifhuis [12] propuso un modelo exponencial satisfactorio del post-enmascaramiento, en el cual se incluyen dos constantes de tiempo: una inferior a 10 ms, para considerar la mecánica de la membrana basilar, y otra de 75 ms, para tomar en cuenta los procesos neurales.

IV.4. Bandas críticas y tasa de bandas críticas

Como se vio en el Cap. III, el comportamiento de la cóclea como **analizador en frecuencia** puede resumirse en dos características:

- **La componente del espectro de la señal sonora es procesada por más de un receptor auditivo.**
- **Análogamente, cada receptor auditivo procesa diversas componentes del espectro de la señal.**

La forma del patrón de excitación provocado por un tono puro (ver Fig. IV.7) ilustra bien estas dos características, e indica que la selectividad en frecuencia del sistema auditivo no es infinita⁶.

IV.4.1. Ancho de banda crítico

El **ancho de banda crítico** es un concepto desarrollado por Fletcher [13], que puede interpretarse como una medida de la **selectividad frecuencial del oído**.

El ancho de banda crítico permite explicar por qué, dado un tono de una cierta frecuencia, una banda de ruido estrecha centrada en dicha frecuencia produce la misma cantidad de enmascaramiento sobre el tono que una banda ancha de ruido, aun cuando el nivel de densidad espectral de ambos ruidos sea igual y, por ende, la energía del ruido de banda estrecha sea menor [6].

Bajo la suposición de que un tono "**sumergido**" en una banda de ruido es apenas audible cuando la intensidad del tono es igual a la intensidad total del ruido enmascarante, Fletcher [13] determinó que, cuando el ancho de la banda de ruido cae por debajo de cierto valor crítico, la densidad espectral del ruido debe ser inversamente proporcional al ancho de dicha banda para que el tono permanezca enmascarado; cuando el ancho de la banda de ruido supera dicho valor crítico, la densidad espectral del ruido enmascarante debe permanecer constante para que el tono sea apenas audible.

En otras palabras, si el ancho de la banda de ruido varía, para enmascarar al tono es necesario que la energía del ruido contenida en un intervalo de frecuencias alrededor del tono sea constante.

La energía efectiva de la señal enmascarante es aquella confinada en tal intervalo, mientras que el resto no contribuye al enmascaramiento del tono [2]. **El ancho de este intervalo crítico ha sido denominado ancho de banda crítico.**

De esta manera, el **ancho de banda crítico** (tal y como lo definió Fletcher) se obtiene cuando el ancho de la banda de ruido es tal que la intensidad de un tono de prueba apenas audible es igual a la intensidad de la banda de ruido [13]. Ahora bien, esta medida de la selectividad del sistema auditivo es incorrecta, puesto que Fletcher basó su definición en dos suposiciones erróneas [9] [2]:

- Cuando el tono es apenas audible, la "relación señal a ruido" (SNR) entre las intensidades del tono y de la banda de ruido no es igual a 0 dB. Por ejemplo, la intensidad de un tono apenas audible de 1 kHz está unos 3 dB por debajo de la intensidad total de una banda de ruido centrada en dicha frecuencia (es decir, una SNR de \approx 3 dB).
- Esta "relación señal a ruido" varía con la frecuencia del tono: a frecuencias bajas, es de unos \approx 2 dB, mientras que en las altas frecuencias llega a unos \approx 6 dB.

IV.4.2 Bandas críticas: definición y determinación experimental

A pesar de los errores implícitos en la definición de Fletcher, el concepto de un ancho crítico sigue siendo válido, puesto que numerosos experimentos psicoacústicos indican que las respuestas de los sujetos ante distintos fenómenos perceptuales cambian abruptamente cuando los estímulos sobrepasan un cierto ancho de banda [9]. Así pues, **se define una banda crítica (BC) como un intervalo de frecuencia que representa la máxima resolución frecuencial del sistema auditivo en diversos experimentos psicoacústicos** [6] [9]. Adicionalmente, puede decirse que una BC constituye el intervalo de frecuencia en el cual el oído interno efectúa una integración espacial (es decir, espectral) de la intensidad de la señal sonora: **la BC es el intervalo en el cual se "suma" la energía de las distintas componentes espectrales de la señal.**

El significado de las bandas críticas se comprende mejor una vez que se estudian algunos experimentos psicoacústicos, en los cuales la BC aparece como un resultado natural.

Medición de la sonoridad

El concepto moderno de banda crítica fue desarrollado por Zwicker y colaboradores [2] en el contexto de la suma de sonoridades o intensidades subjetivas.

La siguiente figura indica la variación de la sonoridad de una banda de ruido centrada en 2 kHz, en función del ancho de dicha banda. La intensidad total del ruido se mantiene constante en 47 dB SPL, de modo que la densidad espectral del ruido varía en forma inversamente proporcional al ancho de banda.

Como se observa, mientras el ancho de banda de la señal sea inferior al valor crítico (\approx 300 Hz), la sonoridad permanece constante; cuando el ancho de banda es mayor que una BC, la sonoridad aumenta.

Medición del umbral de audibilidad

Es posible medir el valor de una BC mediante un experimento que permita determinar el umbral de audibilidad usando un complejo de tonos puros. La siguiente figura ilustra el resultado de la determinación del UA en la vecindad de 1 kHz, donde la curva del UA puede considerarse plana.

Inicialmente, se determina el UA con un solo tono de 920 Hz, y el valor obtenido (3 dB SPL) corresponde al nivel de presión sonora del tono de prueba apenas audible.

Posteriormente se añade un nuevo tono de 940 Hz; para que el complejo de tonos esté en el umbral de detección, el nivel de cada tono debe reducirse a la mitad, de modo que la intensidad total del complejo de tonos sigue siendo de 3 dB SPL.

Si se va aumentando el número de tonos del complejo (separados entre sí por un intervalo de 20 Hz), es preciso ir reduciendo proporcionalmente el nivel de cada tono individual para que la señal total siga siendo apenas perceptible, hasta que el ancho de banda ocupado por el complejo alcanza un valor crítico de aprox. 160 Hz (es decir, abarca una banda crítica). A partir de ese valor, aun cuando aumente el número de tonos, para que el complejo sea apenas audible es necesario mantener el nivel individual de cada tono [2].

De este experimento es posible concluir que **la banda crítica corresponde, efectivamente, al intervalo de frecuencias en el cual se suma la intensidad de las componentes confinadas a dicho intervalo, para producir un umbral de audibilidad dado.**

Si se utiliza ruido uniformemente enmascarante, se puede medir este efecto a lo largo de todo el rango de frecuencias audibles, puesto que, a diferencia del UA, el patrón de enmascaramiento obtenido es plano (independiente de la frecuencia). Los resultados obtenidos en un experimento de esta naturaleza son virtualmente idénticos a los mostrados en la Fig. IV.17 [2].

Medición del efecto de enmascaramiento

La siguiente figura muestra el nivel de una banda estrecha de ruido apenas perceptible, centrada entre dos tonos de mayor intensidad.

Como se observa en la figura, mientras la separación de los tonos no supere el valor de una banda crítica, el UE permanece más o menos constante (es independiente de la separación entre los tonos); una vez que la distancia entre los tonos es mayor que una BC (\approx 300 Hz, a 2 kHz), el UE decae rápidamente.

Es importante hacer notar que el punto de transición en la curva, correspondiente a una BC, es aproximadamente constante para niveles moderados de señal ($<$ 70 dB SPL) y, por ello, generalmente se asume que los valores de las BCs son independientes del nivel de señal, aun cuando esto no sea cierto [9].

IV.4.3 Tasa de bandas críticas

Los anchos de las bandas críticas dependen de la frecuencia, como se ilustra en la Fig. IV.19. Esta curva, tomada de [2], se obtuvo promediando los resultados de la medición de las BCs en más de 50 sujetos y con cinco métodos distintos. Por debajo de los 500 Hz, el ancho de banda crítico es aproximadamente constante (aprox. 100 Hz), mientras que por encima de los 500 Hz crece en proporción a la frecuencia: el ancho de una banda crítica centrada en una frecuencia superior a 500 Hz es de alrededor del 20% de la frecuencia central.

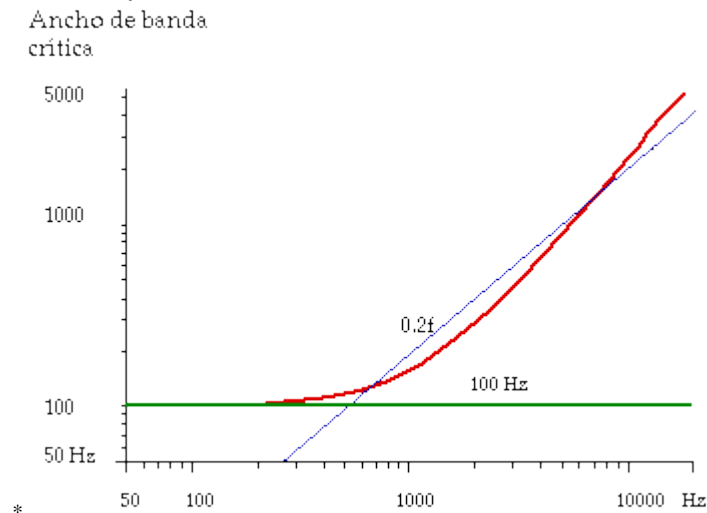


Fig. IV.19. Ancho de las bandas críticas en función de la frecuencia.

Esta curva puede ser modelada mediante la siguiente ecuación [2], la cual permite calcular el ancho de banda crítico (en Hz), Δf_{BC} , correspondiente a la frecuencia en Hz, f , con un error inferior al 10%:

$$\Delta f_{BC}(f) = 25 + 75 \cdot \left[1 + 1,4 \left(\frac{f}{1000} \right)^2 \right]^{0,69} \quad (4.2)$$

En base a los valores obtenidos mediante la Fig. IV.19 o la Ec. 4.2, es posible subdividir el rango de frecuencias audibles en intervalos adyacentes de una BC de ancho, que no se solapan entre sí [2], y que representan una primera aproximación al problema de modelar la selectividad en frecuencia del oído interno.

Esta subdivisión se representa en la siguiente figura; en el rango audible de 20 Hz a 20 kHz se encuentran 25 bandas críticas adyacentes, numeradas en forma consecutiva en la figura.

En la Tabla IV.1 se muestran los valores que definen las primeras 24 BCs, según Zwicker [2], los cuales se han convertido en un estándar "de facto" para describir la distribución de las BCs en función de la frecuencia.

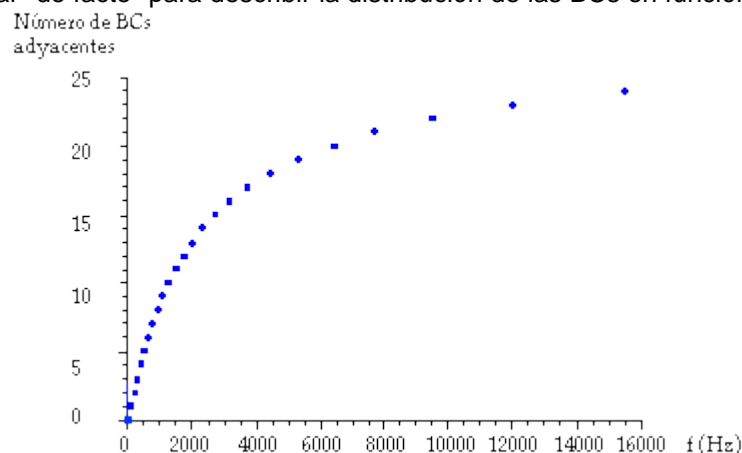


Fig. IV.20. Bandas críticas adyacentes en el rango de frecuencias audibles.

Ahora supóngase que se subdivide de manera continua el rango de frecuencias audibles en intervalos solapados entre sí de una BC de ancho, y que se desea obtener, para cada frecuencia f_0 , un valor que represente el número (no necesariamente entero) de bandas críticas adyacentes y no solapadas contenidas en el intervalo de 0 a f_0 Hz. Los valores así obtenidos constituyen la denominada tasa de bandas críticas [92] [2], también llamada escala de bandas críticas.

Nº de banda crítica	Frec. central (Hz)	Frec. superior (Hz)	Ancho de la BC(Hz)
1	50	100	100
2	150	200	100
3	250	300	100
4	350	400	100
5	450	510	110
6	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22	8500	9500	1800
23	10500	12000	2500
24	13500	15500	3500

Tabla IV.1. Distribución de las bandas críticas en función de la frecuencia.

En términos de la Fig. IV.20, puede imaginarse una "ventana" de ancho igual a una BC que se "desliza" entre los puntos correspondientes a las BCs adyacentes, desde 0 hasta f_0 Hz, de modo que a cada valor de frecuencia f_0 se le asigna un número real en el eje vertical, correspondiente a la cantidad de intervalos adyacentes y no superpuestos de una BC de ancho, "acumulados" desde 0 hasta f_0 Hz.

Estrictamente hablando, la tasa de BCs (Fig. IV.21) y el ancho de las bandas críticas (Fig. IV.20) están relacionados a través de la siguiente ecuación [54]:

$$z(f) = \int_0^f \frac{1}{\Delta f_{BC}(x)} dx \quad (4.3)$$

En la Fig. IV.21 se muestra la relación entre la tasa de bandas críticas, la frecuencia y el número asignado a las BCs adyacentes de la Fig. IV.20.

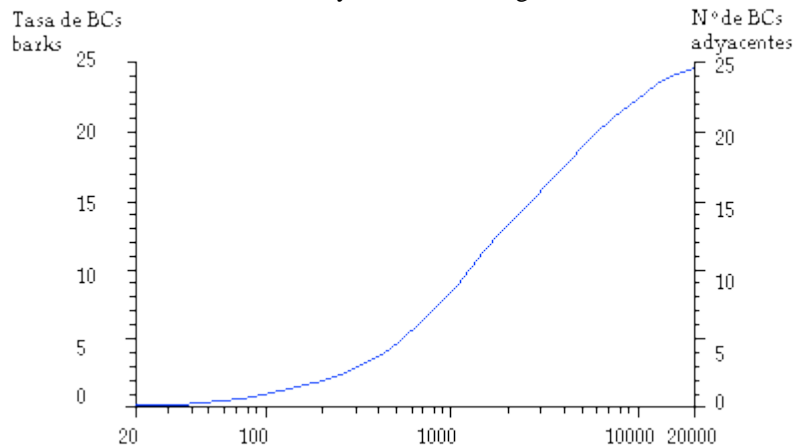


Fig. IV.21. Tasa de bandas críticas en función de la frecuencia.

Para los valores de tasa de BCs, se ha definido como unidad el "bark": un intervalo de frecuencia de 1 bark es, por definición, un intervalo de una BC de ancho en cualquier punto del rango de frecuencias audibles [2]. En la

Fig. IV.21 se observa que la primera BC abarca el intervalo de 0 a 1 bark, la segunda BC el intervalo de 1 a 2 barks, y así sucesivamente.

La relación entre la tasa de BCs y la frecuencia puede ser expresada mediante la siguiente ecuación [2], la cual permite calcular la **tasa de bandas críticas (en barks)**, z , correspondiente a la frecuencia en Hz, f , con un error inferior a $\pm 0,2$ barks:

$$z(f) = 13 \cdot \arctan\left(\frac{0,76f}{1000}\right) + 3,5 \cdot \arctan\left[\left(\frac{f}{7500}\right)^2\right] \quad (4.4)$$

IV.4.4 Relación con otras variables físicas y fisiológicas

Las **bandas críticas** y su escala asociada, la tasa de BCs, están relacionadas estrechamente con diversos fenómenos fisiológicos y psicoacústicos. Por una parte, los intervalos de una BC de ancho corresponden a distancias iguales a lo largo de la membrana basilar, medidas en sentido longitudinal (desde la ventana oval hacia el helicotrema): **cada BC representa una distancia de 1,3 mm** [2].

Puesto que los receptores auditivos están distribuidos de manera equidistante a lo largo de la membrana, cada BC corresponde por lo tanto a un número constante de receptores; en consecuencia, un número Z_0 de bandas críticas, que representa un intervalo de Z_0 barks, equivale a una distancia de $1,3 Z_0$ mm.

Por ende, la función de tasa de bandas críticas en términos de la frecuencia puede interpretarse como una función que indica la relación entre la frecuencia de la señal sonora y su posición asociada en la membrana basilar [2].

La Fig. IV.22 ilustra la relación entre la tasa de BCs y diversos parámetros físicos, fisiológicos y perceptuales. En la parte superior de la figura se representa en forma esquemática la cóclea "**desenrollada**"; la membrana basilar corresponde a la zona rayada del dibujo.

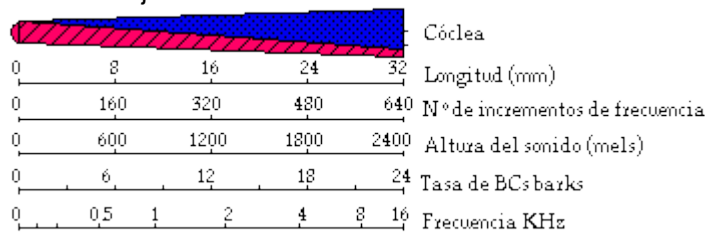


Fig. IV.22. Relación entre la tasa de bandas críticas y otras escalas de medición.

En esta figura resulta obvio que no existe una relación simple entre la frecuencia y las demás escalas. Sin embargo, la relación entre la **tasa de BCs** y parámetros tales como la **posición en la membrana basilar** (escala fisiológica), el **número de incrementos de frecuencia** apenas perceptibles y el cociente de frecuencias subjetivas o "**alturas del sonido**" (escalas Psicoacústicas) resulta prácticamente lineal.

Por todo lo expuesto, la tasa de BCs no sólo está asociada con una medida de la selectividad en frecuencia, como lo son las bandas críticas, sino que además constituye una escala más natural y conveniente que la escala de frecuencias para representar gráficamente e interpretar fenómenos perceptuales [2].

IV.4.5 Excitación, enmascaramiento y bandas críticas

Para ilustrar lo expuesto en la sección anterior, en la Fig. IV.23 pueden observarse los patrones de excitación producidos por bandas de ruido estrechas, centradas en distintas frecuencias y con la misma intensidad total (60 dB SPL), expresados en función de la tasa de BCs.

Nótese que, a diferencia de lo observado en la Fig. IV.10, la forma de las curvas (en especial, la pendiente hacia las bajas frecuencias) es virtualmente idéntica, independientemente de la frecuencia central de la señal sonora.

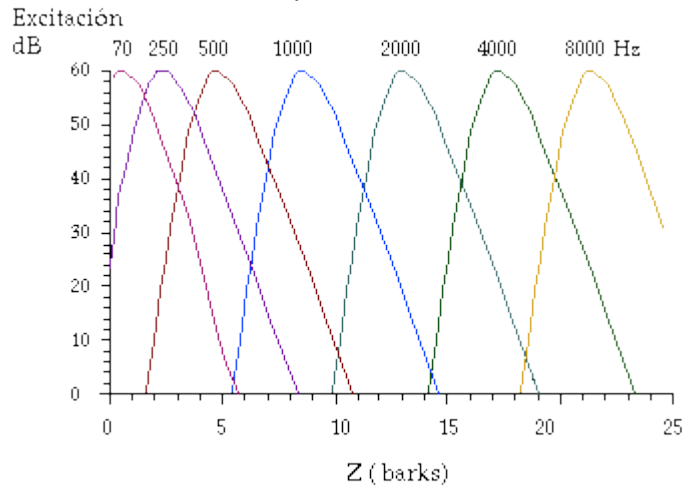


Fig. IV.23. Patrones de excitación de bandas estrechas de ruido centradas en distintas frecuencias, en función de z.

En la Fig. IV.24 se muestran los patrones de excitación producidos por bandas de ruido de 1 bark de ancho e intensidad variable, centradas en 1 kHz (Å 8,5 barks).

Obsérvese que la pendiente de las curvas hacia las bajas frecuencias permanece casi constante (Å 27 dB/bark), independientemente de la intensidad total de la señal sonora; asimismo, el decaimiento de la excitación fuera de la BC ocupada por la banda de ruido puede aproximarse razonablemente bien mediante rectas. La pendiente hacia las altas frecuencias varía con la intensidad de la señal, tal como se vio en la sección IV.3.3.

Asimismo, los patrones de enmascaramiento producidos por bandas de ruido de 1 bark de ancho resultan invariantes frente a la frecuencia central de la señal enmascarante, cuando se expresan en función de la tasa de BCs [2]. Las curvas correspondientes pueden obtenerse a partir de los patrones de excitación de las Figs. IV.23 y IV.24, simplemente mediante un desplazamiento en sentido vertical, como se verá en la sección IV.5.

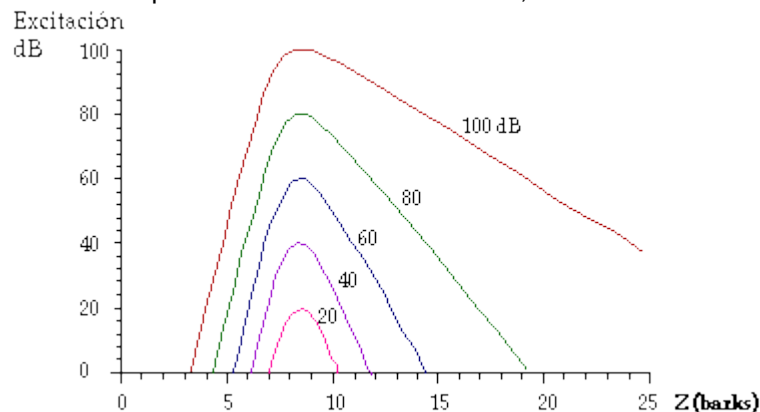


Fig. IV.24. Patrones de excitación de bandas estrechas de ruido centradas en 1 kHz, en función de z.

Intensidad por banda crítica

Debido al efecto de "suma" de intensidades en intervalos de una BC, en ocasiones puede ser conveniente expresar el espectro de una señal, o sus patrones de excitación y enmascaramiento, en términos de la intensidad por banda crítica, definida como:

$$I_{BC}(f_0) = \int_{f_0 - 0,5\Delta f_{BC}(f_0)}^{f_0 + 0,5\Delta f_{BC}(f_0)} \frac{dl}{df} df \quad (4.5)$$

donde: dl/df = densidad espectral de intensidad (intensidad por Hz).

Puesto que la tasa de BCs resulta más apropiada para representar la excitación y el enmascaramiento, resulta conveniente escribir la Ec. 4.5 en términos de z:

$$I_{BC}(z_0) = \int_{z_0-0,5}^{z_0+0,5} \frac{dl}{dz} dz \quad (4.6)$$

Esta cantidad puede expresarse en dB, tal como el nivel de intensidad sonora, usando la intensidad de referencia I_0 :

$$L_{BC} = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{BC}}{I_0}\right) \quad (4.7)$$

IV.5. Índice de enmascaramiento y tonalidad de la señal

Hasta ahora, en los experimentos de enmascaramiento descritos se han utilizado bandas de ruido como señales enmascarantes y tonos como señales de prueba. Adicionalmente, se ha señalado la similitud existente entre los patrones de excitación y de enmascaramiento provocados por bandas de ruido. En esta sección se estudia cuantitativamente la relación entre excitación y enmascaramiento, y la dependencia de esta relación con respecto al carácter tonal de las señales enmascarante y enmascarada.

IV.5.1. Relación entre el nivel de excitación y el umbral de enmascaramiento

Como se dijo en la sección IV.2, no es posible determinar directamente el nivel de excitación mediante experimentos psicoacústicos. Por otro lado, la estrecha relación entre la excitación y el enmascaramiento sugieren, como una primera aproximación, que los respectivos patrones deben ser idénticos en cuanto a su forma [2]. Ahora bien, como se pudo observar en las Figs. IV.10 y IV.11, el máximo UE está de 2 a 6 dB por debajo del nivel SPL de la señal enmascarante (es decir, de 2 a 6 dB por debajo del máximo nivel de excitación).

Para cuantificar esta diferencia, supóngase que se dispone de una señal de ruido de banda ancha que produzca un patrón de excitación plano, expresado en términos de la tasa de BCs; es decir, que tenga una densidad espectral tal que la intensidad por BC (dada por la Ec. 4.5 ó 4.6) sea constante [2].

Si se mide el enmascaramiento producido por esta señal sobre un tono, se puede obtener un patrón de enmascaramiento a partir del cual puede determinarse la diferencia entre el UE y la excitación, en función de la frecuencia; esta diferencia se denomina índice de enmascaramiento.

El ruido requerido para este experimento, denominado ruido de excitación uniforme, debe tener (ignorando la atenuación introducida por el oído externo y medio) una densidad espectral descrita por la ecuación [2]:

$$L_{REU}(f) = 10 \cdot \log\left[\frac{\Delta f_{BC}(f)}{100}\right] \text{ dB} \quad (4.8)$$

De esta forma, si L_T es el nivel de un tono de prueba apenas audible, y L_{BC} es el nivel de intensidad por BC de la señal enmascarante, el índice de enmascaramiento en dB, qdB, está dado por:

$$\theta_{dB} = L_T - L_{BC} \quad (4.9)$$

En la siguiente figura se muestran el índice de enmascaramiento y el patrón de enmascaramiento obtenido con un ruido de excitación uniforme, con nivel de intensidad por BC de 40 dB (intensidad total de 54 dB). Como se observa en la figura IV.25, qdB varía entre -2 y -6 dB a lo largo de frecuencias audibles.

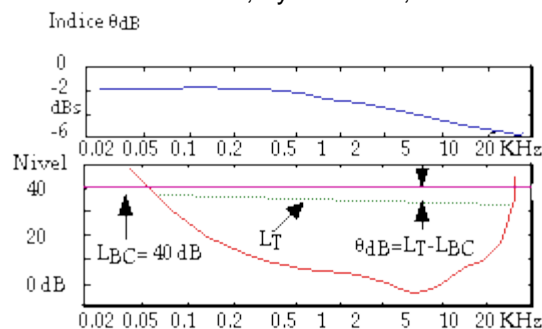


Fig. IV.25. Índice de enmascaramiento asociado a una banda de ruido como señal enmascarante.

IV.5.2. Diferencias entre señales tonales y no tonales

Aun cuando, según lo expuesto hasta ahora, pareciese que la "habilidad" de una señal para enmascarar a un tono depende sólo de la intensidad contenida en la BC centrada en el tono, diversos resultados experimentales [2] indican que tal "habilidad" depende además de la tonalidad de la señal enmascarante.

En este contexto, el término "tonalidad" se utiliza para describir cualitativamente la similitud del espectro de la señal con el de un tono puro: una señal es "tonal" cuando su espectro es "impulsivo", mientras que es "no tonal" o "ruidosa" si su espectro se asemeja al de una banda de ruido.

La siguiente figura ilustra la llamada asimetría de enmascaramiento entre tonos y bandas de ruido. La curva corresponde al patrón de enmascaramiento producido por un tono puro que enmascara a una banda crítica de ruido (caso T) y viceversa (caso R). Ambas señales enmascarantes tienen una intensidad total de 72 dB SPL.

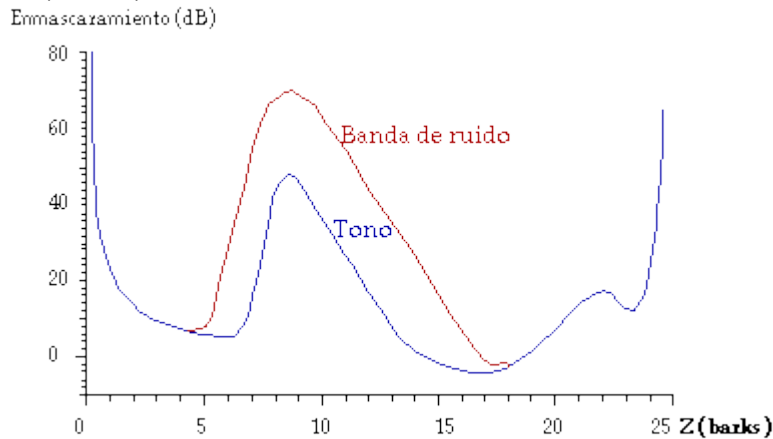


Fig. IV.26. Patrones de enmascaramiento correspondientes a un tono y a una banda crítica de ruido, centrados en 1000 Hz.

En esta figura se observa que la banda de ruido es más efectiva que el tono como señal enmascarante: la diferencia entre los umbrales de enmascaramiento de un caso y de otro es de unos 21 dB.

En términos del índice de enmascaramiento definido en la sección IV.5.1, se observa que la diferencia entre el UE del tono y la intensidad de la banda de ruido enmascarante (es decir, el nivel de excitación máximo) es de unos ± 3 dB, lo cual corresponde al valor de θ_{dB} a 1 kHz; en el caso del tono como señal enmascarante esta diferencia es de ± 24 dB.

Por tanto, el valor de θ_{dB} asociado a una señal enmascarante tonal es considerablemente mayor (en magnitud) que el valor de θ_{dB} asociado a una señal enmascarante no tonal.

Adicionalmente, Hellman [39] señala que el índice de enmascaramiento en el caso R es independiente del nivel de la banda de ruido enmascarante, mientras que en el caso T el valor de qdB aumenta (en magnitud) al aumentar el nivel SPL del tono enmascarante. En el caso de la Fig. IV.26 (estudiado en [39]), $\theta_{dB} @ \pm 20$ dB para un tono de 60 dB SPL, pero $\theta_{dB} @ \pm 30$ dB para un tono de 90 dB SPL.

IV.6.Efecto Haas.

Este fenómeno perceptual llamado también **Efecto Precedencia** tiene una gran importancia, tanto en Acústica Arquitectónica como en Electroacústica y consiste en la **fusión de los sonidos que lleguen en una ventana de tiempo de 50 ms** donde la percepción de la dirección del sonido es la indicada por el sonido inicial.[14]

Una forma simple de demostrar el fenómeno es a partir de un equipo de sonido estereofónico. (fig.IV.27). Si las señales son iguales en ambos canales, el sonido sea percibido como proveniente del centro del sistema.

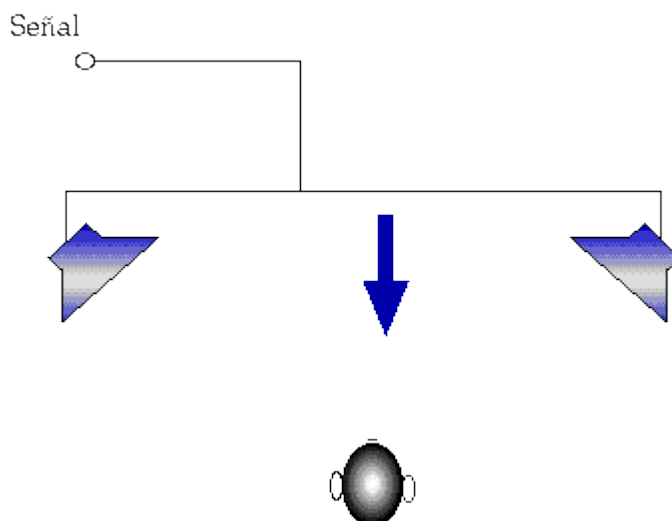


Fig. IV. 27. Disposición del equipo para evaluar el efecto Haas.

Introduzcamos un retardo de **5ms** al canal derecho (Fig. IV.27).
 En este caso el sonido será percibido saliendo del canal izquierdo, a pesar que las intensidades son iguales.

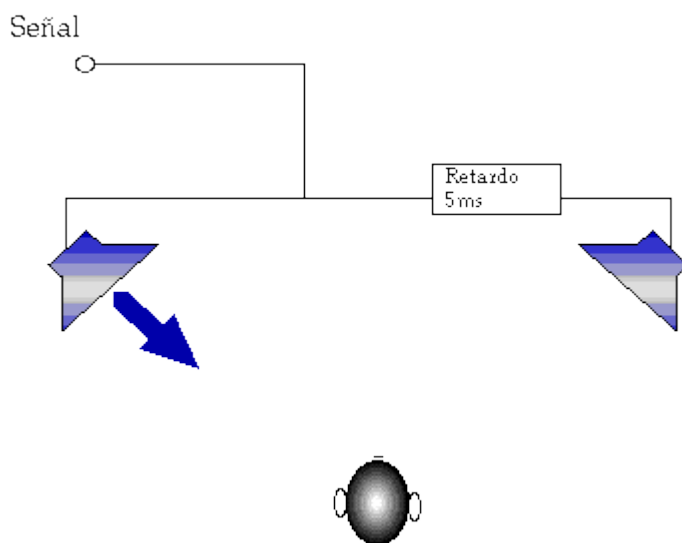


Fig. IV.28. Retardo de 5 ms en el canal derecho.

Si atenúamos 10 dB el canal izquierdo (o le damos 10 dB de ganancia al canal derecho) el sonido será percibido saliendo otra vez del centro del sistema.

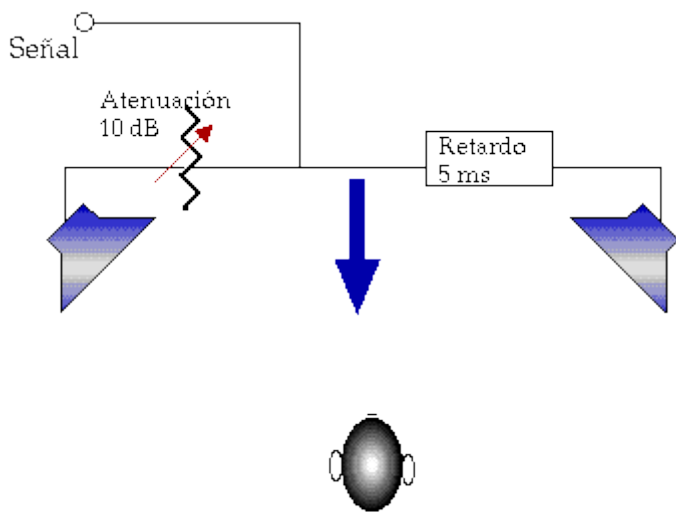


Fig. IV.29. Atenuación de 10 dB en el canal izquierdo.

Esa relación de retardo e intensidad puede verse en forma más completa en la Fig. IV.30

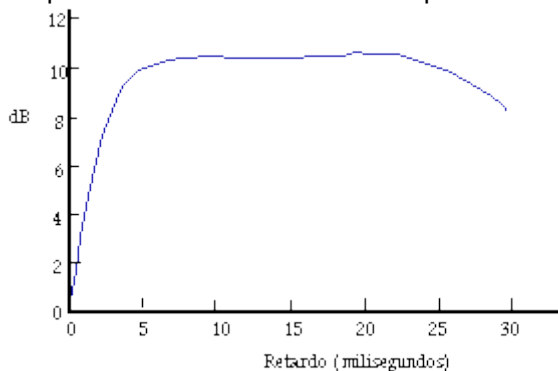


Fig. IV. 30. Efecto Precedencia o "Efecto Haas".

Referencias Bibliográficas del Capítulo: Psicoacústica

- [1] Berkhout, P. J. y Eggermont L.D.J.: "Digital Audio Systemas", IEEE ASSP Magazine, vol. 2, pp 45-67, Octubre 1985.
- [2] Zwicker, E. y Fastl, H.: Psychoacoustics: Facts and Models, Springer, Berlín, 1990.
- [3] Houtsma, A.J.M., Rossing T.D., "Auditory Demonstrations" . Institute of Perception Research, 1987. (folleto del CD "Auditory Demonstrations" , Philips 1126-061.
- [4] Schroeder, M. R. y Hall, J. L.: "Model for mechanical to neural transduction in the auditory receptor", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 55, n° 5, pp. 1055-1060, Mayo 1974.
- [5] Stuart, J. R.: "Predicting the audibility, detectability and loudness of errors in Audio Systems", Audio Engineering Society Preprint, presentado en la 91ª convención de la AES, Nueva York, 1991 (Preprint 3209).
- [6] Fielder, L. D. " Human Auditory capabilities and their consequences in digital audio converter design". Proceeding of yhe 7th International EAS Conference, pp 45-62, Mayo 1989.
- [7] Ganong, W. F.: Fisiología médica, El Manual Moderno, México, 1988, 11ª edición.
- [8] Soderquist, D.R. y J. W. Lindsey: "Physiological noise as a masker of low frequencies: the cardiac cycle", Journal of the Acoustical Society of America, vol 52., n° 4, pp 1216-1220,1972
- [9] Stuart, J. R.: "Implementation and measurement with respect to human auditory capabilities", Proceedings of the AES UK Conference on DSP, pp. 45-61, 1992.
- [10] Plack, C.J. y B.C. Moore: " Temporal window shape as a function of frequency and level", Journal of the Acoustical Society of America, vol 87., n° 5, pp 2178-2187,1990.
- [11] Patterson, J.H.,"Additivity of forward and backward masking as a function of signal frequency".Journal of the Acoustical Society of America, vol. 55, n° 4, pp 802-809,1974.
- [12] Duifhuis, H.: "Consecuences of peripheral frequency selectivity for nonsimultaneous masking". Journal of the Acoustical Society of America, vol 54., n° 6, pp. 1471-1488, 1973.
- [13] Fletcher, H. "Auditory patterns", Reviews of Modern Physics, vol. 12, pp. 47-65, Enero 1940.
- [14] Eargle J.: Sound Recording , Van Nostrand, 1980.