ZARAGOZA 89
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS

JORNADAS NACIONALES DE ACUSTICA
Zaragoza, Abril 1989

PSICOACUSTICA: ASPECTOS FISICOS

Carmen Delgado Bueno
Instituto de Acústica, CSIC
Serrano, 144
28006 MADRID

La Psicofísica es la ciencia que estudia las relaciones entre los estímulos físicos y las respuestas que dichos estímulos originan. En el caso de que el estímulo sea el sonido, en sus distintas manifestaciones, estaremos hablando de Psicoacústica.

La variedad de señales sonoras, así como sus condiciones de propagación y de recepción por parte de los oyentes que se considere, confieren a esta rama de la Acústica un carácter marcadamente interdisciplinar, que da lugar a aportaciones de campos tan diversos como: Electrónica, Medicina, Psicología, Fonética, Música, Arquitectura, etc... que a su vez reciben las aportaciones de la Psicoacústica.

Aunque la percepción es un proceso individual, cabe preguntarse si existen sensaciones auditivas que obedezcan a reglas universales, independientes de los oyentes. Las experiencias muestran que muchos sujetos, con sus diferencias de carácter individual, dan respuestas idénticas o semejantes a determinados estímulos. Estas respuestas son pues predecibles y permiten un amplio márgen de actividad en los temas objeto de estudio de la Psicoacústica, que forzosamente ha de recurrir en sus trabajos a medidas de tipo estadístico.

No es necesario resaltar la importancia del sonido en la vida del hombre, pues es algo de todos conocido; baste recordar que la palabra no sólo es la fuente de información más completa de cuantas existen, sino que también es básica en la vida de relación y afectiva. Además el hecho de estar inmersos en un mundo sonoro desde nuestro nacimiento, hace que lo consideremos factor básico en nuestro entorno ambiental. También que lo rechacemos cuando se presenta en su aspecto negativo, es decir en forma de ruido.

De una manera general, podemos decir que la Psicoacústica incluye fundamentalmente el proceso de la comunicación en sus fases de:

| EMISION | → | MEDIO | → | RECEPCION |

TIPOS DE SEÑAL	CAMPO ACUSTICO	FUNCIONES FISIOLIGICAS	INSTALACIONES ESPECIFICAS	INSTRUMENTACION ESPECIFICA	OTROS CAMPOS	TECNICAS DE MEDIDA ESPECIFICAS	LEGISLACION Y NORMATIVA
Tonos puros	Libre	Fonación	Cámara Anecoica	Audiómetro	Electroacústica	Audiometría	Legislac. Locales
Palabra	Difuso	Audición	" Reverberante	Sonómetro	Fonética (test inteligibilidad	Inteligibilidad de la palabra	" Nacionales
Música		Otros procesos	Cabinas audiometricas	Dosímetro			Normas UNE
Ruido Blanco				Espectrografo de sonido	Psicología (encuestas y estudios sobre efectos de las señales acústicas	Calibración auriculares	" CEI
" Rosa				Oído artif.		Impedaciometría	" ISO
" Industrial				Filtros			
" Tráfico				Instrum. de rehabilitación de la palabra y la audición	Medicina	Calibración de audifonos	
						Atenuación protectores auditivos	
						Enmascaramiento	

Cuadro esquemático general de los elementos a tener en cuenta en Psicoacústica

El sonido

Es un movimiento vibratorio de las partículas del aire o de otro medio elástico, que puede producir sensación de audición al llegar al oído.

Contrariamente a las ondas electromagnéticas necesita un medio para propagarse; no se propaga en el vacío. Requiere por tanto la existencia de una fuente sonora, un medio en el que propagarse y un receptor.

Considerado en un punto determinado, el sonido es una variación rápida, alrededor de un valor constante, de la presión del medio en dicho punto, y se puede definir como toda variación de presión (en el aire, agua, etc.) que pueda ser detectada por el oído humano.

Puesto que la energía acústica resulta de vibraciones mecánicas que hacen que las partículas del medio se muevan fuera de su posición de reposo, podemos afirmar que se trata de una forma de **energía mecánica.**

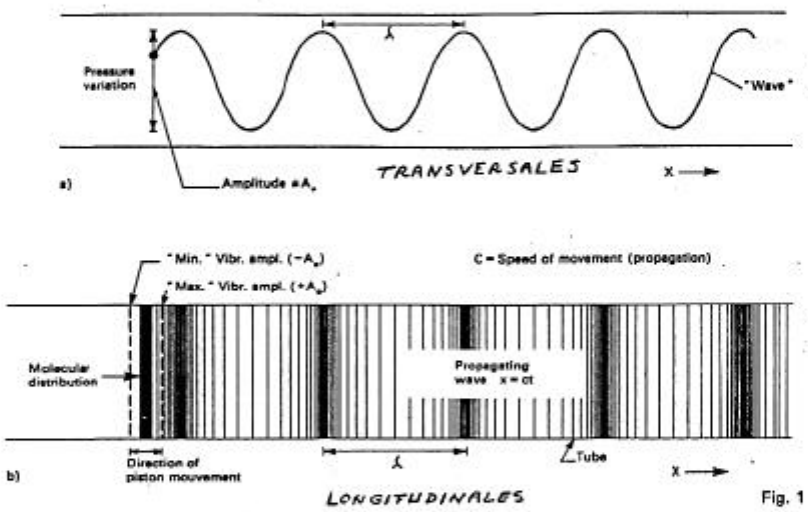


Fig. 1

Se propaga en los fluídos por ondas longitudinales (las vibraciones se producen en la misma dirección que la propagación de la onda) y en los sólidos por ondas transversales (las vibraciones se producen en dirección perpendicular a la propagación de la onda), Figura 1.

Clases de perturbaciones acústicas

Las perturbaciones acústicas pueden ser periódicas como por ejemplo, los tonos puros y no periódicas, como es el caso de la palabra o el ruido

El caso más simple de oscilación periódica es el de un movimiento armónico simple, que es el representado en la figura 2. Su función matemática es:

$$P = A \text{ sen } \omega t$$

donde $\omega = 2\pi F$

P = presión sonora instantánea

A = Amplitud de la vibración

t = tiempo

f = frecuencia

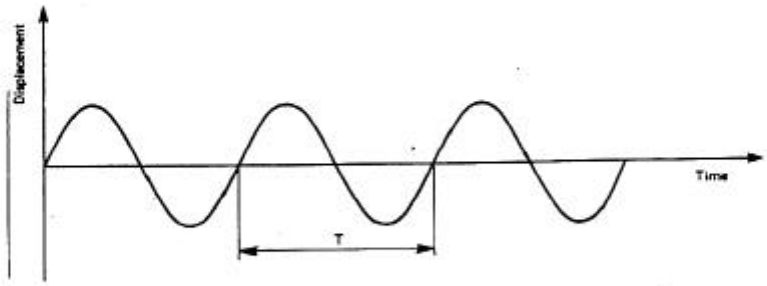


Fig.2

Se llama longitud de onda λ a la distancia recorrida por un frente de onda en un periodo completo de oscilación

$$\lambda = cT \quad ; \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

donde c es la velocidad de propagación.

La frecuencia de excitación viene dada por:

$$f = \frac{1}{T}$$

donde T es un periodo completo de la oscilación.

Los tonos puros pueden sumarse (Fig. 3)

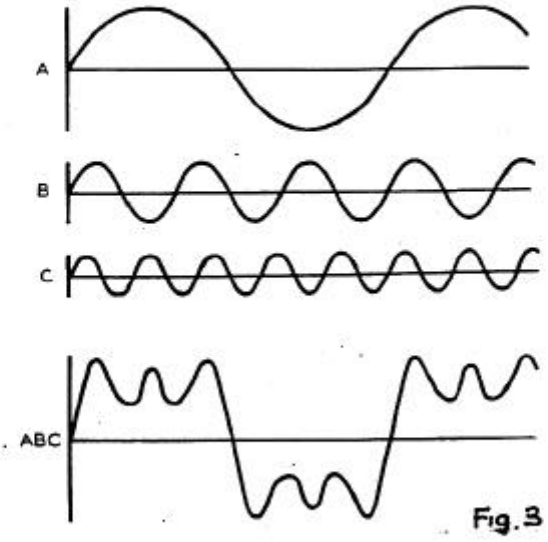


Fig.3

Inversamente, cualquier función que dependa de la presión y del tiempo, se puede descomponer en suma de tonos puros, según la teoría de Fourier.

Intensidad acústica·

La intensidad acústica de una onda de presión en un punto del espacio, es el valor medio por unidad de tiempo del flujo de energía acústica, transmitida a través de la unidad de superficie normal a la dirección de propagación de la onda.

Es decir, viene medida por la energía media transmitida por la onda en la unidad de tiempo por centímetro cuadrado, del frente de onda.

Se puede definir por el ritmo al cual la energía mecánica fluye a través de la unidad del área perpendicular a la dirección de propagación.

Dada una fuente omnidireccional radiando en un medio isótropo, la intensidad acústica I, en un punto situado a una distancia r de la fuente será:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \qquad (1)$$

W es la potencia acústica que emite la fuente

$4\pi r^2$ es el área de una esfera de radio r, centrada en la fuente omnidireccional; es la superficie esférica a través de la cual fluye la energía sonora

W	ergios/seg. cm^2	watios
r	cm	cm
I	ergios/seg.cm^2	watios/cm^2

De la ecuación (1) se desprende que si el sonido no está obstaculizado por ningún objeto, la intensidad acústica varía de acuerdo con la inversa del cuadrado de la distancia.

En el caso en que la fuente sonora esté generando una presión sonora P que se superponga a la ambiental:

$$W = \frac{p^2 4.\pi r^2}{\rho\ c} \qquad (2)$$

De las ecuaciones (1) y (2) se deduce I, que relaciona la presión y la intensidad de energía acústica en un punto para una onda esférica que se propaga libremente.

ρ = densidad del medio

c = velocidad de propagación del sonido

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

El producto ρc se denomina impedancia acústica o de radiación del medio. Se mide en ohmios acústicos.

Presión acústica.

Ya se dijo anteriormente que en un punto determinado del aire, el sonido es una variación rápida de la presión en ese punto, alrededor de un valor constante.

Al existir perturbación sonora la presión atmosférica instantánea variará a lo largo del tiempo, en fluctuaciones alrededor del valor medio fijado por la presión atmosférica en el mismo lugar cuando no existe sonido. Las fluctuaciones instantáneas de presión reciben el nombre de presión acústica.

Estas variaciones de presión se propagan de una partícula a otra del medio, desde el origen de la perturbación.

El sistema auditivo del hombre capta presiones que van desde 2.10^{-5} New/m^2 o Pascal hasta 200 New/m^2.

Expresión logarítmica de variables acústicas. El decibelio.

Son varias las razones que aconsejan el uso de escalas logarítmicas en Acústica. Dado el enorme márgen de valores que cubre el sistema auditivo humano, tanto en intensidades, frecuencias y presiones, sería necesario manejar cantidades desmesuradas, y esto se evita recurriendo a escalas logarítmicas.

Recordemos que el oido aprecia frecuencias del orden de 20 Hz a 20.000 Hz; que es sensible a presiones desde 2.10^{-5} N/m^2 hasta 200 N/m^2 y que soporta intensidades desde 10^{-2} W/m^2, hasta 100 W/m^2.

Por otra parte sabemos que el organismo humano tiene aproximadamente una respuesta logarítmica a los estímulos que recibe. (Según la **ley de Weber-Fechner).**

$$\Delta S = k \log \Delta W$$

Si el estímulo crece en progresión geométrica de razón 10, la sensación lo hace en razón aritmética de razón 1.

Por todo lo dicho anteriormente, las relaciones entre variables acústicas se suelen expresar en una escala logarítmica.

El belio es la división fundamental de una escala logarítmica utilizada para expresar la relación de dos medidas de potencia. El número de belios que expresan dicha relación se define como el logaritmo decimal del cociente de las dos cantidades. Si W_1 es la potencia que se considera, W_0 es una potencia de referencia y N es el número de belios que representa la relación W_1/W_0, tendremos:

$$N = \log \frac{W_1}{W_0} \quad \text{(belios)}$$

Si W_1 es 10 veces mayor que W_0, la relación W_1/W_0 será 1 belio. Por razones prácticas se usa el decibelio (dB) que es la decima parte del belio. La relación anterior se escribirá:

$$N = 10 \log \frac{W_1}{W_0} \text{ (dB)}$$

donde N es el número de decibelios.

Como las intensidades acústicas son directamente proporcionales a las potencias acústicas que las producen, se dice que en un punto el nivel de intensidad es de N decibelios cuando cumple la relación:

$$N = 10 \log \frac{I_1}{I_0} \text{ (dB)}$$

En el caso de comparar presiones P_1 y P_0 generadas por dos potencias W_1 y W_0 tendremos:

$$W_1 = P_1^2 \frac{4\pi r^2}{\rho c}$$

$$W_0 = P_0^2 \frac{4\pi r^2}{\rho c}$$

Por tanto $$\frac{W_1}{W_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2$$

luego $$N = 10 \log \frac{W_1}{W_0} = 20 \log \frac{P_1}{P_0} \text{ (dB)}$$

Es decir que si la relación de presiones acústicas se expresa en dB, el valor será 20 veces el logaritmo del cociente de ambas.

Como valores de referencia se han tomado las siguientes cantidades:

$W_0 = 10^{-12}$ watios

$I_0 = 10^{-12}$ watios/m^2

$P_0 = 2.10^{-5}$ pascal o 2.10^{-4} μbar

Campos acústicos

El tipo de campo acústico en que se desarrollan los procesos de emisión, propagación y recepción sonoras tienen influencia en dichos procesos y ha de ser conocido.

Decimos que existe un campo acústico libre cuando el sonido en su propagación, no es obstaculizado por ningún objeto, cumpliéndose la relación

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

es decir que la intensidad varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia. Esto ocurre en grandes espacios abiertos, libres de superficies reflectantes.

En laboratorio se consiguen condiciones de campo libre en el interior de cámaras anecoicas, cuyas paredes están recubiertas interiormente de materiales absorbentes a la energía acústica, evitando que se produzcan reflexiones.

Este tipo de campo se utiliza en la calibración de audífonos y protectores auditivos y en gran número de ensayos subjetivos tales como: pruebas de inteligibilidad, localización de fuentes sonoras, enmascaramiento, pruebas de audiometría protésica, etc...

No obstante, existen factores que afectan a la transmisión ideal del sonido, como son la absorción (conversión de energía mecánica en energía térmica), la reflexión (se produce cuando existen obstáculos que impiden la propagación), el scattering o dispersión del sonido en todas direcciones, que aparece cuando los obstáculos son mayores o de tamaños comparables a la longitud de onda radiada.

Es el caso de emisión en un recinto cerrado y da lugar a lo que se denomina **campo difuso.** Se define como el campo acústico en que existen gran número de ondas reflejadas que provienen de todas las direcciones y que al combinarse dan lugar a que exista una densidad media de energía uniforme en cualquier punto del campo. Las condiciones más aproximadas de este tipo de campo se obtienen en las llamadas cámaras reverberantes.

Espectro de un sonido.

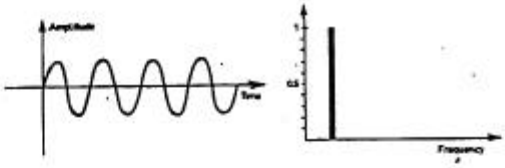
Se denomina espectro de un sonido a la representación de la amplitud de la presión acústica en función de la frecuencia correspondiente en un instante dado.

En la figura 4 están representados los tipos de espectros correspondientes a tres tipos característicos de perturbaciones acústicas: tonos puros, funciones periódicas, y sonidos no periódicos formados por un número infinito de frecuencias.

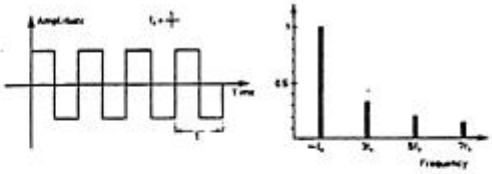
Recordemos que los tonos puros son los que resultan de vibraciones sinusoidales. Sin embargo la mayoría de los sonidos corrientes son de naturalezas más compleja porque presentan componentes de varias frecuencias y generalmente de todas las frecuencia de la gama acústica. Por ejemplo, cuando los sonidos están producidos por instrumentos musicales, aunque exista una frecuencia predominante, se manifiestan otras que presentan una relación armónica con la fundamental y confieren al sonido del instrumento su carácter propio. Al espectro de este tipo de sonidos, por su configuración de le denomina "espectro de líneas".

Sonidos tan significativos como la palabra, ruidos, etc... son aperiódicos y su espectro se denomina espectro contínuo.

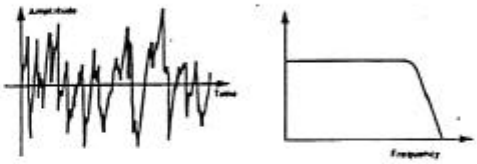
El espectro de frecuencias se subdivide en bandas. La **octava**, muy empleada en Acústica, representa la banda de frecuencias existente entre dos frecuencias f_1 y f_2 si se verifica que $f_2 = 2f_1$. Para el análisis de ruidos con mayor detalle se emplean las bandas de **media octava** y de **tercio de octava**. En este último caso las frecuencias centrales están en la relación $\sqrt[3]{2}$ a 1 por lo que tres bandas contiguas forman una banda de octava.



Espectro sonoro de un tono puro



Espectro sonoro de una función periódica



Espectro contínuo

Fig. 4

Magnitudes psicofisiológicas.

A las características físicas de una onda sonora que son: intensidad, frecuencia y forma de onda (armónicos), corresponden otras denominadas psicofisiológicas, que tienen su origen en el aspecto subjetivo que introduce la persona mediante su mecanismo de la audición.

Magnitudes físicas	Magnitudes psicofisiológicas
Intensidad	**Sonoridad**
Frecuencia	**Altura tonal**
Forma de onda	**Timbre**

En general esta correlación de los dos tipos de magnitudes no es biunívoca, sino que por ejemplo, la sonoridad depende también de la frecuencia y de la forma de onda. La altura tonal depende fundamentalmente de la frecuencia, pero también de la intensidad, etc...

Gráficas de Wegel.

Si se hace escuchar a una persona un sonido de una frecuencia determinada y con una intensidad creciente a partir de 0 dB, habrá un instante en que su oído empiece a percibir el sonido. Se trata de su umbral de audición mínimo para dicha frecuencia.

Si seguimos aumentando la intensidad, llegará un momento en que la sensación será de dolor. Hemos llegado al umbral de audición máximo. Es justamente en el instante de haber pasado dicho umbral cuando la vibra-

ción acústica deja de percibirse en forma de sonido y se tiene una sensación dolorosa.

Repitiendo esta experiencia en toda la escala tonal, obtendremos las denominadas gráficas de Wegel en las que se expresan, en ordenadas, la intensidad en decibelios y, en abscisas, la frecuencia en hertzios (Hz), Fig. 5

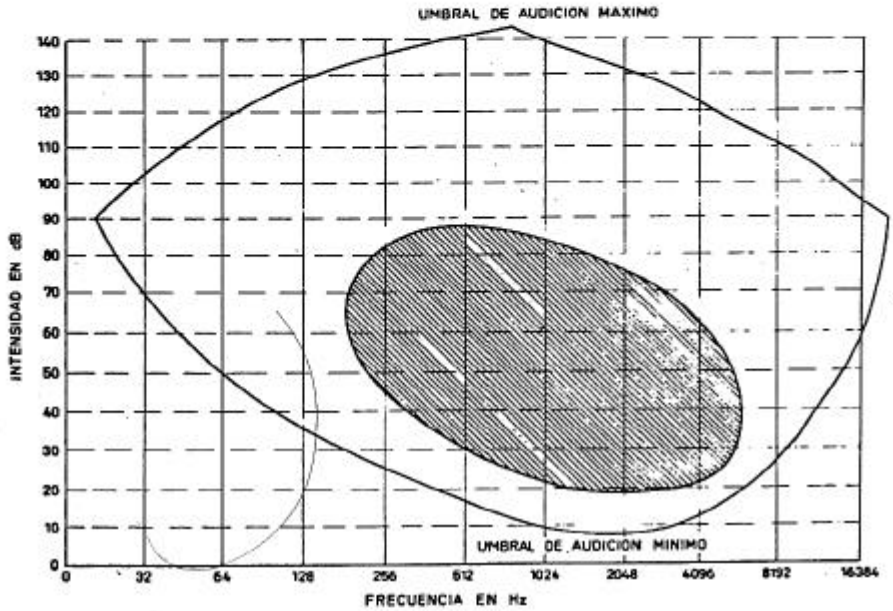


Fig. 5

En estas curvas podemos destacar:

1º) Umbral de audición mínima, que es una curva casi parabólica, con una zona óptima para las frecuencias comprendidas entre 1000 Hz y 2000 Hz.

2º) Umbral de audición máxima, curva también aproximadamente parabólica con una zona óptima entre las frecuencias comprendidas entre 1000 Hz y 2000 Hz.

Ambas curvas se unen en sus extremos, en las frecuencias bajas alrededor de 16 Hz y en las altas para 18000 Hz. Delimitan una superficie que es la correspondiente al campo auditivo. Si una vibración acústica está situada fuera de esta superficie no será percibida por el oído, pues se tratará de un infrasonido o de un ultrasonido.

Zona conversacional.

En las curvas de Wegel podemos observar una zona rayada que es la correspondiente a la zona conversacional por incluir las frecuencias que integran la palabra; en ella es necesario que la audición sea correcta para una buena comprensión del lenguaje.

Vemos que dicha zona se corresponde con la parte más sensible del campo auditivo, extendiéndose en cuanto a frecuencias desde 250 Hz a 4000 Hz, con un máximo de utilización de 1000 Hz a 2000 Hz. Respecto a la intensidad, sabemos que la palabra se emite entre 30 y 70 dB.

El que la zona correspondiente a la palabra sea más restringida que todo el resto del campo auditivo, hace que la audiometría vocal tenga limitaciones para explorar todo el campo auditivo. De ahí la complementariedad de ambos tipos de audiometría: vocal y tonal.

Sonoridad.

Si indicamos anteriormente la conveniencia de adoptar el decibelio como unidad más adecuada para definir las variaciones de intensidad, potencia, o presión de un sonido, dicha unidad es insuficiente para caracterizar la verdadera "capacidad" o "agudeza" del comportamiento de nuestro oído. Se trata de tener en cuenta el efecto simultáneo y complejo de la intensidad y de la frecuencia al considerar el fenómeno sonoro.

De una manera intuitiva podemos definir la sonoridad como la "intensidad subjetiva"; es decir de la manera de cómo le "suena" a un oyente un sonido o un ruido.

Mediante ensayos subjetivos, Fletcher y Munson y a continuación Robinson y Dadson, (1956), calcularon las llamadas curvas de igual sonoridad o de igual sensación sonora (Fig.6).

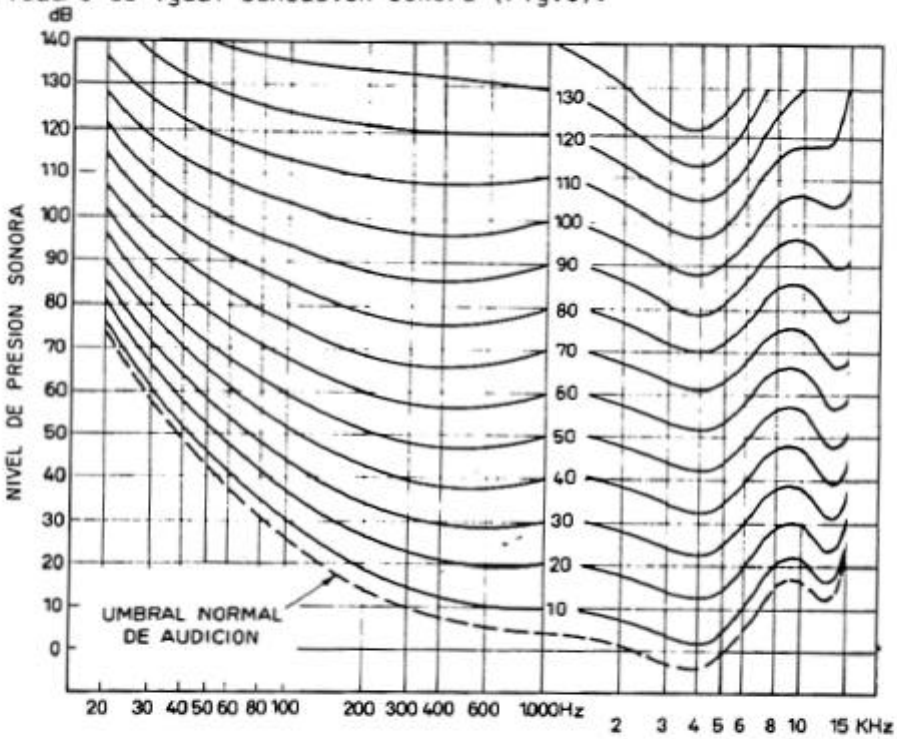


Fig.6.- Curvas isofónicas de Robinson y Dadson.(ISO R 226)

En ordenadas se indica el nivel de presion sonora y en abscisas las frecuencias de los tonos puros percibidos por el oído. Este conjunto de curvas forman un haz cuyos dos extremos son la curva de 0 fonios

que representan el umbral mínimo de percepción sonora y la curva correspondiente a sensaciones dolorosas. Las curvas unen puntos de igual sensación sonora correspondiendo a cada una un número de fonios igual al nivel de presión sonora en decibelios a 1000 Hz.

Niveles inferiores a 80 fonios requieren más energía en las frecuencias bajas y en las altas, que en las frecuencias medias, para producir una misma sensación sonora, siendo la respuesta aproximadamente plana a partir de los 80 fonios.

El máximo de sensibilidad aparece a los 3000 Hz, aproximadamente, frecuencia que corresponde a la de resonancia del conducto auditivo externo.

Las curvas representadas en la figura 6 proporcionan la definición subjetiva de fonio, como unidad sin dimensiones utilizada para caracterizar el nivel de igual sonoridad de un sonido o un ruido.

Se dice que el nivel de sonoridad de un sonido o un ruido es de n fonios cuando a juicio de un oyente normal, la sensación auditiva producida, es equivalente a la de un tono de 1000 Hz continuo que incide frente al oyente en forma de onda plana libre, progresiva y en el que el nivel de presión acústica es de n dB superior a la presión de referencia P_0 (Norma UNE 74010, 1976).

Pero los fonios no son lineales: 80 fonios no es el doble de dos sonidos de 40 fonios, por lo que se ha introducido la escala de sonios, de forma que la medida en sonios de un sonido, crezca proporcionalmente con la aparente sensación de sonoridad.

La sonoridad en sonios viene dada por la expresión:

$$S = 2^{\frac{L_N - 40}{10}}$$

donde L_n es el nivel de sonoridad en fonios.

Esta fórmula está representada en la figura 7 y se observa que a 40 fonios corresponde un sonio, duplicándose el número de sonios para cada 10 fonios. Ahora, la sonoridad de 20 sonios es el doble de la sonoridad de 10 sonios.

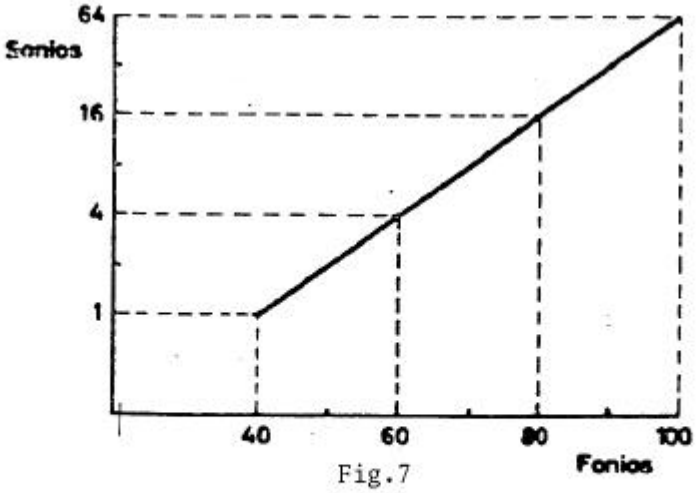


Fig.7

Relación entre Sonoridad y Nivel de Sonoridad

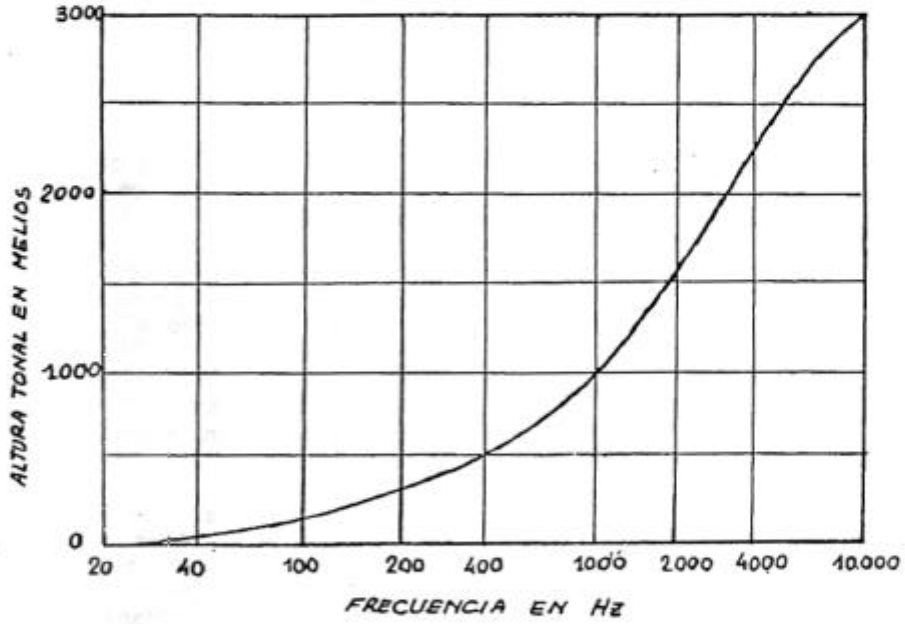
Todo lo dicho anteriormente es válido para tonos puros. En el caso de ruido estas unidades se aplican a través de métodos de cálculo laboriosos en los que hay que tener en cuenta no sólo la respuesta del oído, sino también los fenómenos de enmascaramiento y las bandas críticas. Estos métodos serán descritos más adelante.

Actualmente y como una simplificación de la medida de la sonoridad se utiliza el nivel sonoro en decibelios A, medidos con un sonómetro que incorpora la red de compensación A, similar a la respuesta del oído para la curva isofónica de 30 fonios.

Altura tonal.

Es la característica subjetiva del sonido, que depende fundamentalmente de la frecuencia, pero también de la intensidad y de la forma de onda. Nos permite ordenar los sonidos de "bajos" a "altos" como podemos hacerlo en una escala musical.

Por ejemplo un tono de 100 Hz a 50 dB tiene una altura mayor que el mismo tono de 100 Hz a 70 dB, independientemente de que la frecuencia permanezca constante. Este cambio de la altura con la sonoridad es más acusado para frecuencias bajas. Para frecuencias situadas entre 1000 Hz y 5000 Hz, la altura de un tono es relativamente independiente de su sonoridad.



Relación entre la altura tonal y la frecuencia.

Fig.8.

La unidad de altura tonal es el melio. Por definición un tono puro de frecuencia 1000 Hz y 40 dB (referidos al umbral de audición) produce una altura de 1000 melios.

En la figura 8 está representada, para una sonoridad de 60 fonios, la relación subjetiva entre altura y frecuencia, a partir de la hipótesis de que a un tono de 1000 Hz y 60 fonios le corresponde una altura de 1000 melios.

Timbre.

En un sonido musical y por extensión en todo ruido, el timbre es la característica subjetiva que distingue dos tonos con la misma intensidad y frecuencia fundamental pero diferente forma de onda.

Por el timbre se distingue el violín de la trompeta, por ejemplo cuando ambos tocan la misma nota y al mismo nivel.

Enmascaramiento.

Cuando un sonido se hace menos audible por la acción de otro sonido hay un efecto de enmascaramiento.

El enmascaramiento se define como el número de decibelios que se eleva el umbral de audición para un sonido (enmascarado) en presencia de otro (enmascarador).

Podemos comprobar en ocasiones, cuando hay un grupo de personas que hablan en presencia de un ruido, por ejemplo de tráfico, que es posible distinguir lo que cada una de estas personas dice. Sin embargo, si este ruido de fondo es muy intenso, hay un punto en que el ruido existente enmascara la voz que deseamos escuchar. El efecto de enmascaramiento supone una excepción de nuestra capacidad de extraer, dentro de un sonido complejo, lo que queremos oír.

Hay que resaltar que no debe confundirse el efecto de enmascaramiento con la fatiga auditiva. Esta se produce cuando un sonido hace menos audible otro, al que precede en el tiempo.

Las pruebas de enmascaramiento se han obtenido generalmente para audición monoaural. El enmascaramiento de un sonido aplicado a un oído por un enmascarador aplicado en el otro oído es siempre cuantitativamente mucho más reducido.

Los factores de que depende el fenómeno de enmascaramiento son: **la intensidad** del sonido enmascarador, su **composición espectral**, y las **frecuencias** correspondientes del sonido enmascarado y del enmascarador.

Entre las experiencias más notables llevadas a cabo en laboratorio, citaremos las siguientes:

Enmascaramiento de un tono puro por otro tono puro.

En estas experiencias se ha observado:

1) El efecto de enmascaramiento será mayor cuando las frecuencias de ambos tonos estén más próximas.

2) Un tono enmascarador de una frecuencia dada, enmascara tonos de frecuencias más altas y mucho menos los de frecuencias más bajas.

3) El enmascaramiento es un fenómeno esencialmente monoauditivo.

4) Si evaluamos cómo varía la intensidad del tono enmascarado en función de la correspondiente al enmascarador, siendo éste progresivamente creciente, este aumento es lineal, mientras las dos frecuencias están próximas y se hace más complejo cuando son claramente diferentes.

Por otra parte, cuando el sonido enmascarado tiene una intensidad que hace que ambos sean simultáneamente oídos, su superposición da lugar a fenómenos complejos, tales como batidos.

Enmascaramiento de un tono puro por un ruido blanco.

a) Teniendo el ruido enmascarador una intensidad determinada, el umbral de audición del tono en función de la frecuencia pasa por dos fases: (1) por debajo de 500 Hz, la curva es prácticamente horizontal; el umbral no varía. (2) por encima de 500 Hz, el umbral crece a razón de 10 dB cuando la frecuencia se multiplica por 10 (4 dB/oct).

b) Este enmascaramiento será cada vez más importante siempre que la densidad espectral del ruido vaya siendo elevada.

Ocurre que si se aplica un ruido cuya densidad de intensidad sea constante hasta 500 Hz, y después se atenua de forma proporcional a la frecuencia (10 dB para 10 kHz) se obtendrá un "ruido uniformemente enmascarador", realizando esta vez con un tono puro, una curva de enmascaramiento perfectamente horizontal en el conjunto del márgen frecuencial.

Enmascaramiento por ruido de banda estrecha.

Desde 1940 Fletcher había constatado que en el enmascaramiento de un tono por un ruido blanco, son solamente las frecuencias situadas alrededor de la del tono, las únicas eficaces. Esto puede observarse en la figura 9.

Dado un sonido enmascarador, constituído por un ruido de banda estrecha, por ejemplo 1000 Hz de ancho de banda 160 Hz, la intensidad del tono exactamente perceptible presenta un máximo muy acentuado para la frecuencia central; a partir de este máximo las curvas de efecto enmascarador decrecen rápidamente hacia las frecuencias bajas; para las altas frecuencias, esta pendiente es mucho más atenuada y depende estrechamente de la intensidad del ruido enmascarador.

Se ha impuesto progresivamente la noción de que el ancho mínimo de frecuencia Δf susceptible de enmascarar una determinada frecuencia central f tenía una significación fisiológica, relacionada con la facultad de discriminación de la cóclea. Así se ha definido la **banda crítica** Δf_c, anchura frecuencial mínima.

Diversos autores se han dedicado a medir la anchura de esta banda crítica, entre los que destaca Zwicker, que ha introducido la unidad denominada **Bark.** (Breite Kopplung = ancho de acoplamiento).

El interés de esta unidad es que representaría a lo largo de la cóclea, y según el lugar ocupado, la anchura correspondiente de la banda crítica. De este modo la curva de sonoridades en función de la frecuencia tiene un máximo de 24 Barck, para los 32 mm de la membrana basilar. (1 Barck = 1,3 mm)

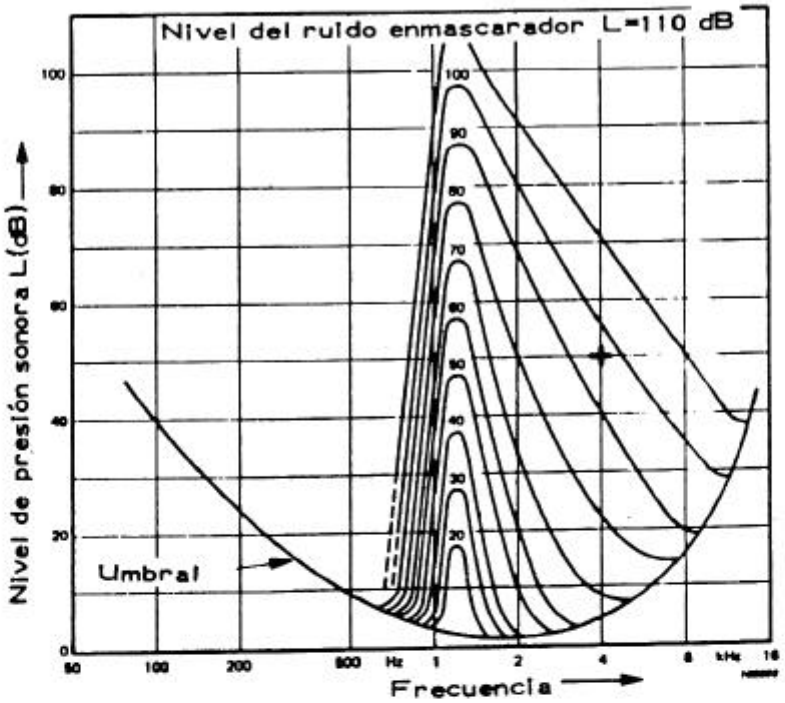


Fig.9

Filtros analizadores.

El conocimiento del espectro de frecuencias de un ruido o de un tono complejo puede ser muy valioso, sobre todo cuando se trata de localizar la amplitud y frecuencia de una componente determinada de dicho ruido.

Para conocer el espectro de frecuencias de un ruido o de cualquier sonido complejo estacionario se emplean filtros o analizadores pasa banda, con ancho de banda de octava, tercio de octava o incluso de bandas más estrechas. (10%, 6%, 3%, 1%). Cuando más entrecha sea la banda, se logrará una mayor información en el análisis.

Sonoridad de ruidos.

Cuando se trata de calcular la sonoridad de un ruido, como puede ser en el caso de ruidos industriales y dada la variedad y complejidad de sus espectros, no es posible aplicar el procedimiento empleado en el caso de tonos puros.

Aunque actualmente, y como simplificación de la medida se utiliza el decibelio A, por la buena correlación con la respuesta del oído, vamos a describir de una forma resumida, los dos procedimientos clásicos del cálculo de la sonoridad, que son el propuesto por S.S. Stevens y el de E. Zwicker, que son los recomendados por la ISO.

Ambos procedimientos se diferencian entre sí por las hipótesis y simplificaciones que establecen. Como decíamos anteriormente, aunque no se usan actualmente han dado lugar con sus aportaciones a conceptos tan importantes para la investigación como las bandas críticas y las relaciones de enmascaramiento.

Método de S.S. Stevens.

La hipótesis establecida por Stevens incluye: ruidos continuos y con frecuencias de ancho espectro, campo difuso y, en cuanto a audición, un auditorio estadísticamente normal.

Los resultados obtenidos están resumidos en la figura (10), en ella están representadas las curvas de igual "índice de sonoridad" en función de la frecuencia de las distintas bandas de ruido.

Estas curvas fueron determinadas a partir de valoraciones subjetivas de sonoridad por un auditorio típico, atribuyendo a cada banda de ruido, de ancho 1/3 de octava, según su nivel y frecuencia, un valor de sonoridad (índice de sonoridad), por comparación con una banda patrón de ruido. En el gráfico podemos observar, como ya lo hicimos en las curvas de Robinson y Dadson, la no linealidad del oído con respecto a la frecuencia y al nivel.

La sonoridad viene dada por la fórmula:

$$S_T = S_{max} + F(\Sigma S - S_{max})$$

donde:

$S_{máx}$ = índice de sonoridad máximo.

S_T = sonoridad total en sonios.

ΣS = suma de todos los índices de sonoridad.

F es un factor de reducción que depende del tipo de análisis y corresponde a la inserción del efecto de enmascaramiento. Se deduce al considerar con gran aproximación que éste sólo afecta a bandas contiguas y su efecto es constante a lo largo del espectro audible. El valor de F es:

F = 0,15 para análisis de 1/3 de octava.
F = 0,2 " " de 1/2 de octava.
F = 0,3 " " de 1 octava.

Después de determinar la sonoridad en sonios, el valor en fonios puede determinarse en la porción derecha de la figura (10). Los valores correspondientes al índice de sonoridad a 1000 Hz pueden encontrarse en la Norma UNE 74-014-78 y, en su anexo A, los que corresponden a las frecuencias: 31,5; 63; 125; 250; 500; 2000; 4000 y 8000 Hz.

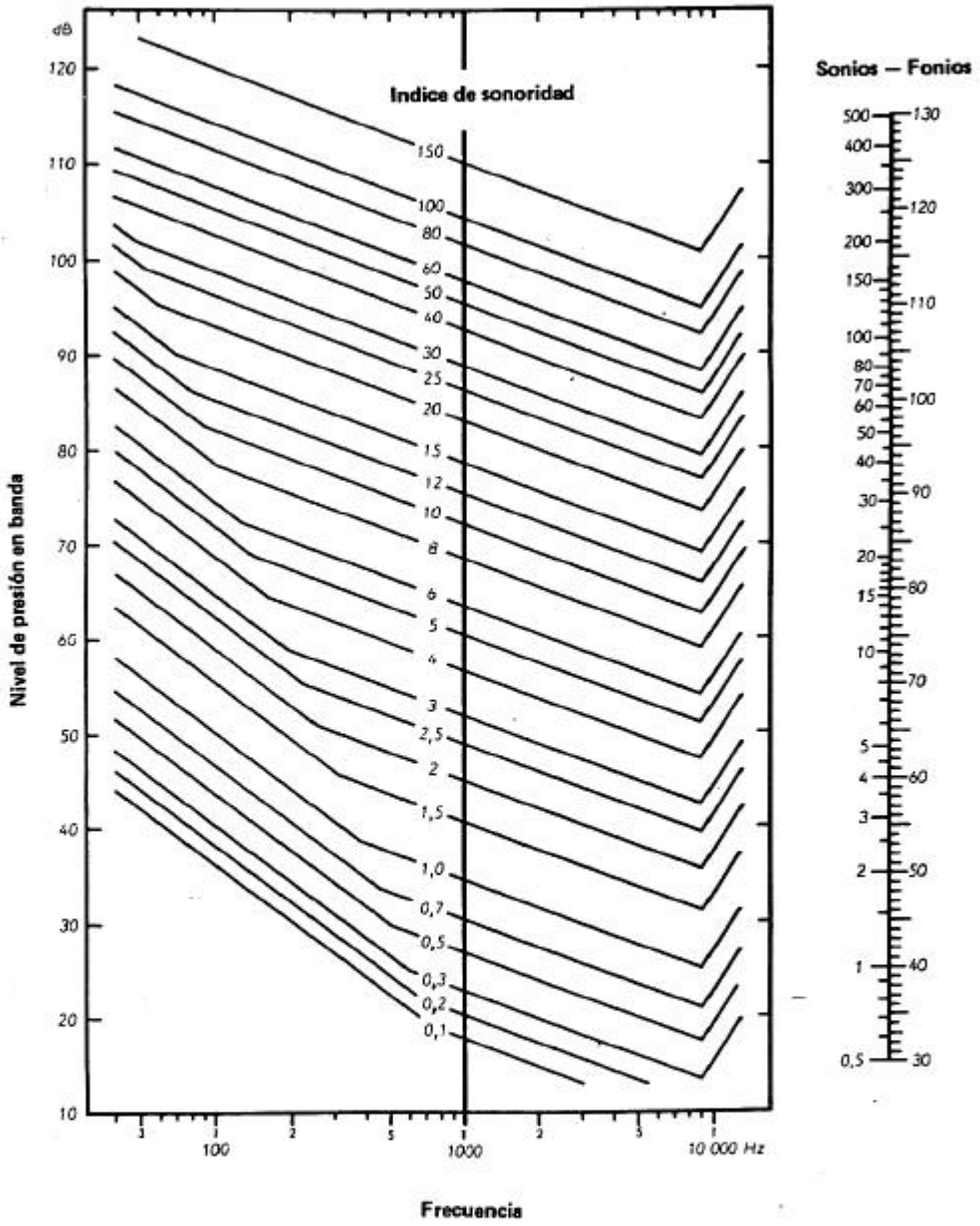

dB
Indice de sonoridad
Sonios — Fonios
Nivel de presión en banda
Frecuencia
100
1000
10 000 Hz

Fig.10

El valor del índice de sonoridad es constante a lo largo de una recta de pendiente 3 dB/octava. Por encima de 9000 Hz la pendiente es de 12 dB/octava. Por debajo de una cierta frecuencia la pendiente es de -6 dB/octava. Las frecuencias para las cuales tiene lugar este cambio de pendiente se encuentran en una recta que tiene una pendiente de -21 dB/octava y que pasa por el punto correspondiente a 1000 Hz y 10 dB de nivel de presión de banda.

Método de Zwicker.

El método propuesto por E. Zwicker se basa en la distribución de la zona audible del espectro, en "grupos de frecuencia" deducidos de consideraciones psicofisiológicas, comprobadas con medidas subjetivas en los laboratorios de la Escuela Técnica de Stuttgart. Estos "grupos de frecuencia" o "bandas críticas" se aplican a un método gráfico que puede ser utilizado tanto para ruidos de un ancho espectro en frecuencias, como para ruidos con frecuencias predominantes

Sabemos que un tono puro, en campo libre, está determinado por su intensidad y por su frecuencia. Si se trata de un ruido es preciso dar también la densidad de intensidad $I' = dI/df$ y la anchura de banda Δf en que se ha hecho la medida.

Zwicker determina el Δf mínimo necesario para dar un conocimiento completo del ruido. Las medidas realizadas sobre un número elevado de oyentes, demostraron que existe un Δf variable para el que el oído da la misma sonoridad, que depende sólo de la intensidad de los tonos elegidos y no de su frecuencia.

Desde el punto de vista de la audición se puede pues considerar dividido el intervalo de frecuencias audibles en "grupos de frecuencia" de anchura Δf_G, alrededor de cada frecuencia central, existiendo una correspondencia entre el ancho de los grupos de frecuencia y la distribución de frecuencias en la membrana basilar: a cada grupo de frecuencia le corresponde una longitud de 1,3 mm en dicha membrana, con lo cual los 32 mm de longitud de la membrana basilar quedan divididos en 24 Bark (1 Bark = 1,3 mm; Bark = Breite Kopplung = ancho de acoplamiento).

Consecuentemente, el análisis de un ruido debería hacerse en bandas de "grupos de frecuencia", pero al no existir filtros de grupos de frecuencia y, como las bandas de tercio de octava coinciden aproximadamente con dichos "grupos de frecuencia" a partir de los 300 Hz, siendo aquellas menores que éstas para frecuencias más bajas, el análisis de un ruido se puede hacer con gran aproximación en bandas de tercio de octava.

El método gráfico de Zwicker establece la distinción entre "campo libre" y "campo difuso" así como los grupos de frecuencia, teniendo en cuenta la corrección indicada para las inferiores a 300 Hz. Los cuatro primeros tercios se agrupan para formar el primer "grupo de frecuencia" (f_m =40, 50, 63, 80 Hz); las tres bandas siguientes forman el segundo grupo (f_m = 100, 125, 160 Hz) y por último las dos siguientes forman el tercero (f_m = 200, 250 Hz). Del 4º al 20º grupos de frecuencia, los niveles son los de las bandas de tercio de octava. La energía en cada grupo de frecuencia, es la suma de las energías de cada banda de tercio de octava.

La banda del máximo nivel de presión sonora determina el gráfico que se ha de utilizar, para que todos los niveles estén comprendidos en él; existen gráficos para niveles máximos de 110, 90, 70, 50 y 35 dB.

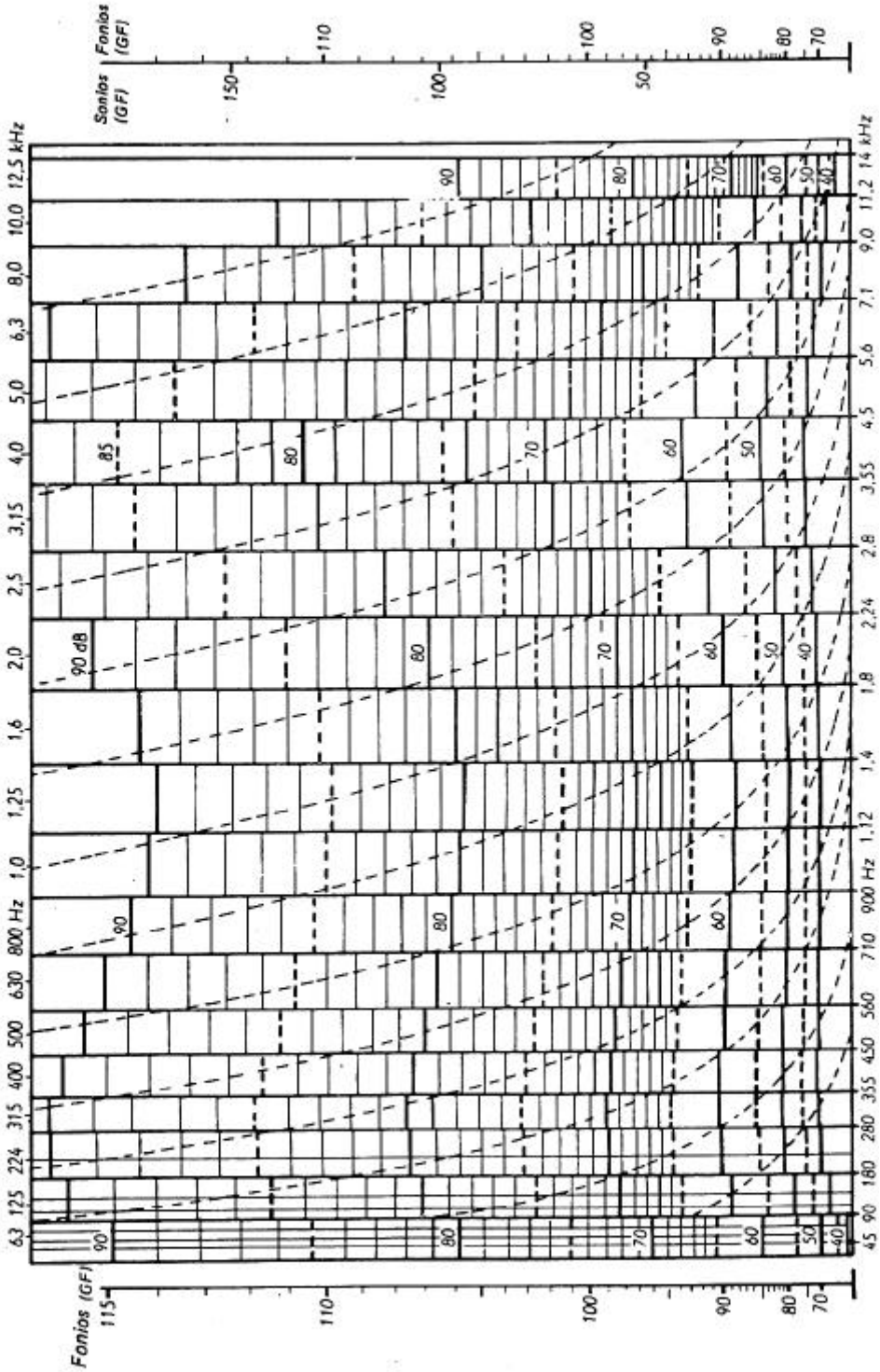

Fonios (GF)
Sonios (GF)
Fonios (GF)
63 125 224 315 400 500 630 800 Hz 1,0 1,25 1,6 2,0 2,5 3,15 4,0 5,0 6,3 8,0 10,0 12,5 kHz
45 90 180 280 355 450 560 710 900 Hz 1,12 1,4 1,8 2,24 2,8 3,55 4,5 5,6 7,1 9,0 11,2 14 kHz
90 dB

Fig. 11

Los datos obtenidos se inscriben en los gráficos que existen al efecto figura 11.

La descripción detallada del método puede consultarse en la norma UNE 74-014-78 y en las referencias que se citan.

Los valores de sonoridad obtenidos con ambos métodos no suelen coincidir, variando según la composición espectral del ruido. Esta razón, junto a lo laborioso de los procedimientos, especialmente el de Zwicker, hacen que prácticamente no se empleen; por otra parte ya indicamos anteriormente el uso del dB A para estos casos. Ahora bien, si tecnológicamente tienen poca aplicación, su valor es grande, por los conceptos aportados, al campo de la investigación.