# 1

# Percepción del sonido

El hecho de que un evento sonoro pueda ser percibido, presupone la existencia de una cadena sencilla de efectos. Una fuente sonora genera vibraciones de pequeña amplitud en el aire que la rodea y, debido a la compresibilidad y a la masa del aire, estas se propagan y llegan al oído del auditor.

Físicamente en este proceso ocurren pequeñas variaciones de la presión en el aire (u otro gas o fluido). A estas pequeñas variaciones de presión, que se combinan con la presión estática $p_0$, se les denomina presión sonora $p$. Esta magnitud, dependiente del tiempo y del espacio, es la magnitud acústica más importante. La radiación de la fuente produce un campo sonoro con una determinada distribución espacial, al que en cada instante de tiempo le corresponde una nueva presión instantánea.

El evento sonoro captado en un punto del espacio posee esencialmente dos características: Volumen y Tono. El volumen se relaciona con la magnitud física presión sonora $p$, y el tono con la frecuencia $f$. Esta última corresponde al número de períodos por unidad de tiempo y su unidad de medida es el Hertz (Hz). El rango de frecuencias de interés no está limitado solo al rango de la audición humana, el que se extiende aproximadamente desde los 16 $Hz$ hasta los 16,000 $Hz$ (16 $kHz$). El sonido por debajo de este rango de frecuencias se denomina *Infrasonido* y raramente juega un papel importante en fenómenos de propagación a través del aire, relacionándose más con las vibraciones de cuerpos sólidos (por ej. en problemas asociados a movimientos telúricos o sismos). Sobre el límite superior de la audición humana se ubica el *Ultrasonido*, que tiene aplicaciones tales como la técnica de modelos acústicos, técnicas de diagnóstico en medicina y ensayos no destructivos de materiales.

Los límites del sonido audible no pueden definirse con mucha precisión. El límite superior es diferente para cada individuo, dependiendo de factores como la edad, la exposición prolongada a sonidos intensos, tales como ruido en el trabajo o música con elevado volumen, etc. El límite superior de 16 $kHz$ está referido a una persona sana con una edad cercana a los 20 años y comienza a disminuir con la edad, más o menos a razón de 1 $kHz$ por cada diez años.

El límite inferior, que igualmente está establecido sólo de manera aproximada, determina el límite a partir del cual una secuencia discreta se empieza a percibir como continua. A frecuencias muy bajas se puede distinguir claramente entre una serie de eventos o sucesos (p. ej.: una secuencia de golpes). Al aumentar la frecuencia sobre los 16 $Hz$ (más o menos) los golpes parecen fundirse en un ruido de tipo continuo y ya no son captados como eventos discretos. Este cambio ocurre, por ejemplo, cuando comienza a llover: primero se oyen los golpes de cada gota sobre la ventana hasta que, para una cierta densidad de la lluvia, el ruido se transforma en un sonido continuo. El límite inferior en frecuencia para el sonido audible coincide más o menos con la frecuencia a partir de la cual una serie de cuadros de una película deja de captarse discretamente y se produce la sensación visual de un movimiento continuo.

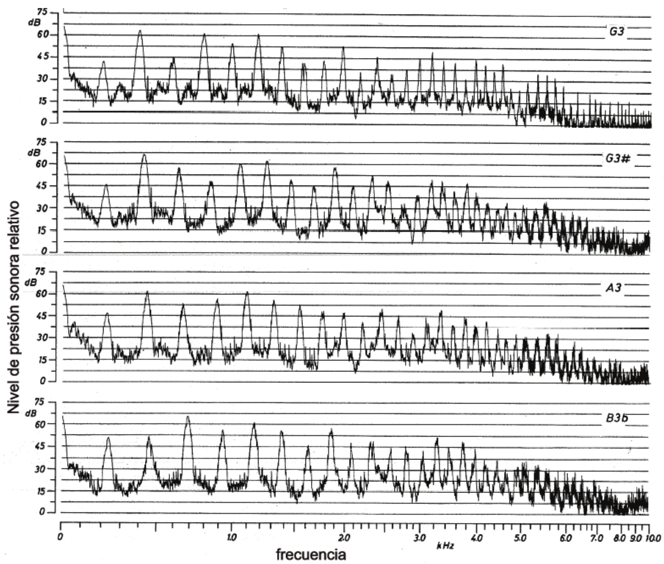


**Figura 1.1.** Espectros sonoros de un violín, niveles relativos versus frecuencia (de Meyer,J.: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt 1995)

En acústica el término *frecuencia* va unido al concepto de tono puro, entendido como una variación temporal de forma sinusoidal. Tal comportamiento puramente sinusoidal raramente se puede encontrar en los sonidos naturales. El sonido de un instrumento musical contiene muchos tonos; es el conjunto de armónicos (tonos puros) lo que define el timbre del instrumento (Ej. Figura 1.1). En general, cualquier función temporal se puede representar por el conjunto de frecuencias que contiene; así de manera análoga a la luz, la función puede subdividirse en su correspondiente espectro. Una señal arbitraria se puede representar mediante una suma de tonos puros (con diferentes amplitudes y frecuencias). Esta representación de las señales, como una mezcla de varias componentes de frecuencia, conduce a la idea de que el efecto acústico de un determinado elemento de transmisión (por ej. paredes en un edificio) puede describirse convenientemente mediante curvas de respuesta en función de la frecuencia. Si se conoce por ejemplo la curva de atenuación sonora correspondiente a una pared, se puede saber fácilmente el efecto que esa pared tendrá sobre la transmisión de un sonido cuyo espectro de frecuencia se conoce. Normalmente la atenuación es mayor en frecuencias altas que en bajas, de esta manera el sonido emitido por una conversación a un lado de la pared no solo se oirá menos intenso al otro lado, sino que además con otro timbre, debido a que las componentes de frecuencia han variado en distinta proporción.

La idea intuitiva de que una señal acústica arbitraria se puede representar mediante un conjunto de tonos puros, es suficiente para la comprensión de la mayor parte de los contenidos de este libro. En el capítulo 13 se explica detalladamente el fundamento matemático de la descomposición de una señal en un conjunto de tonos puros.

La sensibilidad del ser humano a la altura tonal es tal que se percibe la misma diferencia de altura entre dos pares de tonos cuando tienen la misma razón de frecuencias (y no la misma diferencia). Si se tienen un par de tonos con frecuencias $f_{\mathrm{a1}}$ y $f_{\mathrm{a2}}$ y uno con frecuencias $f_{\mathrm{b1}}$ y $f_{\mathrm{b2}}$, el oído captará la misma diferencia de altura tonal en ambos casos si se cumple que

$$\frac{f_{\mathrm{a1}}}{f_{\mathrm{a2}}} = \frac{f_{\mathrm{b1}}}{f_{\mathrm{b2}}}.$$

Se percibirá como el mismo cambio de altura, el paso de $100\,Hz$ a $125\,Hz$ y el paso de $1000\,Hz$ a $1250\,Hz$. Esta regla de *sensación de altura tonal relativa* está contenida en la teoría musical al realizar la subdivisión en octavas u otros intervalos como terceras, cuartas, etc., donde se está considerando la razón entre dos frecuencias y no el cambio absoluto en Hz.

Esta regla, que en general establece que un estímulo $R$ debe elevarse en un mismo porcentaje para que se produzca el mismo cambio en la sensación percibida, no se limita en el ser humano solamente a la percepción de la altura tonal. Un ejemplo especialmente sencillo y fácil de experimentar, es la percepción del peso de un objeto. Así por ejemplo, se puede determinar si a un chocolate (de $200\,g$) le falta un trozo (de $20\,g$) comparando directamente su peso; igualmente *pesando con la mano* se puede establecer si a un litro de leche ($\approx 1000\,g$) ya se le ha sacado un vaso (de $\approx 100\,g$), y también si a una caja de 10 envases de litro ($\approx 10\,kg$) le falta 1 envase ($\approx 1\,kg$). Por el contrario, será imperceptible si a la caja de 10 envases le faltan $20\,g$ o $100\,g$. De la misma manera, nadie podría decir que un aumento de un kilogramo producirá la misma percepción de cambio, independiente del peso de la masa original ($200\,g, 1\,kg$ o $10\,kg$). Claramente, en este caso también se cumple una regla de cambio relativo, según la cual un estímulo inicial debe aumentarse proporcionalmente para producir un mismo aumento en la sensación.

Naturalmente las octavas (duplicación de frecuencia) se perciben como intervalos mas grandes que los tercios de octava (factor 1.25 en la frecuencia) y una duplicación de peso se percibe como un aumento mayor que una variación de un 10 % (factor 1.1). Resumiendo, se puede establecer que el aumento en la sensación $\Delta E$ que produce un determinado estímulo es directamente proporcional a la razón del cambio absoluto en el estímulo $\Delta R$, e inversamente proporcional al su valor actual $R$,

$$\Delta E = k\frac{\Delta R}{R} \,. \tag{1.1}$$

donde $k$ es la constante de proporcionalidad. En el caso de la respuesta a la *altura tonal*, el estímulo $R$ corresponde a la frecuencia $f$; para el caso de la percepción del peso, $R$ corresponde a la masa $m$ sostenida en la mano.

La regla de *cambio relativo de sensación* contenida en la ecuación (1.1) es un importante fundamento de la Psicología de la percepción. Esta regla ya la había establecido Weber en 1834, mediante experimentos con distintas masas.

La regla de cambio relativo establecida por la ecuación(1.1) también se cumple en el caso de la percepción del volumen de un sonido. Cuando un sujeto escucha sucesivamente un par de sonidos con presión $p$ y $2p$ respectivamente, percibirá el mismo cambio de volumen que al pasar, por ejemplo, de un sonido con presión $5p$ a uno con $10p$. La sensación de altura tonal y de volumen de un sonido cumplen la regla del cambio relativo (1.1), al menos de manera aproximada.

Naturalmente, sería bueno establecer una relación entre las magnitudes de estímulo y sensación, $R$ y $E$ respectivamente. Aunque es problemático (y probablemente imposible) cuantificar la sensación, se puede establecer con claridad la forma que tiene la curva de respuesta. Esta curva de respuesta o curva de sensibilidad puede construirse de manera sencilla a partir de la regla (1.1), escogiendo dos puntos de estímulo $R$ y sensación $E$ como se indica en la figura 1.2. Se asocia a uno de esos puntos el estímulo umbral $R_0$, para el cual se produce la sensación $E = 0$ (estímulos $R < R_0$ bajo el umbral no pueden ser percibidos). Al segundo punto, establecido arbitrariamente, se le asociará el doble del estímulo mínimo $R = 2R_0$ correspondiente con una sensación $E_0$. La continuación de la curva puede obtenerse fácilmente al considerar los valores $2E_0$, $3E_0$, $4E_0$ .... Para el punto con $2E_0$ se debe doblar el valor del estimulo correspondiente a $E_0$, o sea para $2E_0$ se tiene $R = 4R_0$. De la misma manera corresponde a un valor $3E_0$ el estímulo $8R_0$, y a $4E_0$ el estímulo $16R_0$, etc. Como se ve, la curva $E = E(R)$ tiene menor pendiente a medida que $R$ aumenta. Mientras mayor sea la sensación se debe aumentar mucho más el estímulo para alcanzar un aumento dado (por ej. $E_0$) en la sensación.

La relación $E = E(R)$ puede obtenerse formalmente a partir de la ecuación (1.1). Considerando variaciones infinitesimales $dE$ y $dR$ se tiene:

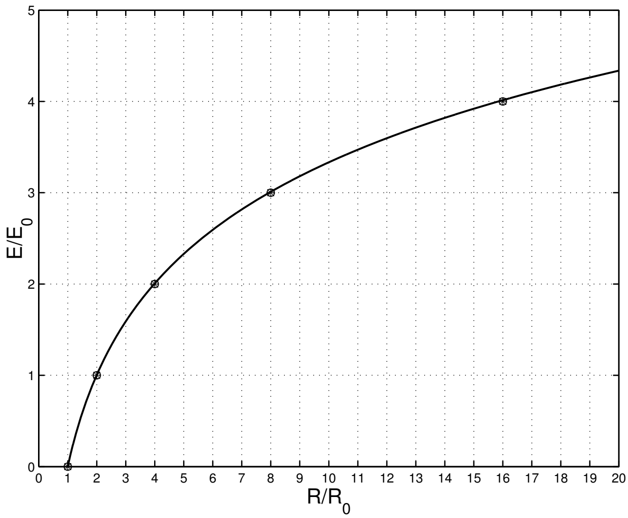


**Figura 1.2.** Relación cualitativa entre estímulo $R$ y sensación $E$

$$\mathrm{d}E = k\frac{\mathrm{d}R}{R} \; .$$

y realizando una integración

$$E = 2{,}3k\log(R/R_0)\,, \tag{1.2}$$

donde log es el logaritmo en base 10 (notar que los logaritmos en distinta base son proporcionales, por ej.: $\ln(x) = 2{,}3\log(x)$). Entonces, la sensación de volumen es proporcional al logaritmo del estímulo (en este caso la amplitud de presión). Esta relación, que ha sido confirmada a través de múltiples experimentos, se conoce como la Ley de Weber-Fechner.

El que la percepción del sonido cumpla una ley logarítmica (ver figura 1.2) es una cualidad muy importante de la especie humana. Mientras los estímulos débiles (aquellos en la proximidad del umbral de audición $R = R_0$) son reforzados para hacerlos más perceptibles, los estímulos muy elevados son fuertemente debilitados; la curva de respuesta logarítmica actúa como un tipo de *protección auditiva*. De esta manera se puede percibir (sin dolor) un rango de valores de esta magnitud física del orden de varias potencias de 10. La Ley de Weber-Fechner en general se aplica a aquellas percepciones sensoriales que, debido a condiciones ambientales y a la necesidad de supervivencia, deben ser perceptibles en un rango muy amplio de valores. Esta ley no es aplicable al caso de la percepción de la temperatura, la cual abarca un rango bastante más limitado y no involucra variaciones de cientos de grados. Rangos mucho más amplios se asocian por ejemplo con la visión, la cual puede estar sometida a estímulos luminosos muy bajos en la noche y muy fuertes en el día a pleno sol.

Otro ejemplo, como ya se ha mencionado, es la percepción del peso de una masa sostenida en la mano, que puede ir del rango de algunos gramos hasta decenas de miles de gramos.

Como se ha dicho, la percepción del volumen del sonido sigue también la ley logarítmica de Weber-Fechner. El oído debe cumplir la tarea de percibir sonidos muy tenues, como la caída de una hoja en un ambiente silencioso, y también ruidos tan intensos como el de una explosión. Los seres humanos pueden percibir sonidos con una presión de $2 \times 10^{-5} N/m^2$ hasta 200 $N/m^2$, donde al valor superior representa el umbral del dolor. El rango audible cubre un intervalo relativo de presiones de aproximadamente siete potencias de diez ($10^7$), siendo un intervalo extraordinariamente grande. Si se traduce a distancias, para tener una idea más visual, correspondería por ejemplo a un intervalo desde 1 milímetro hasta 10 kilómetros. El maravilloso aparato auditivo hace que un intervalo tan grande sea realmente perceptible. Para valorar esta capacidad del oído, basta pensar en la imposibilidad de tener un aparato óptico (por ejemplo una lupa) que pueda trabajar tanto en el rango milimétrico como en el kilométrico.

Resulta razonable entonces, no usar la magnitud física presión sonora como medida técnica, sino una magnitud logarítmica. Internacionalmente se define el nivel de presión sonora ($L$) como

$$L = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \tag{1.3}$$

con $p_0 = 2 \times 10^{-5}\ N/m^2$, esta presión corresponde aproximadamente al valor mínimo de presión que debería tener un tono puro de 1000 Hz para que una persona normal lo perciba. Mientras no se diga otra cosa, se entiende por $p$ el valor efectivo de la señal temporal (frecuentemente designado como raíz cuadrática media o RMS: Root Mean Square). El término dB (decibel o decibelio) no es una unidad de medida, este se usa únicamente para indicar que se ha utilizado una relación logarítmica. El factor 20 (o 10) en la ecuación (1.3) se ha elegido de manera tal que 1 dB corresponde aproximadamente a la mínima diferencia en el nivel de presión sonora necesaria para que el ser humano perciba dos sonidos con distinto volumen.

Como se puede ver en la tabla 1.1, mediante la asociación de niveles a distintos valores de presión incluidos en el intervalo de presión sonora de 7 potencias de 10, se obtiene una escala que va desde los 0 a los 140 dB. En la tabla se incluyen algunos ejemplos del orden de magnitud de los niveles de presión sonora para situaciones de ruido habituales.

Es importante destacar que la presión sonora correspondiente a los niveles más altos es muy inferior a la presión atmosférica de aproximadamente $10^5$N/m$^2$. El valor efectivo de la presión correspondiente a 140 dB es de 200N/m$^2$, apenas 1/500 de la presión atmosférica. La gran ventaja de la utilización de niveles de presión consiste en que estos constituyen (más o menos) una medida para el volumen percibido. Normalmente aquello que por un lado es ventajoso trae consigo alguna desventaja, la realización de cálculos con

**Tabla 1.1.** Correspondencia entre presión sonora y niveles de presión sonora

| Presión efectiva $N/m^2$ | Nivel de presión $dB$ | Situación |
|---|---|---|
| $2 \times 10^{-5}$ | 0 | Mínimo perceptible |
| $2 \times 10^{-4}$ | 20 | Bosque con poco viento |
| $2 \times 10^{-3}$ | 40 | Biblioteca |
| $2 \times 10^{-2}$ | 60 | Oficina |
| $2 \times 10^{-1}$ | 80 | Calle con tránsito |
| $2 \times 10^{0}$ | 100 | Sirena, martillo neumático |
| $2 \times 10^{1}$ | 120 | Arranque de motor a reacción |
| $2 \times 10^{2}$ | 140 | Umbral del dolor |

niveles es un poco más complicado. Por ejemplo ¿Cual es el nivel total producto de varias fuentes con niveles individuales conocidos?. La respuesta a esta pregunta, para el caso de señales incoherentes, está dada por la ecuación

$$L_{\text{tot}} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N} 10^{L_i/10} \right) \tag{1.4}$$

($N$ es el número de fuentes incoherentes con nivel individual $L_i$), el desarrollo del *Procedimiento de adición de niveles* se incluye en detalle en el anexo A. Por ejemplo, tres camiones igual de ruidosos dan el nivel total

$$L_{\text{tot}} = 10 \log \left( 3 \times 10^{L_i/10} \right) = 10 \log 10^{L_i/10} + 10 \log 3 = L_i + 4,8\, dB \ ,$$

el cual supera al nivel individual en 4.8 dB (no es tres veces más alto que el nivel individual).

## 1.1. Filtros de octava y de tercios de octava

En algunos casos es deseable un procedimiento de alta resolución en frecuencia para determinar el contenido espectral de alguna señal. Por ejemplo al realizar mediciones a un resonador de banda estrecha, en el cual es precisamente el ancho de banda de la resonancia la magnitud que interesa determinar (ver sección 5.5). Un procedimiento de alta resolución utilizado frecuentemente consiste en el llamado análisis FFT (Fast Fourier Transform o Transformada Rápida de Fourier).

Frecuentemente no se desea ni se necesita una alta resolución. Cuando se busca tener una visión general del contenido espectral (por ejemplo, al evaluar ruido de tráfico o de trenes) es razonable dividir el rango de frecuencia en pocos intervalos, resumiendo el contenido de todo el intervalo en un valor. Los detalles dentro de cada intervalo tienen poca importancia, estos son aleatorios y pueden variar considerablemente de medición a medición; las mediciones no variarán mucho si se consideran bandas de frecuencia más amplias (asumiendo que se mantienen las condiciones del tráfico). También se utilizan a menudo señales en banda ancha en distintos tipos de mediciones de interés técnico, como es el caso de las mediciones para acústica de salas o de las mediciones de aislamiento acústico, en las cuales se emplea ruido (normalmente ruido blanco o rosa) como señal excitadora. Los detalles espectrales no solo ya no interesan, sino que además desviarían la atención de los resultados importantes.

La medición del contenido espectral en bandas de frecuencia se realiza por medio de filtros, compuestos por circuitos eléctricos que dejan pasar solo la parte de una señal de voltaje correspondiente a un rango de frecuencias determinado. El filtro está caracterizado por su ancho de banda o banda de paso $\Delta f$ (ver fig. 1.3), las frecuencias de corte inferior y superior $f_i$ y $f_s$ respectivamente, y la frecuencia $f_m$. El ancho de banda corresponde a la diferencia entre $f_s$ y $f_i$, $\Delta f = f_s - f_i$.

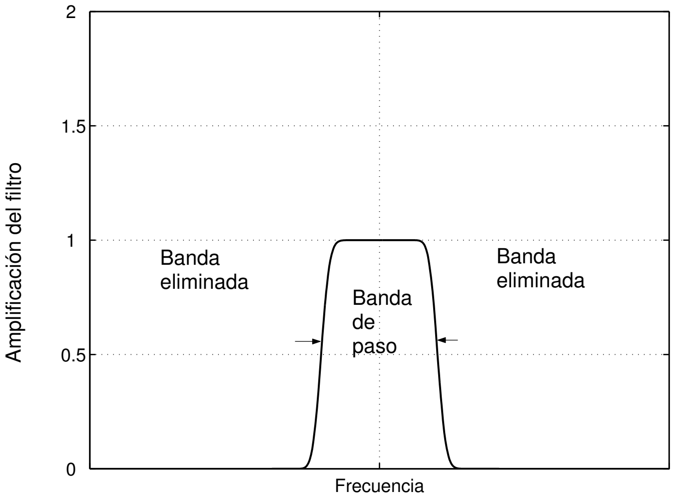


**Figura 1.3.** Curva de respuesta de frecuencia de un filtro (pasabanda)

En acústica, prácticamente sólo se usan filtros con ancho de banda relativo constante, en los que dicho ancho de banda es proporcional a la frecuencia media del filtro y $f_s$ es proporcional a $f_i$. A medida que aumenta la frecuencia media, aumenta también el ancho de banda del filtro. Los filtros de ancho de banda relativo constante más importantes, son los filtros de octava y los de tercio de octava. Para todo filtro de ancho de banda relativo constante se cumple

$$f_m = \sqrt{f_i f_s}$$

Las frecuencias que determinan el filtro quedan claramente definidas si se establece además el cociente entre las frecuencias límites $f_i$ y $f_s$:
Filtro de octava:

$$f_s = 2f_i \ ,$$

consecuentemente $f_m = \sqrt{2}f_i$ y $\Delta f = f_s - f_i = f_y = f_m/\sqrt{2}$.

Filtro de tercio de octava:

$$f_s = \sqrt[3]{2}f_i = 1,26f_i \ .$$

Con esto se tiene

$$f_m = \sqrt[6]{2}f_i = 1,12f_i \quad \text{y} \quad \Delta f = 0,26f_i \ .$$

Los filtros de tercio de octava se denominan así porque tres filtros consecutivos forman una octava ($\sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[3]{2} = 2$). Las frecuencias límite y la frecuencia media de los filtros de tercio de octava y de octava están estandarizadas internacionalmente (por ejemplo, Norma Din 45651 y 45652.)

Al registrar las mediciones de nivel de presión se debe indicar siempre con qué filtros fueron realizadas. Los niveles medidos con filtro de octava serán siempre mayores que los medidos con filtros de tercio, ya que el primer filtro deja pasar más frecuencias que el segundo. La ventaja de la medición con filtros de tercio es la mayor resolución del espectro.

Obviamente, los niveles en banda de octava pueden obtenerse a partir de los valores en tercio mediante la ecuación (1.4). De la misma manera pueden obtenerse, a partir de los niveles en tercio o en octava, los niveles para intervalos de frecuencia mayores. Por ejemplo, habitualmente se entrega el nivel total, el que considera todas las componentes de frecuencia entre 16 Hz y 20000 Hz. Este se obtiene ya sea midiendo directamente mediante un filtro adecuado, o a partir de los niveles en bandas de tercio o de octava (en el caso de bandas de octava sería $N = 11$ en la ec.(1.4) y las frecuencias medias de los filtros corresponden a 16 Hz, 31.5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, y 16 kHz). Naturalmente, el nivel lineal será mayor que todos los niveles en banda a partir de los cuales fue obtenido.

## 1.2. Curvas isofónicas

Al realizar mediciones acústicas se utiliza frecuentemente el denominado *nivel de presión sonora ponderado A*. Dado que esta medida intenta considerar la sensibilidad del oído humano, es importante considerar algunos aspectos fundamentales de su respuesta en frecuencia.

La sensibilidad del oído es altamente dependiente de la frecuencia, mediante la realización de pruebas auditivas se han obtenido las curvas presentadas en la figura 1.4, conocidas como curvas isofónicas o de igual nivel de sonoridad.

Las curvas de igual nivel de sonoridad se obtienen de la siguiente manera: la persona bajo prueba escucha un tono puro de referencia de 1000 Hz y luego cambia a otra frecuencia ajustando el nivel hasta que la perciba igual de intensa (o con igual volumen) que el tono de referencia. Variando sucesivamente la frecuencia se obtiene una curva de igual nivel de sonoridad, y se designa simplemente mediante el nivel del tono de 1000 Hz. Realizando este procedimiento para distintos niveles del tono de referencia (1000 Hz) se obtiene el set de curvas llamadas curvas isofónicas. Estas curvas establecen, por ejemplo, que un tono de $100\,Hz$ con un nivel de presión sonora de $70\,dB$ será percibido igual de intenso que un tono de $1000\,Hz$ con un nivel de $60\,dB$. Como se puede ver, el oído es mucho más sensible en el rango de frecuencias medias que en el rango de frecuencias muy altas o bajas. Desde hace algún tiempo las curvas isofónicas son nuevamente un tema de discusión, pues se ha demostrado que los resultados dependen mucho de los métodos y condiciones de medición.

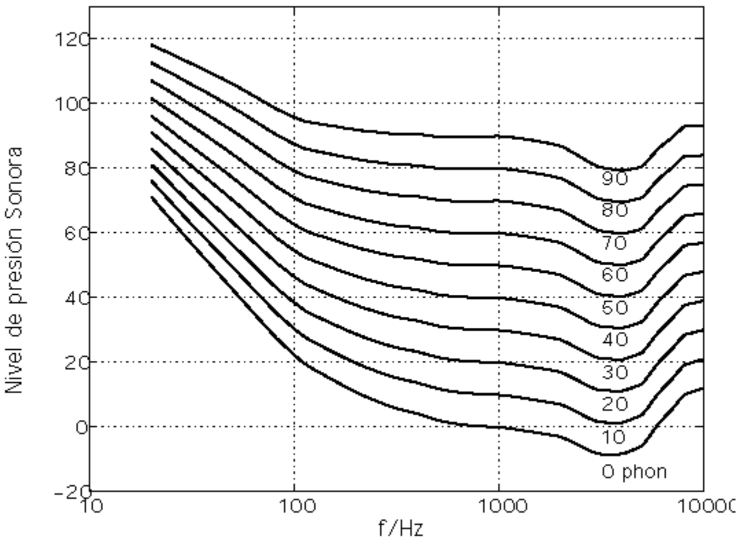


**Figura 1.4.** Curvas isofónicas

## 1.3. La ponderación A

Como se observa en las curvas isofónicas, la relación entre la sensación subjetiva de volumen o intensidad y el valor objetivo del nivel de presión sonora es realmente complicada. La respuesta de frecuencia del oído depende fuertemente del nivel, las curvas con nivel elevado son claramente más planas que aquellas con niveles más bajos. También la percepción subjetiva de volumen o intensidad depende del ancho de banda del evento sonoro. Si se intentara desarrollar una técnica de medida que considere todas las características del oído sería necesario utilizar sistemas de medición extremadamente complicados.

Está establecido y aceptado internacionalmente utilizar el *nivel de presión sonora ponderado A*, el cual toma en cuenta, al menos en cierta medida, la sensibilidad del oído humano. El valor dBA se mide utilizando un filtro cuya respuesta de frecuencia está representada en la figura 1.5. La curva del filtro-A corresponde aproximadamente a la inversión de la curva isofónica con un nivel de 30 $dB$ en 1 $kHz$. Como se ve, las frecuencias bajas y altas tienen mucho menos peso sobre el valor dBA que las frecuencias medias.

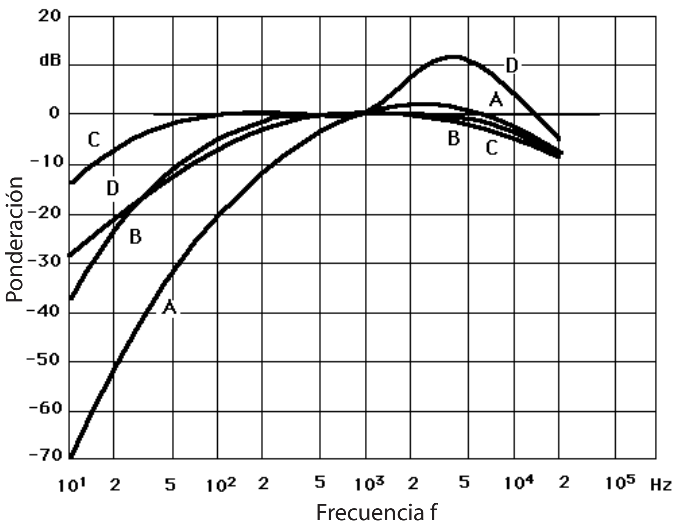


**Figura 1.5.** Curvas de ponderación correspondientes a los filtros A, B, C y D

El nivel ponderado A puede obtenerse también a partir de los niveles medidos utilizando filtros de tercio de octava. A los niveles en bandas de tercio se les debe sumar los valores de corrección contenidos en la figura 1.5 y luego se obtiene el nivel total, ahora en dBA, de acuerdo a la ecuación (1.4).

$$L(A) = 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N} 10^{(L_i + \Delta_i)/10} \right), \tag{1.5}$$

donde $\Delta_i$ corresponde a los factores de corrección incluidos en 1.5. La ponderación A está definida mediante normas (Ej: DIN 45633). Los factores de corrección $\Delta_i$ están parcialmente incluidos en parte en el ejercicio 2 de este capítulo.

La figura 1.6 contiene un ejemplo considerando ruido blanco, se han determinado los niveles en bandas de tercio, el nivel total no ponderado (Lin) y el nivel total con ponderación A. Como se observa, en el caso de ruido blanco el nivel aumenta $1\,dB$ por cada tercio de octava al aumentar la frecuencia. El nivel total lineal (no ponderado) es mayor que cada uno de los niveles de tercio y el nivel ponderado en A es en este caso levemente menor al nivel total lineal.(ver ejercicio 3).

En algunos casos excepcionales (especialmente al tratarse de ruido de automóviles o de aviones) se usan otras ponderaciones (B, C o D; ver figura 1.5). Las leyes y/o reglamentos existentes utilizan en general los niveles en dBA.

La utilización de valores lineales resulta siempre algo problemática, pues no considera diferencias de percepción importantes. Por ejemplo, la ponderación A atenúa demasiado los ruidos de baja frecuencia y alto nivel de presión sonora y esta atenuación no corresponde a la situación real de percepción (ver fig. 1.4). La curva A reduce los niveles altos en una cantidad mucho mayor a la atenuación que produce naturalmente el oído. La curva A y la respuesta del oído son similares solo en el caso de niveles bajos. Este hecho podría implicar ciertas injusticias, por ejemplo a la hora de establecer niveles máximos permitidos, que no pueden evitarse con ninguna curva de ponderación sencilla. Por otra parte, no se puede prescindir de procedimientos de ponderación que se puedan entender y aplicar fácilmente.

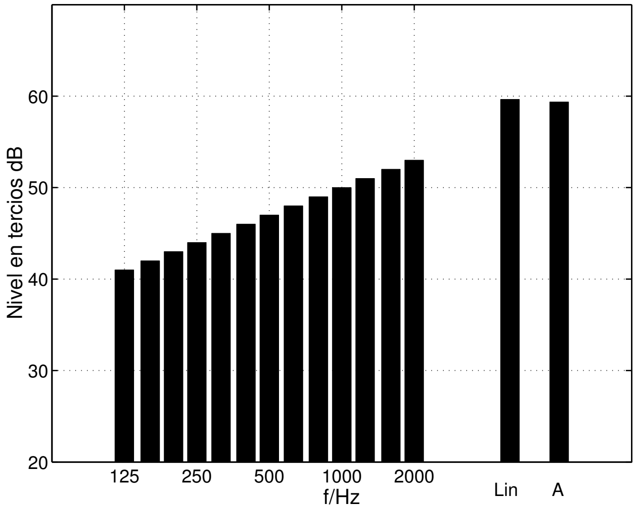


**Figura 1.6.** Niveles en bandas de tercio, nivel total lineal y nivel total con ponderación A para ruido blanco

## 1.4. Ruido variable en el tiempo

En el caso de señales de ruido estacionarias (por ejemplo, de un motor con número de revoluciones constante, una aspiradora o algo similar) es muy sencillo establecer el nivel de presión sonora. Debido a la forma estable del ruido es suficiente establecer un valor de nivel en dBA (o el nivel en tercios si es necesario).

¿Cómo medir señales intermitentes como una conversación, música o ruido de tráfico? Obviamente, el nivel variable en el tiempo se puede registrar en un gráfico, pero eso no es suficiente. Es necesario poder comparar cuantitativamente dos situaciones de ruido distintas (ej. el ruido en dos calles distintas), lo cual es muy difícil a partir del registro de los niveles variables en el tiempo. Para obtener valores simples de comparar, deben obtenerse valores medios sobre un intervalo de tiempo adecuado a la situación particular.

El indicador más utilizado y más simple es el *Nivel de presión sonora continuo equivalente* (o simplemente *Nivel equivalente*) $L_{eq}$. Este nivel corresponde al promedio temporal de la presión sonora al cuadrado :

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_{eff}^2(t)}{p_0^2} \right) dt = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} \right) dt \qquad (1.6)$$

($p_0 = 2{\times}10^{-6}\, N/m^2$). En esta ecuación, $p_{eff}(t)$ representa la variación temporal del valor efectivo o RMS de la presión sonora y $L(t) = 10 \log(p_{eff}(t)/p_0)^2$ la variación temporal del nivel de presión sonora. El cuadrado de una función temporal se suele denominar energía de la señal, el nivel equivalente entrega el valor promedio de la energía en el tiempo de integración. La señal acústica (la señal de presión sonora) se puede modificar previamente por un filtro A (o por filtros de tercios, octava, etc.), en ese caso se obtiene el nivel equivalente A (o en tercios, etc.).

Dependiendo de la aplicación, se utilizan tiempos de integración $T$ diferentes, desde unos pocos segundos o minutos hasta horas.

Las regulaciones y normativas establecen valores límites normalmente mediante un $L_{eq}$, el cual se determina para rangos horarios de varias horas. Por ejemplo, el rango horario *noche* normalmente corresponde al horario desde las 22 a las 6 horas, es decir con una duración de 8 horas. Al realizar mediciones, frecuentemente se utiliza un tiempo de integración mucho menor, para minimizar la influencia de ruidos de fondo imprevistos. Posteriormente, el $L_{eq}$ correspondiente al tiempo de integración más largo es aproximado a partir de todos los niveles obtenidos con tiempos de integración más cortos. Si se necesita establecer el $L_{eq}$ debido al paso de un tren junto a una calle, se mide primero el $L_{eq}$ con un tiempo de integración correspondiente a una pasada del tren, por ejemplo con un tiempo de 30 segundos ($L_{eq}(30s)$). Si se sabe que el tren pasa cada 5 minutos, el nivel equivalente $L_{eq}(largo)$ referido a varias horas (por ejemplo al rango *día* o *noche*) se puede obtener simplemente como $L_{eq}(largo) = L_{eq}(30s) - 10 \log(5min/30s) = L_{eq}(30s) - 10\, dB$.

La utilización de valores medios tiene sentido (y es inevitable) para la comprobación del cumplimiento de valores límites. Por otro lado, los valores medios hacen desaparecer detalles de la variación temporal y hace que situaciones muy diferentes aparezcan como iguales o muy similares. Por ejemplo, podría ser que el paso de un tren de alta velocidad cada una hora tenga un nivel equivalente $L_{eq}$ (referido a varias horas) similar al de una calle con bastante tráfico vehicular. Al estar presentes ambas fuentes podría variar muy poco el $L_{eq}$ (ver ejercicio 5) debido a la integración en varias horas.

El Nivel equivalente es solo el medio más sencillo para caracterizar sonidos variables en el tiempo. Es posible obtener información estadística respecto al ruido, por ejemplo, mediante los denominados niveles percentiles.

## 1.5. Resumen

La percepción del sonido sigue una ley relativa: se percibe un mismo cambio en sensación cuando un cierto estímulo es aumentado en un determinado porcentaje constante. La ley de Weber-Fechner, que establece que la sensación es proporcional al logaritmo del estímulo, lleva a una importante conclusión: la presión sonora se mide mediante niveles logarítmicos, utilizando como *pseudo-unidad* el decibel ($dB$). El rango de presión sonora audible para el ser humano (aprox. $10^7$), se transforma mediante la utilización de la escala logarítmica en un rango que va desde aproximadamente $0\,dB$ (umbral de audición) hasta aproximadamente $140\,dB$ (umbral del dolor). Para considerar la respuesta del oído, al menos aproximadamente, se utiliza la curva de ponderación A. Para los niveles obtenidos al utilizar esta curva de ponderación se debe utilizar la pseudounidad $dB(A)$.

Para cuantificar señales de ruido variables en el tiempo (o intermitentes), se utilizan valores promediados temporalmente, el más utilizado es el *Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente.*

## 1.6. Literatura

Un trabajo orientado al aspecto fisiológico y psicológico de la audición es el texto *Hearing - an Introduction to Psychological and Physiological Acoustics* de Stanley A. Gelfand (Marcel Dekker, New York 1998). El texto *Wahrnehmen - ein Lehrbuch* de Rainer Guski (Kohlhammer Verlag, Stuttgart 1996) contiene una introducción a la percepción auditiva.

## 1.7. Ejercicios

### Ejercicio 1

En un punto de inmisión se tiene un nivel de $50\,dB(A)$ debido al ruido generado por una fábrica vecina. A $50\,m$ del punto de inmisión se debe instalar una bomba. ¿Cuál es el nivel máximo en $dB(A)$ que puede producir la bomba por si sola, para que el nivel total no supere el límite de $55\,dB(A)$?

### Ejercicio 2

Un ruido tiene la distribución en bandas de tercio indicada en la siguiente tabla.

| $f/Hz$ | $L_{Tercio}/dB$ | $\Delta_i/dB$ |
|---|---|---|
| 400 | 78 | -4,8 |
| 500 | 76 | -3,2 |
| 630 | 74 | -1,9 |
| 800 | 75 | -0,8 |
| 1000 | 74 | 0 |
| 1250 | 73 | 0,6 |

Calcular

- Los niveles no ponderados en banda de octava
- El nivel total no ponderado
- El nivel total ponderado A.

Los valores de la ponderación A se incluyen en la última columna de la tabla.

### Ejercicio 3

Se tiene un espectro de ruido en tercios de octava, consistente en el denominado *Ruido blanco*, cuyos niveles en bandas de tercio aumentan $1\,dB$ de una banda a la siguiente (ver figura 1.6). ¿En cuánto aumenta el nivel de una octava a la siguiente?. ¿En cuanto supera el nivel total al nivel en tercios más bajo, si el espectro contiene $N$ bandas de tercio?. Considere $N = 10$.

### Ejercicio 4

Se tiene un espectro de ruido en tercios de octava, consistente en el denominado *Ruido rosa*, cuyos niveles en bandas de tercios son iguales para todas las bandas. ¿En cuanto aumenta el nivel de una a la siguiente octava y que valor tienen?. ¿Cuál es el nivel total si el espectro contiene $N$ bandas de tercio?. Considere $N = 10$.

## Ejercicio 5

En un punto de inmisión junto a una calle se ha determinado un Nivel equivalente para el período de referencia *día* (16 horas) de $55\,dB(A)$. Junto a la calle se construirá una vía para un tren de alta velocidad. El $L_{eq}$ de 2 minutos para el paso del tren es de $75\,dB(A)$. El tren pasará cada 2 horas.

¿Cuál será el nivel equivalente para el período *día*

- a) solo debido al tren, y
- b) con ambas fuentes funcionando?

## Ejercicio 6

Un tren urbano viaja diariamente entre las 6:00 y las 22:00 horas cada 5 minutos, y en la noche de 22:00 a 2:00 cada 20 minutos (de 2 a 6 no funciona el servicio). Una pasada del tren frente a un punto de inmisión dura 30 segundos, para ese intervalo se mide un $L_{eq}(30s) = 78\,dB(A)$. ¿Cuál será el Nivel equivalente para el período de referencia *día* y para el período *noche*?.

## Ejercicio 7

Una medición de un nivel de presión sonora de valor $L$ (por ejemplo debido a un tren urbano como en el ejercicio anterior) solo se puede realizar en presencia de ruido de fondo (como el tráfico vehicular). Suponiendo que el ruido de fondo posee un nivel en $\Delta L$ inferior al nivel que se quiere medir: ¿Cuál es el valor del nivel total medido?. Considerar los casos $\Delta L = 6\,dB$, $\Delta L = 10\,dB$ y $\Delta L = 20\,dB$.

## Ejercicio 8

Como en el ejercicio 7 se debe determinar un nivel de presión sonora en presencia de ruido de fondo. ¿Cuál debe ser la diferencia $\Delta L$ con el ruido de fondo para que el error de medición sea de $0,1\,dB$ ?

## Ejercicio 9

A veces, en casos muy especiales, se utilizan bandas de frecuencia de ancho relativo constante aun más angostas que las de tercios, como las denominadas bandas de un sexto de octava. Establecer las ecuaciones para

- la serie de frecuencias medias o centrales,
- los anchos de banda y
- las frecuencias límites de cada banda.

**Ejercicio 10**

En un cálculo, en el que se tienen los tres niveles de tercios pertenecientes a una octava y el correspondiente nivel de octava, uno de los tres niveles de tercios parece ser dudoso. ¿Cómo se puede comprobar los valores, si se supone que todos los demás niveles son correctos ?

http://www.springer.com/978-3-642-02543-3

Ingeniería Acústica
Teoría y Aplicaciones
Möser, M.; Barros, J.L.
2009, XVI, 518 p., Hardcover
ISBN: 978-3-642-02543-3