

Soporte teórico

Capitulos 1 al 5 del libro
Acústica y Sistemas de Sonido
por el Ing. Federico Miyara

Capítulo 1

Acústica Física

1.1. Introducción

La **Acústica** es la disciplina que se ocupa de estudiar el sonido en sus diversos aspectos. Se puede dividir en una gran cantidad de subdisciplinas, algunas de las cuales se listan en la **Tabla 1.1**. Nosotros nos ocuparemos brevemente de sólo de las cuatro primeras de éstas, a saber: la acústica física, la psicoacústica, la acústica musical y la

Tabla 1.1. Algunas subdisciplinas de la Acústica

| Rama | Breve descripción |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acústica física | Análisis de los fenómenos sonoros mediante modelos físicos y matemáticos |
| Psicoacústica | Estudio de las sensaciones evocadas por los sonidos y sus diversos parámetros |
| Acústica musical | Estudio de los instrumentos musicales, las escalas, los acordes, la consonancia y la disonancia, etc. |
| Acústica arquitectónica | Estudio de la acústica de salas y su influencia sobre la escucha de la palabra y la música |
| Bioacústica | Estudio del efecto de los sonidos sobre los seres vivos, y de los sonidos producidos por éstos |
| Acústica fisiológica | Estudio del funcionamiento del aparato auditivo, desde la oreja hasta la corteza cerebral |
| Acústica ultrasónica | Estudio del ultrasonido, es decir el sonido inaudible de alta frecuencia, y sus aplicaciones |
| Acústica subacuática | Estudio del comportamiento del sonido en el agua, y sus aplicaciones |
| Macroacústica | Estudio de los sonidos extremadamente intensos, como el de las explosiones, turborreactores, etc. |
| Acústica estructural | Estudio del sonido que se propaga por las estructuras en forma de vibraciones |
| Acústica fonética | Análisis de las características acústicas del habla y sus aplicaciones |
| Mediciones acústicas | Técnicas de medición de diversos parámetros acústicos como frecuencia, intensidad, espectro, etc. |

acústica arquitectónica. En este primer capítulo nos dedicaremos a los rudimentos de la acústica física, es decir el estudio de los fenómenos sonoros por medio de modelos físicos y matemáticos.

1.2. El sonido: un fenómeno ondulatorio

El sonido consiste en la propagación de una perturbación en el aire. Para comprender mejor este concepto imaginemos un tubo muy largo lleno de aire, con un pistón en un extremo. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o **moléculas**. Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo, o, más técnicamente, en equilibrio (**Figura 1.1a**). Este equilibrio es **dinámico**, lo cual significa que las moléculas no están quietas, sino que se mueven caóticamente en todas las direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente repartidas en el interior del tubo. En otras palabras, en cada centímetro cúbico (cm^3) de aire, ya sea cerca del pistón o lejos de él, hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas (una cantidad muy grande: unos **25 trillones**).

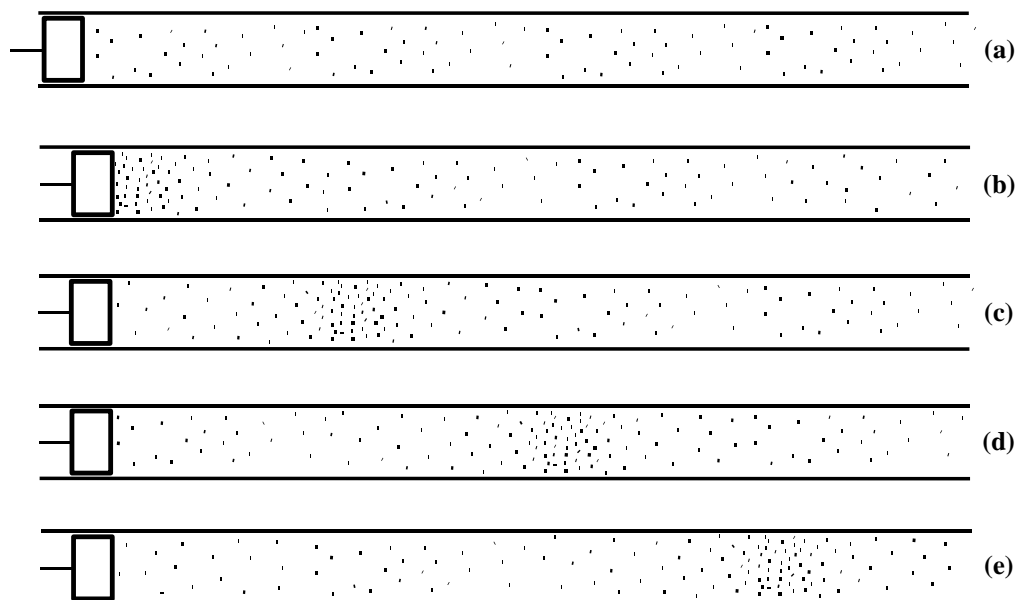


Figura 1.1. Propagación de una perturbación en un tubo. **(a)** El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). **(b)** Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. **(c), (d), (e)** La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Supongamos ahora que se desplaza rápidamente el pistón hacia el interior del tubo (**Figura 1.1b**). Las moléculas que se encuentran junto al pistón serán empujadas por

éste, mientras que las que se encuentran muy alejadas no. Esto implica que en la zona del pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir que la misma cantidad de aire ahora ocupa menos espacio. En otras palabras, habrá ahora más moléculas por centímetro cúbico cerca del pistón que lejos de él. Al igual que lo que sucede cuando se abre la válvula de un neumático, el aire comprimido tiende a descomprimirse, desplazándose hacia la derecha, y comprimiendo a su vez el aire que se encuentra próximo a él (**Figura 1.1c**). Esta nueva compresión implica, otra vez, una tendencia a descomprimirse, que se efectiviza a costa de comprimir el aire contiguo (**Figura 1.1d**). El proceso se repite así en forma permanente, con lo cual la perturbación original (la compresión del aire cercano al pistón) se **propaga** a lo largo del tubo alejándose de la **fuentes** de la perturbación (el pistón).

Este proceso se denomina también **propagación de una onda sonora**, y es similar a lo que sucede cuando en una pileta en calma se deja caer una piedra. En el instante en que la piedra golpea el agua, se produce una perturbación, que se propaga en forma de una circunferencia cuyo radio va en aumento, como se aprecia en la **Figura 1.2**.

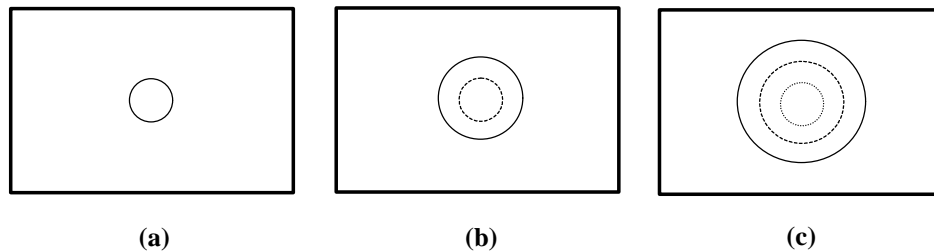


Figura 1.2. Una perturbación de la superficie del agua en una pileta inicialmente en calma se propaga como una circunferencia de radio cada vez mayor.

Al aire libre, es decir sin la restricción de un tubo (y en ausencia de superficies que reflejen el sonido), la perturbación se propaga, similarmente, en forma de una **onda esférica** cuyo radio va aumentando a medida que transcurre el tiempo.

1.3. Velocidad del sonido

Ahora nos preguntamos qué tan rápido se aleja la onda de la fuente. La respuesta es que el sonido se propaga con una velocidad **c** que en el aire a **23 °C** vale

$$c = 345 \text{ m/s} ,$$

o bien

$$c = 1242 \text{ km/h} .$$

Esta velocidad varía algo con la temperatura (un **0,17 %/°C**), por eso en diversos textos pueden encontrarse valores ligeramente diferentes. Una observación importante es que la velocidad del sonido es **independiente** de la **intensidad** de la perturbación.

Veamos algunos ejemplos. Si una persona se encuentra a **100 m** de distancia de otra (aproximadamente una cuadra), un grito de la primera demorará, a causa de esta velocidad, **29** centésimas de segundo en llegar a donde se encuentra la segunda. Otro ejemplo es el de los relámpagos y los truenos. Un relámpago es una enorme chispa que se produce por una descarga eléctrica entre distintas capas de aire con cargas opuestas. Esta chispa produce a la vez luz y sonido. Sin embargo, la luz viaja a una velocidad mucho más alta, y alcanza nuestra vista casi instantáneamente, mientras que el sonido demora un tiempo apreciable en llegar a nosotros. Así, si cronómetro en mano comprobamos que el trueno se escucha **5 s** después de ver un relámpago, conociendo la velocidad del sonido podemos calcular que el relámpago se produjo a una distancia

$$d = 345 \text{ m/s} \times 5 \text{ s} = 1725 \text{ m} = 1,725 \text{ km.}$$

Otro ejemplo interesante es el **eco**. Si gritamos frente a una superficie vertical un tanto alejada (por ejemplo una barranca o un acantilado), el sonido tardará un tiempo en llegar a la superficie, se reflejará en ella, y volverá demorando otro tiempo adicional. El resultado será que se escucha, unos instantes después, que la pared “repite” el grito. Más adelante veremos ejemplos correspondientes a los sistemas de sonido, en los cuales a causa de la distancia entre los parlantes y el público se producen retardos que es preciso corregir.

1.4. Sonidos periódicos

El fenómeno sonoro que analizamos anteriormente (**Figura 1.1**) consistía en una única perturbación del aire. La mayor parte de los sonidos de la naturaleza son, en realidad, el resultado no de *una* sino de *múltiples* perturbaciones sucesivas. Estos sonidos se denominan **periódicos**, y pueden dividirse en **ciclos**, donde cada ciclo abarca todo lo que sucede entre dos perturbaciones sucesivas del aire. En la **Figura 1.3** se muestra un ejemplo de un sonido de este tipo. En (a) todavía no se ha producido ninguna perturbación. En (b) se produce la primera perturbación, que se propaga con una velocidad **c** alejándose del pistón. En (c), después de que la perturbación ha recorrido cierta distancia, el pistón se mueve nuevamente provocando una segunda perturbación. Mientras la primera perturbación sigue desplazándose con velocidad **c**, la segunda comienza a hacerlo también con velocidad **c**. En (d) y (e), se agregan nuevas perturbaciones, las cuales a su vez se propagarán con idéntica velocidad, y así sigue el proceso hasta que en algún momento cesa el sonido.

Siguiendo con la analogía de la piedra que cae en la pileta, podemos pensar en una sucesión de guijarros que caen sobre la superficie del agua, lo cual dará lugar a una serie de círculos concéntricos que van agrandándose a medida que van surgiendo nuevos círculos. Análogamente, al aire libre, y lejos de toda superficie capaz de reflejar el sonido, las sucesivas perturbaciones se propagarán como esferas concéntricas crecientes que se alejan de la fuente. En presencia de superficies reflectoras, la onda deja de ser esférica para volverse sumamente compleja.

Muchas veces se habla de **campo sonoro** para referirse a la forma en que se distribuye el sonido en los diversos puntos de un determinado espacio, por ejemplo dentro de una sala o al aire libre.

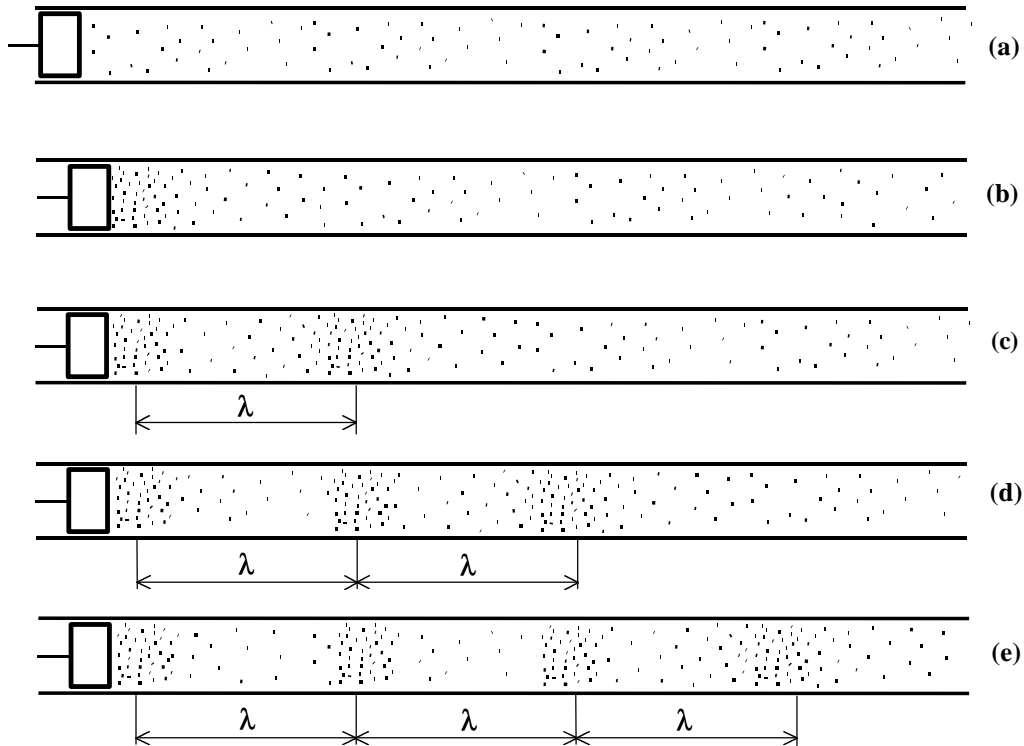


Figura 1.3. Un sonido consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, **periódica**. (a) El aire en reposo. (b) Primera perturbación. (c) Segunda perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia λ (longitud de onda). (d) Tercera perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia 2λ y la segunda una distancia λ . (e) Cuarta perturbación, cuando las anteriores han recorrido las distancias 3λ , 2λ , y λ respectivamente.

1.5. Longitud de onda

Vamos ahora a definir algunos **parámetros** muy importantes relacionados con los sonidos periódicos. El primero es la **longitud de onda**, que se representa con la letra griega *lambda*, λ , y es la *distancia entre dos perturbaciones sucesivas en el espacio* (**Figura 1.3**). Se mide en *metros (m)* o en *centímetros (cm)*, y para los sonidos audibles está comprendida entre los **2 cm** (sonidos muy agudos) y los **17 m** (sonidos muy graves).

La longitud de onda es importante en varias situaciones. En primer lugar, un objeto grande comparado con la longitud de onda es capaz de alterar significativamente la propagación del sonido cuando se interpone entre la fuente sonora y el oyente. Así, por ejemplo, los sonidos graves pueden “doblar la esquina” fácilmente porque su longitud de onda es grande. Los agudos, en cambio, cuya longitud de onda puede ser de apenas algunos **cm**, se ven considerablemente atenuados.

Otra situación en la cual la longitud de onda juega un papel importante es en la eficiencia de los altavoces. Cuando la longitud de onda λ emitida por un parlante es mucho más pequeña que su propio tamaño, la potencia emitida se reduce considerablemente. Por esa razón, los **tweeters** (altavoces de agudos) son mucho más pequeños que los **woofers** (altavoces de graves).

Por último, veremos más adelante que la respuesta de los micrófonos se altera para aquellos sonidos de longitud de onda λ comparable con el tamaño del micrófono.

1.6. Periodo

Un segundo parámetro es el **periodo, T**, que se define como *el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente*. Se mide en *segundos (s)* o *milisegundos (ms)*, es decir la milésima parte de un segundo. El periodo de los sonidos audibles para el ser humano varía entre los **0,05 ms** (sonidos muy agudos) y los **50 ms** (sonidos muy graves). Cabe destacar que son tiempos muy cortos que impiden en general que los ciclos puedan percibirse como fenómenos separados. El cerebro tiende a integrarlos en una única sensación, la sensación sonora.

1.7. Frecuencia

El tercer parámetro, uno de los más fundamentales en Acústica, es la **frecuencia, f**. Se define como *la cantidad de ciclos por segundo*, o lo que es lo mismo, *la cantidad de perturbaciones por segundo*. Se expresa en *hertz (Hz)*, unidad llamada así en honor a Heinrich Hertz, científico del siglo XIX que descubrió las ondas de radio. Esta unidad es equivalente al *ciclo por segundo (cps)*, aunque la unidad **Hz** se encuentra más frecuentemente en los textos y en las especificaciones técnicas de los diversos equipos. La frecuencia de los sonidos audibles está comprendida entre los **20 Hz** (sonidos graves) y los **20.000 Hz** (sonidos agudos) ó **20 kHz** (kilohertz, es decir **1.000 Hz**).

Existen algunas relaciones matemáticas importantes entre estos parámetros. Así, el periodo **T** y la frecuencia **f** están relacionados por las ecuaciones

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

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

en las cuales si **T** se expresa en **s**, entonces **f** se expresa en **Hz**, y si **T** se expresa en **ms**, **f** se expresa en **kHz**.

Por ejemplo, si sabemos que el periodo de cierto sonido es de **0,01 s**, es decir **1/100 s**, entonces la frecuencia será, aplicando la primera relación, **100 Hz**. Si, en cambio conocemos que la frecuencia es de **1.000 Hz**, aplicando la segunda relación se llega a que el periodo es de **0,001 s**, es decir **1 ms**.

La otra relación importante es la que vincula la longitud de onda con la frecuencia, y es la siguiente:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

donde c es la velocidad del sonido. Así, un sonido de frecuencia **500 Hz**, tiene una longitud de onda de

$$\lambda = \frac{345}{500} = 0,69 \text{ m} = 69 \text{ cm}.$$

Como segundo ejemplo, la voz masculina (al hablar normalmente) tiene una frecuencia de unos **120 Hz**, lo cual corresponde, según la fórmula anterior, a una longitud de onda de **2,88 m**.

1.8. Presión sonora

Según hemos visto, el sonido puede considerarse como una sucesión de ondas de compresión seguidas por ondas de descompresión que se propagan por el aire a una velocidad de **345 m/s**. Sin embargo, si nos ubicamos en una posición fija, veremos que la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente, conforme pasan por el lugar las sucesivas perturbaciones. Dado que nos referiremos bastante seguido a valores de presión, conviene aclarar que la unidad adoptada internacionalmente para la presión es el **Pascal**, abreviada **Pa**. Expresada en esta unidad, la presión atmosférica es del orden de **100.000 Pa** (o, como se suele anunciar en los informes meteorológicos, alrededor de **1.000 hPa**, donde **hPa** es la abreviatura de **hectopascal**, es decir **100 Pa**). Ahora bien. Los aumentos y las disminuciones de presión debidas a las ondas sonoras son realmente muy pequeños comparados con este valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben como tales (después de eso se perciben como dolor) implican un aumento de unos **20 Pa**. Para distinguir este incremento de la presión atmosférica en ausencia de sonido, se lo denomina **presión sonora**, abreviada **p**. Así, la presión sonora es lo que se debe agregar a la presión atmosférica en reposo para obtener el valor real de presión atmosférica.

Por ejemplo, si la presión en reposo es de **100.000 Pa** y la presión en presencia de un sonido es de **100.008 Pa**, entonces la presión sonora es

$$p = 100.008 \text{ Pa} - 100.000 \text{ Pa} = 8 \text{ Pa}.$$

El trabajar con la presión sonora en lugar de la presión total, nos ahorra tener que arrastrar números con gran cantidad de cifras.

Las presiones sonoras audibles varían entre **0,00002 Pa** y **20 Pa**. El valor más pequeño, también expresado como **20 μPa** (donde **μPa** es la abreviatura de **micropascal**, es decir una millonésima de **Pa**), se denomina **umbral auditivo**.

1.9. Representación gráfica del sonido

Hasta ahora no habíamos tenido en cuenta la manera en que se aplican las perturbaciones sucesivas. Así, podría ocurrir que éstas fueran el resultado de un suave vaivén

del pistón, o que por el contrario cada perturbación consistiera en una brusca sacudida del mismo. La realidad es que aún manteniéndose la frecuencia, ambos sonidos sonarán muy diferentes, lo cual muestra la importancia de conocer la forma de la perturbación. Para ello se utiliza un tipo de representación gráfica denominada **oscilograma**, que consiste en mostrar la evolución en el tiempo de la perturbación (**Figura 1.4**) en un par de ejes correspondientes al tiempo (eje horizontal) y a la presión sonora (eje vertical).

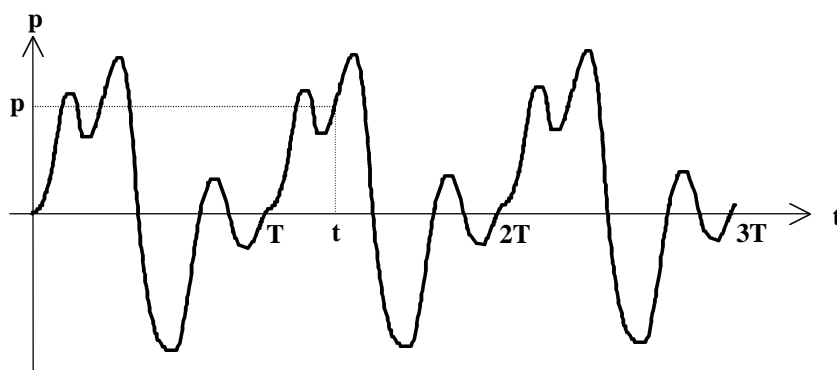


Figura 1.4. El oscilograma de un sonido, en el cual pueden apreciarse 3 ciclos o periodos completos del mismo. En el eje horizontal se representa el tiempo y en el eje vertical la presión sonora. Obsérvese que la forma de onda es en este caso relativamente compleja.

El significado de este gráfico es que para cada instante t , representado como un punto o posición en el eje horizontal, corresponde una presión sonora p , representada por una altura medida en la escala del eje vertical. Los valores positivos (arriba del eje t) representan compresiones y los valores negativos (debajo del eje t), descompresiones.

Es interesante explorar el significado del periodo T y de la frecuencia f en un oscilograma. En la **Figura 1.4** se puede apreciar que T es la duración de cada ciclo o porción repetitiva de la onda. En la **Figura 1.5**, se ha dibujado la onda durante un tiempo de 1 s (en otra escala). Dado que hay 12 ciclos en dicho tiempo, la frecuencia es de **12 Hz**.

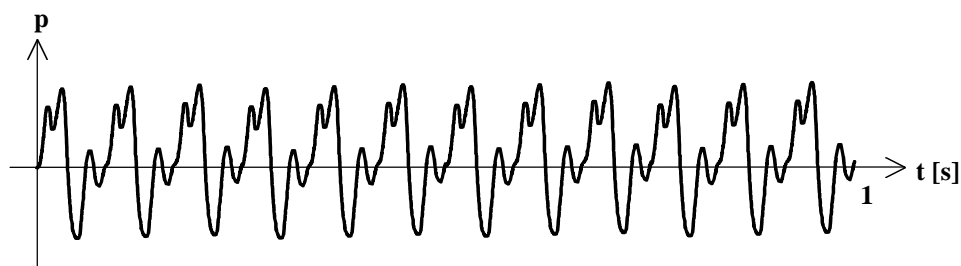


Figura 1.5. Significado de la frecuencia en un oscilograma. En la unidad de tiempo, es decir 1 s , se cuentan 12 ciclos, por lo cual la frecuencia es de **12 Hz**.

1.10. Amplitud

El oscilograma nos permite interpretar fácilmente un parámetro del sonido vinculado a la *fuerza* o *intensidad* del mismo: la **amplitud**. La **amplitud** se define como *el máximo valor que alcanza una oscilación en un ciclo*. La amplitud se denomina también **valor de pico** o **valor pico**. En la **Figura 1.6** vemos la misma forma de onda con dos amplitudes diferentes.

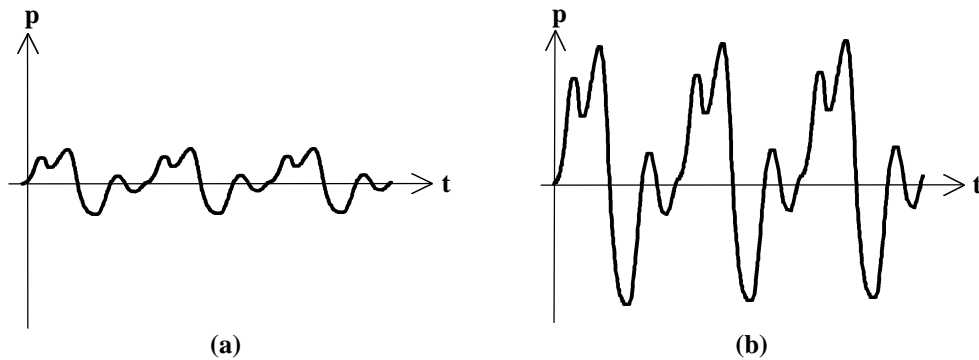


Figura 1.6. Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente **amplitud**. (a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud.

1.11. Envolvente

La amplitud de un sonido no es necesariamente constante, sino que puede variar en el tiempo. De hecho, la mayor parte de los sonidos reales tienen amplitud variable. Se define la **envolvente** de un sonido como *la forma que se obtiene uniendo las amplitudes de los ciclos sucesivos*. En la **Figura 1.7** se puede apreciar una onda cuya amplitud varía en el tiempo. En línea de trazos se muestra la envolvente respectiva.

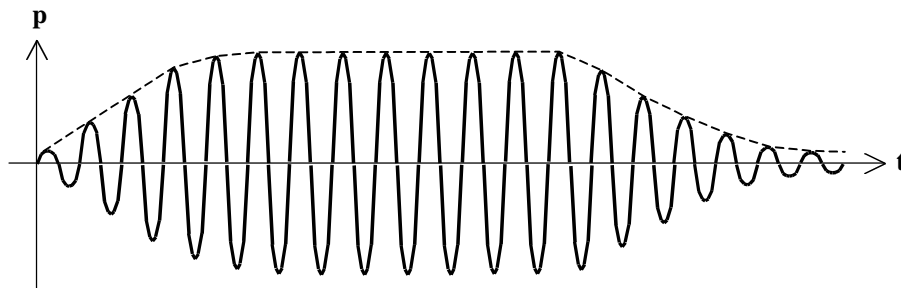


Figura 1.7. Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la **envolvente**, curva que une los picos de cada ciclo.

Veremos que la envolvente es uno de los factores decisivos en la determinación del timbre de una voz o instrumento. El otro factor es el espectro, que veremos también oportunamente.

1.12. Nivel de presión sonora

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre valores extremadamente pequeños ($0,00002 \text{ Pa} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$) hasta valores que si bien todavía pequeños, son *un millón* de veces más grandes que los anteriores (20 Pa). Estas cifras son poco prácticas de manejar, por lo cual se ha introducido otra escala que comprime este rango: la escala de **decibeles**. Para expresar una presión sonora en decibeles, se define primero una presión de referencia P_{ref} que es la mínima presión sonora audible (correspondiente al sonido más suave que se puede escuchar):

$$P_{\text{ref}} = 0,00002 \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa} .$$

Entonces se define el **nivel de presión sonora**, **NPS** (en inglés se utiliza la sigla **SPL**, sound pressure level), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad [\text{dB}] ,$$

donde P es la presión sonora, y \log_{10} el logaritmo en base **10**. El resultado está expresado en **decibeles**, abreviado **dB**. Así, para un sonido apenas audible, para el cual $P = P_{\text{ref}}$, resulta

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} = 20 \log_{10} 1 = 0 \text{ dB}$$

dado que el logaritmo de **1** es **0**. Como segundo ejemplo, consideremos un sonido que tiene una amplitud **1000** veces mayor que el anterior. Entonces

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{1000 P_{\text{ref}}}{P_{\text{ref}}} = 20 \log_{10} 1000 = 60 \text{ dB} ,$$

por ser $\log_{10} 1000 = 3$. Por último, para el sonido más intenso,

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} = 20 \log_{10} 1.000.000 = 120 \text{ dB} .$$

La expresión matemática mediante la cual se calcula el nivel de presión sonora no es en realidad importante *desde el punto de vista práctico*, ya que el instrumento con el que se mide **NPS**, es decir el **decibelímetro**, no está graduado en valores de presión, sino precisamente en **dB**, por lo cual en la práctica no hace falta *calcular* el valor de **NPS** a partir del correspondiente valor de presión.

En la **Tabla 1.2** se indican algunos valores de conversión entre presión sonora y nivel de presión sonora.

Tabla 1.2. Valor de la presión correspondiente a varios niveles de presión sonora.

| NPS [dB] | P [Pa] |
|----------|----------|
| 120 | 20,0 |
| 110 | 6,3 |
| 105 | 3,6 |
| 100 | 2,0 |
| 95 | 1,1 |
| 90 | 0,63 |
| 85 | 0,36 |
| 80 | 0,20 |
| 75 | 0,11 |
| 70 | 0,063 |
| 60 | 0,020 |
| 50 | 0,0063 |
| 40 | 0,0020 |
| 30 | 0,00063 |
| 20 | 0,00020 |
| 10 | 0,000063 |
| 0 | 0,000020 |

1.13. Algunas formas de onda

Podemos afirmar que virtualmente cada sonido implica una forma de onda diferente. Existen sin embargo algunas formas de onda que reciben especial atención, ya sea por su simplicidad o por su utilidad práctica o teórica. La primera de ellas es la **onda cuadrada**, que consiste en dos niveles (generalmente uno positivo y el otro negativo) que se van alternando en el tiempo. Cada uno de ellos permanece un tiempo $T/2$, donde T es el periodo. En la **Figura 1.8** se muestra un ejemplo. Esta onda es importante por su simplicidad geométrica. No existe en la Naturaleza, pero es muy fácil de sintetizar electrónicamente.

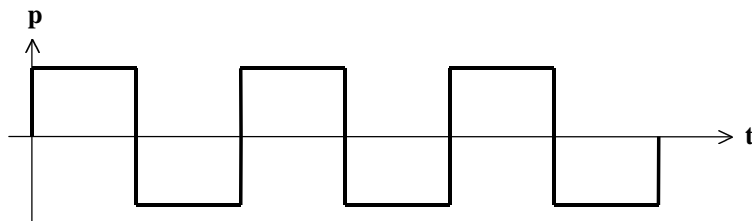


Figura 1.8. Tres ciclos de una onda cuadrada.

Una variante de la onda cuadrada es el **tren de pulsos**, en el cual el tiempo de permanencia en cada uno de los dos niveles no es el mismo. Se suele especificar un porcentaje que corresponde a la proporción del periodo en el nivel alto. En la **Figura 1.9** se muestra un tren de pulsos al **25%**.

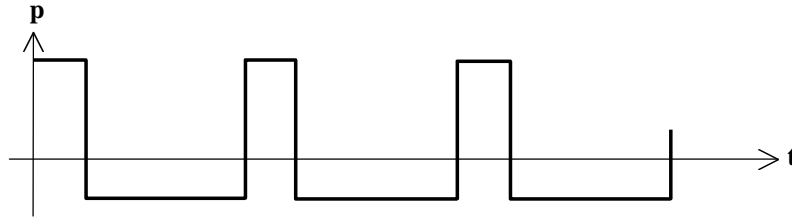


Figura 1.9. Tres ciclos de un tren de pulsos al 25%.

Otra forma de onda interesante es la **onda triangular** (**Figura 1.10**). Está formada por rampas que suben y bajan alternadamente.

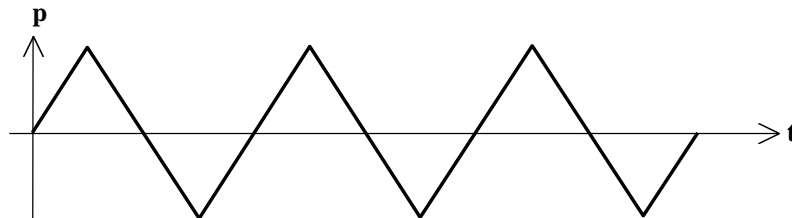


Figura 1.10. Tres ciclos de una onda triangular.

La onda **diente de sierra** (**Figura 1.11**) tiene una subida rápida y una bajada en forma de rampa o viceversa. Si bien tampoco es una forma de onda natural, la forma de onda del sonido del violín guarda cierta similitud con la diente de sierra. También tienen

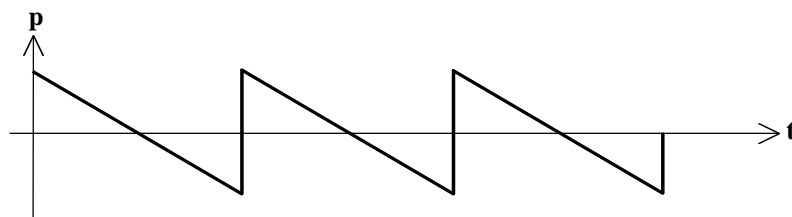


Figura 1.11. Tres ciclos de una onda diente de sierra

esta forma de onda los sonidos que se generan al rozar dos objetos, por ejemplo el chirrido cuando se frota rápidamente una tiza en una pizarra.

1.14. Onda senoidal

Finalmente, tenemos la onda más importante, no sólo en Acústica sino en toda la Física y gran parte de la Matemática: la **onda senoidal** (**Figura 1.12**), también denominada **senoide** o **sinusoide**. Si bien matemáticamente tiene cierta complicación (está representada por la función trigonométrica **seno**), físicamente esta forma de onda corresponde a las oscilaciones más sencillas posibles. Pocos sistemas son tan simples como para oscilar senoidalmente. El más conocido es el péndulo: la oscilación de un peso suspendido de un hilo sigue una ley senoidal. En el campo de la música, el diapasón de horquilla (no confundir con el corista o afinador de banda) produce un sonido casi puramente senoidal. El silbido es también casi senoidal, y lo mismo ocurre con una flauta ejecutada *piano* (suave). Una cuerda de guitarra punteada muy suavemente en su punto medio también produce un sonido aproximadamente senoidal.

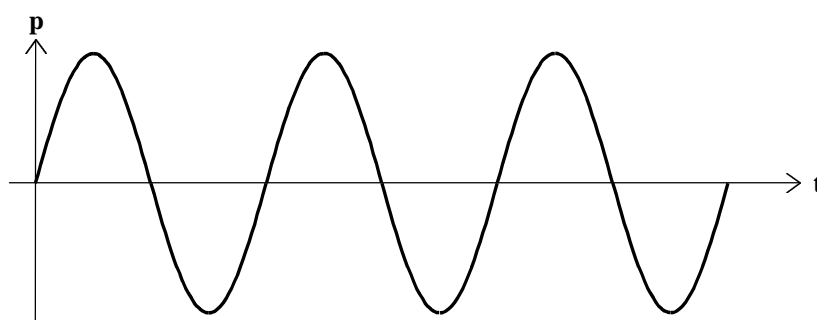


Figura 1.12. Tres ciclos de una onda senoidal o senoide.

Pero lo que da mayor importancia todavía a esta forma de onda es el hecho de que *cualquier onda periódica* puede considerarse como una *superposición* (suma) de ondas senoidales de distintas frecuencias, todas ellas múltiplos de la frecuencia de la onda (propiedad conocida como Teorema de Fourier). Dichas ondas se llaman **armónicos**. Esta superposición no se limita a ser un artificio de análisis del sonido, sino que si se escucha atentamente es perfectamente audible en muchos casos. La onda senoidal es la más simple precisamente porque *consta de una sola frecuencia*.

1.15. Espectro del sonido

Vimos que cualquier sonido periódico puede representarse como la suma de una serie de armónicos, es decir de sonidos senoidales cuyas frecuencias son **f**, **2f**, **3f**, **4f**, **5f**, etc. Por ejemplo, el **LA** central del piano, cuya frecuencia es de **440 Hz**, contiene armónicos de frecuencias **440 Hz**, **880 Hz**, **1320 Hz**, **1760 Hz**, **2200 Hz**, etc. Cada uno de estos armónicos puede tener su propia amplitud. En la **Figura 1.13a** se muestran los primeros armónicos de una onda cuadrada, y en la **Figura 1.13b** se ha obtenido su suma, que según se aprecia se va aproximando a la onda cuadrada.

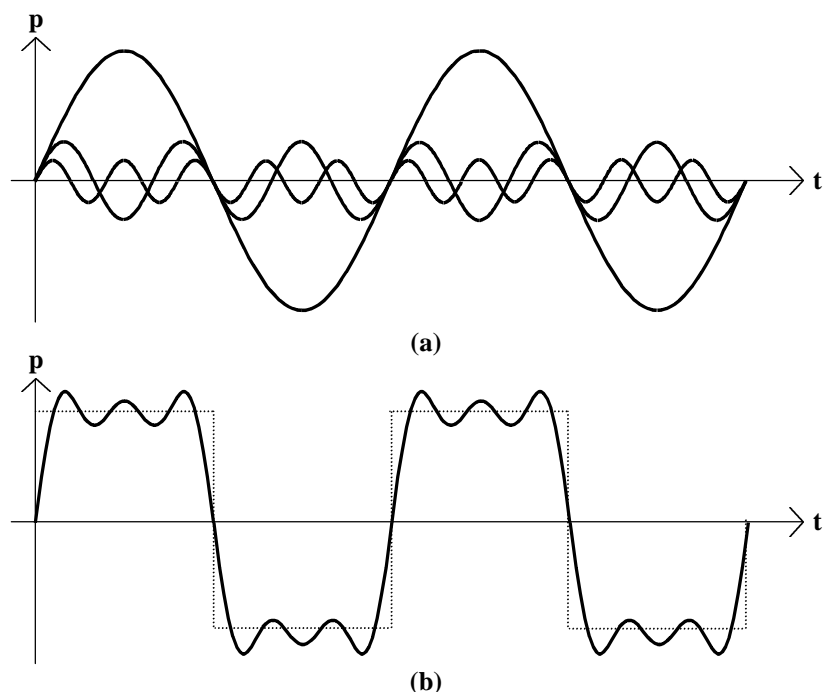


Figura 1.13. (a) Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia f_0 , cuyas frecuencias son f_0 , $3f_0$ y $5f_0$. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

La información sobre las frecuencias que contiene un determinado sonido y sus respectivas amplitudes constituyen lo que se denomina el **espectro** del sonido. El espectro se puede especificar en forma de tabla, o se puede representar gráficamente mediante un **espectrograma**, que es un gráfico con dos ejes: el horizontal, graduado en frecuencia, y el vertical, en amplitud. En la **Tabla 1.3** se indican los primeros armónicos para las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra, suponiendo que la amplitud es, en

Tabla 1.3. Amplitud de los primeros 7 armónicos del espectro de las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra.

| ARMÓNICO N° | CUADRADA | TRIANGULAR | DIENTE DE SIERRA |
|-------------|----------|------------|------------------|
| 1 | 1,27 | 0,81 | 0,64 |
| 2 | 0 | 0 | 0,32 |
| 3 | 0,42 | 0,09 | 0,21 |
| 4 | 0 | 0 | 0,16 |
| 5 | 0,25 | 0,032 | 0,13 |
| 6 | 0 | 0 | 0,11 |
| 7 | 0,18 | 0,017 | 0,091 |

los tres casos, **1**. En la **Figura 1.14** se ha representado el espectrograma para una onda cuadrada de amplitud **1** y frecuencia **100 Hz**, incluyendo hasta el armónico 7.

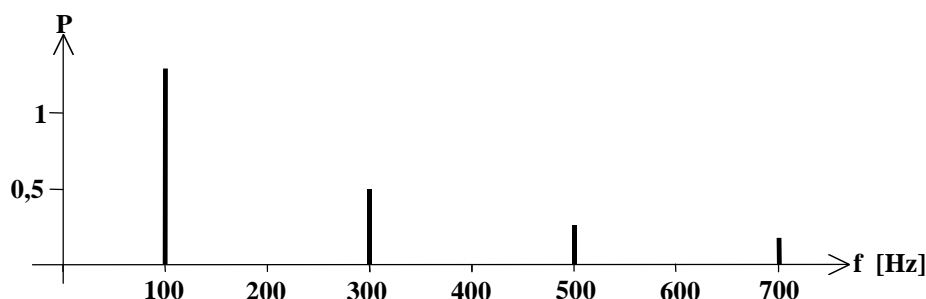


Figura 1.14. Espectro de una **onda cuadrada** de amplitud **1** y frecuencia **100 Hz**. Esta onda tiene únicamente armónicos impares.

Así como la amplitud de un sonido puede variar en el tiempo de acuerdo con su envolvente, también es posible que los diversos armónicos que integran determinada forma de onda posean sus correspondientes envolventes, que no tienen por qué ser iguales. De hecho, esto es lo que sucede en la mayoría de los sonidos naturales. Un caso bastante común es que los armónicos superiores (los de frecuencias más altas) se extingan antes que los de menor frecuencia, quedando al cabo de unos segundos un sonido prácticamente senoidal. Esto sucede por ejemplo en el piano, cuyos sonidos comienzan con un gran contenido armónico (en cantidad y amplitud), lo cual se manifiesta como una sonoridad brillante e incisiva. A medida que transcurre el tiempo, los armónicos de mayor frecuencia van desapareciendo, y el sonido se vuelve más opaco.

Agregando un tercer eje para representar el tiempo (lo cual obliga a una representación tridimensional, a menudo hecha sobre el papel o la pantalla recurriendo a la perspectiva), es posible representar gráficamente la variación temporal de cada armónico, como se muestra en la **Figura 1.15**.

1.16. Espectros inarmónicos

Hasta ahora hemos analizado el caso de **espectros armónicos**, es decir en los cuales las frecuencias presentes eran múltiplos de cierta frecuencia, denominada **frecuencia fundamental**. No hay impedimento, sin embargo, para que los “armónicos” sean de frecuencias cualesquiera, por ejemplo **100 Hz**, **235 Hz** y **357 Hz**. De hecho, muchos sonidos naturales son de esta última clase, por ejemplo el sonido de las campanas, o el correspondiente a los diversos tipos de tambores. En estos casos las ondas senoidales que constituyen el sonido en cuestión se denominan **sonidos parciales** en lugar de armónicos. Este tipo de sonidos no es periódico, a pesar de lo cual también pueden representarse gráficamente en un oscilograma. Sin embargo, lógicamente, *no podrá identificarse una frecuencia ni un periodo*. El espectro correspondiente a estos sonidos se denomina **espectro inarmónico**.

También puede representarse un espectrograma de estos sonidos. A diferencia de lo que ocurre en los espectros armónicos, las **líneas espectrales** no están equiespaciadas.

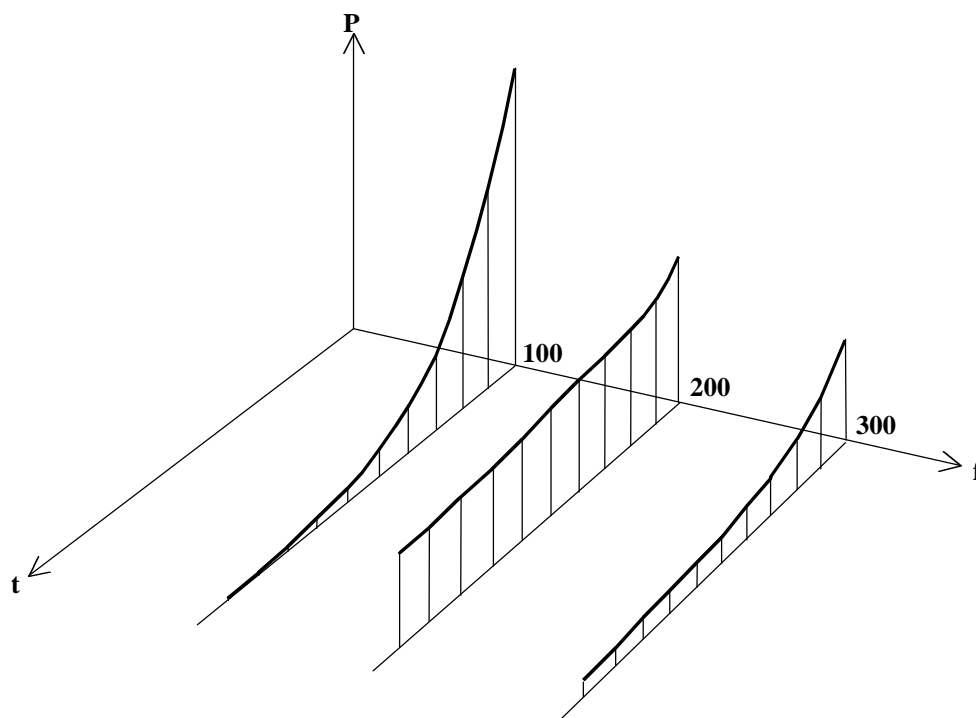


Figura 1.15. Espectrograma tridimensional en el cual se pone de manifiesto la evolución temporal de cada armónico. En este ejemplo se ha tomado una forma de onda de **100 Hz** con sólo 3 armónicos. El armónico 1 (**100 Hz**) se extingue rápidamente, el armónico 2 (**200 Hz**) se extingue muy lentamente, y el armónico 3 (**300 Hz**) se extingue moderadamente rápido. Al cabo de algún tiempo, por consiguiente, predomina ampliamente el segundo armónico.

En el caso de los espectros inarmónicos *también puede existir una variación en el tiempo*, pudiendo en este caso inclusive *variar no sólo la amplitud de los sonidos parciales sino también la frecuencia*. En los sonidos reales esta variación existe, aunque normalmente es pequeña. Se debe a que la frecuencia con que vibran algunos cuerpos físicos varía ligeramente con la amplitud de vibración, por lo cual al ir disminuyendo esta amplitud, su frecuencia varía con ella.

1.17. Espectros continuos

Existe aún otro tipo de sonidos, formados por una cantidad muy grande de parciales muy próximos entre sí, que se denominan genéricamente **ruido**. Algunos ejemplos de esto son el sonido del mar, el ruido de fondo de un cassette y el sonido que se

emite al pronunciar las consonantes **f**, **j**, **s**, **z** o simplemente al soplar. Debido a la gran cantidad de parciales, y al hecho de que cada uno es de amplitud muy pequeña, lo más conveniente es representar el espectro no mediante líneas espectrales individuales, sino como una curva continua (**Figura 1.16**) denominada **densidad espectral**, p^2 .

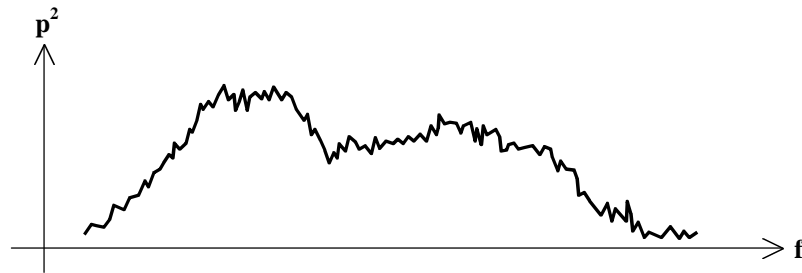


Figura 1.16. Ejemplo de espectro continuo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el vertical la **densidad espectral**, que representa la energía en función de la frecuencia.

Existen dos tipos de ruido que tienen importancia específica en Acústica: el **ruido blanco** y el **ruido rosa**. También se menciona a veces el **ruido browniano**. El **ruido blanco** (**Figura 1.17a**) se caracteriza por tener una densidad espectral constante, es decir *igual para todas las frecuencias*. Esto significa que contiene parciales de todas las frecuencias con igual amplitud. El nombre de ruido “blanco” proviene de realizar una analogía con la luz blanca, que contiene todos los *colores* del espectro con la misma intensidad. El **ruido rosa** (**Figura 1.17b**) contiene mayor proporción de bajas frecuencias (de allí el nombre de “rosa”, ya que contiene todas las frecuencias pero más las bajas frecuencias, que en la luz corresponderían al color rojo). Tiene la particularidad de que en cada **octava** (es decir el intervalo de frecuencias desde un **do** al siguiente, o desde un **re** al siguiente, etc.) tiene la misma **energía sonora**. El ruido rosa tiene aplicación en la

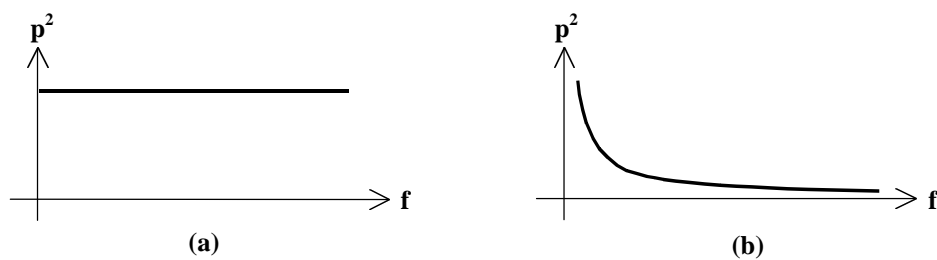


Figura 1.17. (a) Densidad espectral del **ruido blanco**. (b) Densidad espectral del **ruido rosa**.

ecualización de sistemas de sonido mediante ecualizadores por octavas o por tercios de octava. Es también una señal útil para la prueba de equipos de sonido, ya que es un tipo de ruido que suena natural al oído.

Capítulo 2

Psicoacústica

2.1. Introducción

Brevemente, la **Psicoacústica** se dedica a estudiar la percepción del sonido, es decir, cómo el oído y el cerebro procesan la información que nos llega en forma de sonido.

2.2. Sensaciones psicoacústicas

Cuando escuchamos un sonido, percibimos sensaciones que pueden ser clasificadas en tres tipos: la **altura**, la **sonoridad** y el **timbre**. La **altura** es la sensación que nos permite distinguir los sonidos graves de los agudos, y, más específicamente, diferenciar los sonidos de una escala musical. La **sonoridad**, en cambio, es la sensación por la cual distinguimos un sonido fuerte de uno débil. El **timbre** agrupa una serie de cualidades por las cuales es posible distinguir los sonidos de los diversos instrumentos y voces.

En una primera aproximación, cada parámetro físico del sonido se corresponde de manera más o menos directa con un tipo de sensación psicoacústica específica. Así, la **frecuencia** está relacionada con la sensación de **altura**, la **amplitud** con la **sonoridad**, y el **espectro** (incluyendo las posibles envolventes) con el **timbre**. Veremos, sin embargo, que la cuestión no es tan sencilla, existiendo en general una importante dependencia entre cada sensación y *todos* los parámetros del sonido.

2.3. Altura

La relación entre frecuencia y altura es bastante directa, correspondiendo las bajas frecuencias a sonidos graves y las altas frecuencias a sonidos agudos (**Figura 2.1**). En realidad, la altura como parámetro psicofísico varía un poco, además, con la intensidad del sonido, es decir que un sonido débil y otro fuerte de la misma frecuencia parecen tener alturas ligeramente distintas. También varía un poco con el timbre. Un timbre muy brillante parece ser más agudo que uno más opaco, aún cuando la frecuencia y la intensidad sean iguales.

La relación matemática entre la altura y la frecuencia es la siguiente. Si se conoce la frecuencia de una nota de la escala, por ejemplo f_{LA} , la frecuencia de la nota ubicada

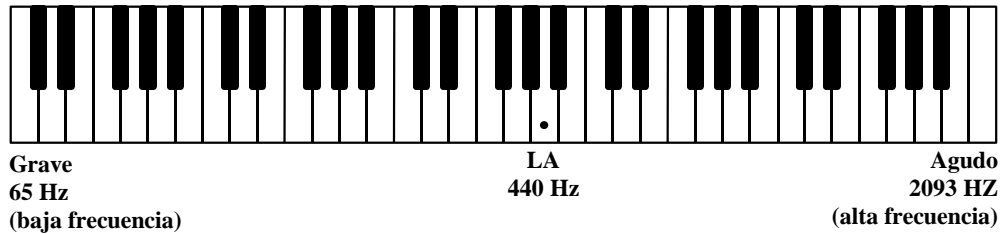


Figura 2.1. Relación entre la frecuencia y la altura en un teclado de 5 octavas. Se ha marcado el **LA** central, cuya frecuencia se encuentra normalizada internacionalmente a **440 Hz**.

un **semitono** más arriba (es decir, en un teclado, la tecla blanca o negra inmediatamente a la derecha), en este caso f_{Sib} , puede obtenerse multiplicando por $\sqrt[12]{2}$:

$$f_{\text{Sib}} = \sqrt[12]{2} \cdot f_{\text{LA}} ,$$

es decir

$$f_{\text{Sib}} \cong 1,05946 \cdot f_{\text{LA}} .$$

Así, si $f_{\text{LA}} = 440 \text{ Hz}$, resulta $f_{\text{Sib}} \cong 466,16 \text{ Hz}$. Aplicando esta fórmula sucesivamente se puede determinar la frecuencia de todas las notas superiores al **LA**. Para las notas inferiores, se *divide* por $\sqrt[12]{2}$ en lugar de multiplicar por dicho valor.

En la **Tabla 2.1** se dan las frecuencias correspondientes a la octava central (la que contiene el **LA 440**), obtenidas por este procedimiento. Para determinar las frecuencias de las notas de otras octavas, podría continuarse con el procedimiento anterior o bien

Tabla 2.1. Frecuencias correspondientes a las notas de la octava central.

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|------|-----------------|
| DO | 261,63 |
| DO# | 277,18 |
| RE | 293,66 |
| RE# | 311,13 |
| MI | 329,63 |
| FA | 349,23 |
| FA# | 369,99 |
| SOL | 392,00 |
| SOL# | 415,30 |
| LA | 440,00 |
| LA# | 466,16 |
| SI | 493,88 |
| DO' | 523,25 |

utilizar otra relación matemática que indica que para obtener la frecuencia de una nota una octava más alta, simplemente se *multiplica por 2*. Por ejemplo el **LA** ubicado una octava por encima del **LA** central tiene una frecuencia de $2 \times 440 \text{ Hz}$, es decir **880 Hz**. Análogamente, para determinar la frecuencia de una nota una octava más baja, se *divide por 2*.

2.4. Sonoridad

La sensación de **sonoridad**, es decir de fuerza, volumen o intensidad de un sonido, está, en principio, relacionada con su **amplitud**. Sin embargo la relación no es tan directa como la que existe entre la frecuencia y la altura. De hecho, la sonoridad resulta en realidad fuertemente dependiente no sólo de la amplitud sino también de la *frecuencia*. Así, a igualdad de frecuencias podemos afirmar que un sonido de mayor amplitud es más sonoro. En la **Figura 2.2** se muestra el ejemplo de dos sonidos de **200 Hz**, de los cuales el de mayor amplitud es más sonoro. Pero si aumentamos la frecuencia del sonido de *menor amplitud*, éste puede llegar a percibirse como *más sonoro*. En el ejemplo de la **Figura 2.3**, el sonido de menor amplitud se lleva a **600 Hz**, percibiéndose ahora con mayor sonoridad.

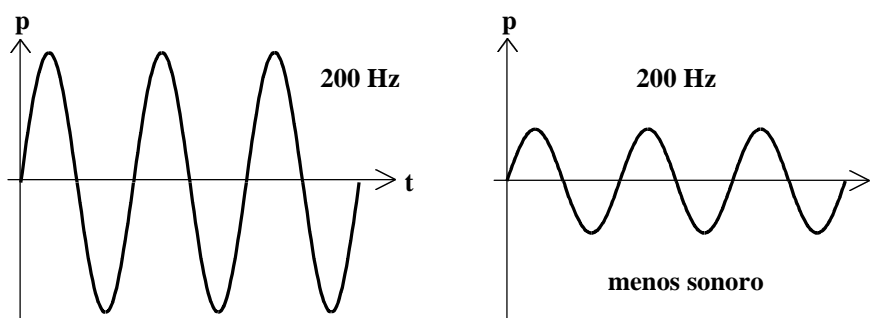


Figura 2.2. Dos senoides de frecuencia **200 Hz**. La de mayor amplitud se percibe como más sonora.

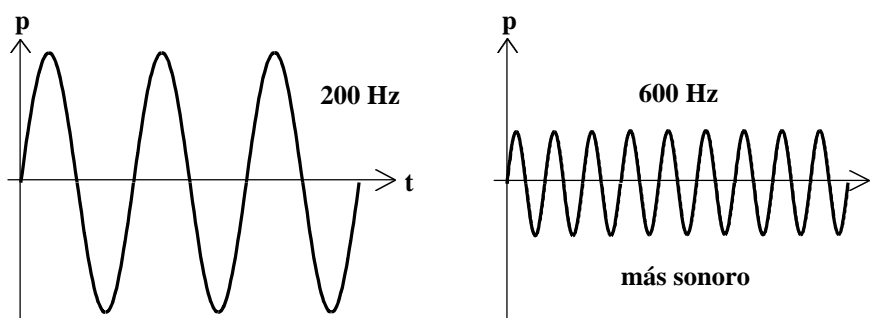


Figura 2.3. Dos senoides de frecuencia **200 Hz** y **600 Hz** respectivamente. La de mayor amplitud se percibe como *menos* sonora.

Los resultados anteriores obedecen al hecho de que el oído es más sensible en las frecuencias centrales, es decir entre **500 Hz** y **5 kHz**, que en las muy bajas o muy altas. Se han realizado investigaciones para demostrar este hecho, la primera de las cuales data de **1933**, y fue llevada a cabo por los investigadores norteamericanos Fletcher y Munson. El experimento consistía en lo siguiente. Se hacía escuchar a personas de buena audición un tono puro (es decir senoidal) de **1 kHz** y de un nivel de presión sonora conocido, por ejemplo **40 dB**. Luego se les presentaba un tono de otra frecuencia (por ejemplo **200 Hz**) y se les pedía que ajustaran el volumen hasta que les pareciera *igualmente sonoro* que el tono de **1 kHz**. Por último se medía el nivel de presión sonora. Repitiendo este experimento con diversas frecuencias y niveles de presión sonora se obtuvieron las **curvas de igual nivel de sonoridad**, o **curvas de Fletcher y Munson**, que se adjuntan en la **Figura 2.4**. Estas curvas permitieron definir el **nivel de sonoridad, NS**, de un tono como *el nivel de presión sonora de un tono de 1 kHz igualmente*

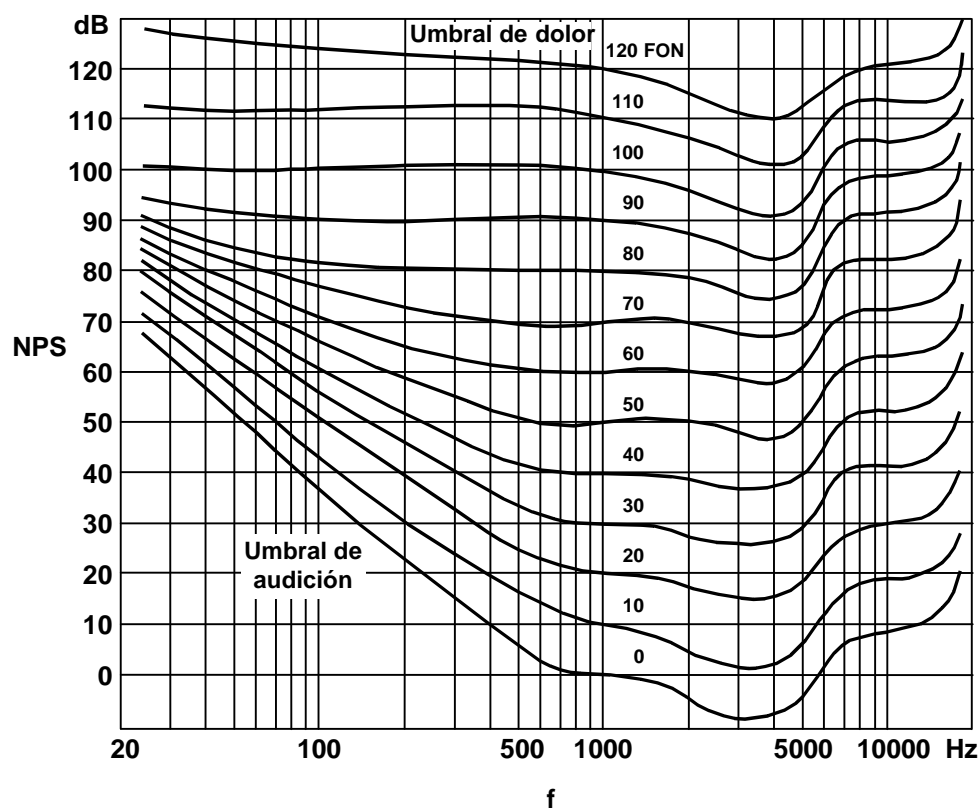


Figura 2.4. Curvas de Fletcher y Munson. Un tono de **200 Hz** y **40 dB** de NPS provocará la misma sensación de sonoridad que uno de **1000 Hz** y **20 dB** de NPS. Se dice entonces que tiene un **nivel de sonoridad** de **20 fon**. Obsérvese que a igual NPS los sonidos muy graves (baja frecuencia) y los muy agudos (alta frecuencia) tienen menor nivel de sonoridad que los sonidos medios. Además, en la zona de los **3000 Hz** se tiene la mayor sensibilidad del oído. La curva de **0 fon** es el **umbral de audición**, y la de **120 fon**, el **umbral de dolor**.

sonoro que dicho tono. Para diferenciar el nivel sonoro del nivel de presión sonora, se lo expresa en **fon**. En la **Figura 2.4** se muestra el ejemplo de un tono de **200 Hz** y **40 dB**, el cual se escucha igualmente sonoro que uno de **1000 Hz** y **20 dB**, de donde el primero tiene **NS = 20 fon**. Las curvas extremas son los límites de la audición humana. La correspondiente a **0 fon** es el **umbral de audición**, por debajo del cual una vibración del aire no es perceptible. Conviene aclarar que el umbral de audición depende realmente de la persona y del estado de su oído. La curva de **0 fon** es el umbral para personas de buena audición. Una pérdida de **10 a 20 dB** respecto a este umbral se considera normal. Por encima de los **25 dB** de pérdida, comienzan las dificultades para la comprensión oral. La curva de **120 fon** corresponde al **umbral de dolor**. De allí para arriba, en lugar de sonido como tal comienza a percibirse un *dolor intenso*, además de empezar de inmediato el *daño irreversible* del oído interno.

Las curvas de Fletcher y Munson permiten explicar diversos fenómenos y hechos que se observan en audiotécnica, por ejemplo por qué se requiere mayor potencia de un equipo de sonido para tener buenos graves que para lograr una adecuada respuesta en frecuencias medias. Son también la razón de los filtros de **sonoridad** de los equipos de sonido, que aumentan la proporción de graves cuando se escucha a bajo volumen. También explican por qué un equipo de baja potencia y mala calidad puede así y todo sonar “fuerte”: al distorsionar el sonido, agrega armónicos de alta frecuencia que se escuchan más que las bajas frecuencias originales.

Una vez conocida esta característica de la audición, se pretendió construir un instrumento de medición capaz de indicar no la variable física asociada (por ejemplo el nivel de presión sonora), sino precisamente el nivel sonoro. Si bien ninguno de los intentos resolvió el problema por completo, se logró una solución aceptable agregando a un decibelímetro un filtro que tuviera una respuesta similar a la del oído. Para ello, antes de realizar la medición simplemente se atenúan los graves, que es justamente lo que hace el oído. El resultado fue una nueva escala de decibeleles: los **decibeleles A (dBA)**, que se popularizó a tal punto que la mayoría de las mediciones de sonido o ruido hoy en día se expresan en **dBA**. Las excepciones son los casos en que se requiere valores objetivos con carácter experimental. El instrumento utilizado para medir **dBA** es el **medidor de nivel sonoro** (no debe confundirse *nivel sonoro* con *nivel de sonoridad*, ya que el primero es el resultado de aplicar el filtro antedicho, mientras que el segundo es el parámetro psicoacústico definido por las curvas de Fletcher y Munson). En la **Tabla 2.2** se resumen algunos niveles sonoros de fuentes y ambientes típicos, que puede ser de utilidad para estimar un nivel sonoro cuando no se dispone de un medidor de nivel sonoro.

2.5. Timbre

El **timbre** de un sonido es una cualidad compleja, que depende de varias características físicas. El estudio de los diversos aspectos del timbre fue muy motivado por el deseo de reproducir artificialmente los sonidos de los instrumentos naturales, así como de crear timbres completamente nuevos, dando origen a diversas técnicas de **síntesis de sonidos**. Si bien hoy en día los **sintetizadores electrónicos** son los de mayor difusión y expansión, la síntesis de sonidos cuenta con varios siglos de historia. En efecto, el **órgano de tubos** puede atestiguar los esfuerzos del ingenio humano en este sentido.

Hay dos enfoques para el análisis del timbre. El primero estudia los sonidos aislados, y se propone identificar todos los elementos que los distinguen de otros sonidos. El

Tabla 2.2. Nivel sonoro para varias fuentes y ambientes típicos.

| FUENTE | NS (dBA) |
|------------------------------|----------|
| Umbral de dolor | 120 |
| Discoteca a todo volumen | 110 |
| Martillo neumático a 2 m | 105 |
| Ambiente industrial ruidoso | 90 |
| Piano a 1 m con fuerza media | 80 |
| Automóvil silencioso a 2 m | 70 |
| Conversación normal | 60 |
| Ruido urbano de noche | 50 |
| Habitación interior (día) | 40 |
| Habitación interior (noche) | 30 |
| Estudio de grabación | 20 |
| Cámara sonoamortiguada | 10 |
| Umbral de audición a 1 kHz | 0 |

segundo enfoque, clasifica los sonidos según la fuente (por ejemplo un instrumento), y asocia una cualidad tímbrica con cada fuente.

El primer enfoque distingue un sonido grave de un clarinete, por ejemplo, de otro sonido agudo del mismo instrumento. De hecho, quien no conoce el clarinete, al escuchar separadamente ambos registros (grave y agudo) puede pensar que se trata de instrumentos diferentes. Aquí intervienen dos elementos: el **espectro** y las **envolventes**. Hay una **envolvente primaria**, que es la que determina la forma en que varía en el tiempo la amplitud general, y una serie de **envolventes secundarias**, que corresponden a las variaciones temporales relativas de los armónicos o de los parciales (según que el espectro sea armónico o inarmónico respectivamente). La envolvente primaria está fuertemente relacionada con la forma en que se produce el sonido, y caracteriza a familias completas de instrumentos. Las envolventes secundarias dependen de la manera en que se amortiguan las diferentes frecuencias del espectro.

En los sintetizadores electrónicos de sonidos se ha procurado desde el principio proveer recursos para controlar estas envolventes. Al principio se trabajaba con una envolvente primaria de 4 tramos, denominada **ADSR** (siglas de Attack-Decay-Sustain-Release, es decir Ataque-Caída-Sostén-Relevo), que se muestra en la **Figura 2.5**. Los sintetizadores actuales permiten, según su complejidad (lo cual en general está en proporción al costo), definir las envolventes con mayor precisión, es decir con mayor cantidad de tramos. Las envolventes secundarias se han implementado con una multitud de técnicas, por ejemplo la utilización de filtros variables con el tiempo, la modulación de frecuencia, y la síntesis aditiva.

Las envolventes mencionadas varían con la altura del sonido, es decir con su frecuencia, y también pueden variar con la intensidad, es decir con la amplitud del sonido. En el primer caso, resulta natural que en los sonidos de mayor frecuencia los tiempos se reduzcan, ya que a mayor frecuencia las cosas suceden más rápido. En el segundo caso, los sonidos más intensos producen un efecto equivalente a una distorsión, lo cual agrega más frecuencias al espectro o refuerza las ya presentes, modificando de hecho las envolventes secundarias.

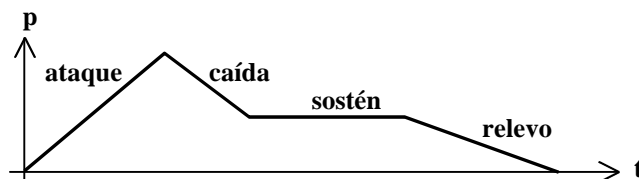


Figura 2.5. Envolvente característica de los primeros sintetizadores de sonido, formada por 4 tramos, que aproxima las envolventes de diversos instrumentos, variando la posición de los extremos de cada tramo.

2.6. Formantes

El segundo enfoque de análisis del timbre, en cambio, busca las características comunes a todos los sonidos de un instrumento o de una voz, y las que los distinguen de los sonidos de otros instrumentos o voces. El elemento fundamental de este análisis es la existencia de **resonancias** en los componentes accesorios al mecanismo propiamente dicho de producción del sonido, resonancias que **filtran** el sonido, favoreciendo determinadas frecuencias más que otras.

Para ilustrar este concepto, tomemos por ejemplo la voz humana. El mecanismo que produce el sonido son las denominadas **cuerdas vocales**, ubicadas en la laringe, detrás de la **nuez de Adán** (protuberancia notoria en los varones a la mitad del cuello). Dicho sonido es filtrado por las diversas cavidades del conducto vocal: la **laringe**, la **cavidad oral** (boca) y la **cavidad nasal** (interior de la nariz). Estas cavidades actúan como tubos, y es sabido que al escuchar a través de un tubo, el sonido se “colorea”, es decir que adquiere una cualidad diferente de la original, debido precisamente a su **acción filtrante**, que privilegia algunas frecuencias sobre otras. Cada una de las cavidades agrega una “coloración” propia, que se combinan para originar no sólo el timbre particular de cada voz, sino el que corresponde, dentro de una misma voz, a cada vocal.

Las frecuencias de las resonancias se denominan **formantes**. En la **Figura 2.6** se muestra, mediante un ejemplo, la forma en que actúan los formantes. Por simplicidad se ha supuesto que el sonido original tiene un espectro compuesto por varios armónicos de igual amplitud. Luego de atravesar el filtro, aquellos armónicos cuyas frecuencias son cercanas a los formantes **F₁**, **F₂** y **F₃** predominan frente a las otras.

El cerebro es capaz de realizar (inconscientemente) un análisis tan elaborado de los sonidos que percibe el oído como para *detectar los formantes característicos de un instrumento o fuente sonora*, y así asociar como pertenecientes a *un único timbre* sonidos con espectros bastante diversos.

Por esta razón, el timbre puede reconocerse aún cuando debido a una deficiencia de un sistema de sonido el espectro se altere. Esto sucede, por ejemplo, en los equipos de mala calidad, que atenúan las frecuencias bajas (graves) así como las altas (agudos). Sin embargo, los formantes, que habitualmente están en la región central del espectro, es decir entre los **200 Hz** y los **4000 Hz**, no son tan severamente afectados y por lo tanto “sobreviven” a la distorsión, permitiendo reconocer el timbre. Un ejemplo son los radios de bolsillo. Otro es el teléfono; en este caso, la fundamental (primer armónico) de

las voces masculinas (y de gran parte de las femeninas) es virtualmente eliminada, lo que no impide que sigamos reconociendo ni los **fonemas** ni los timbres de voz.

No obstante, conviene aclarar que la mera **identidad tímbrica** no es equivalente a la **fidelidad** del sonido, aunque en muchos casos, como en el sistema telefónico, es suficiente con la primera para lograr una buena inteligibilidad del mensaje.

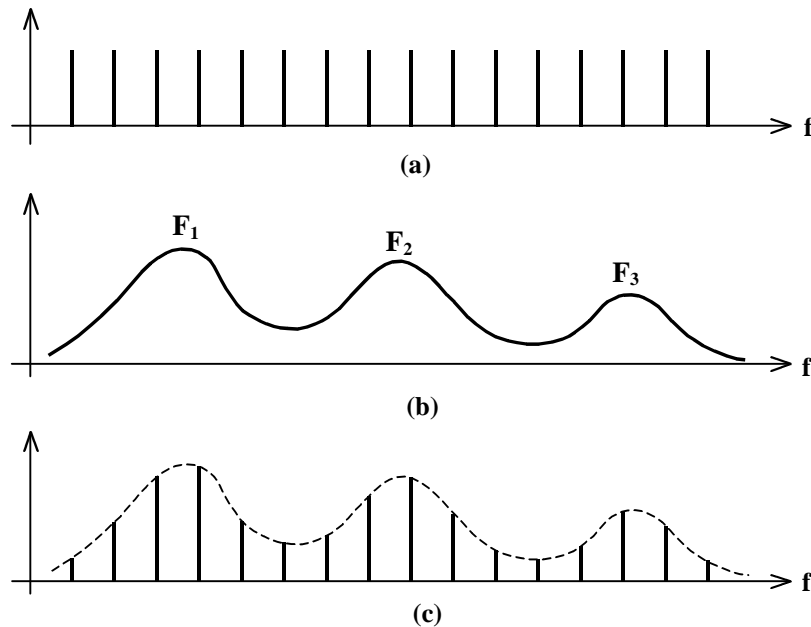


Figura 2.6. Efecto de los formantes. **(a)** Espectro hipotético de un sonido (por simplicidad se ha supuesto de amplitud constante). **(b)** Curva de los formantes. **(c)** Espectro luego de la acción de filtrado de los formantes.

Para concluir con esta breve descripción del timbre, es interesante observar que ni los formantes, ni las envolventes ni el espectro *tomados aisladamente* permiten explicar el timbre, que es más bien resultado de la interacción de todos estos factores. Se han realizado experimentos en los cuales se priva al sonido de un instrumento de su ataque (es decir se altera severamente su envolvente), y el sonido se vuelve prácticamente irreconocible, aunque sus formantes y su espectro no varíen. Por ejemplo, quitando el ataque al piano se obtiene un sonido que más bien parecerá ser de algún instrumento de viento. Del mismo modo, si conservamos la envolvente original pero cambiamos los formantes, se escuchará un sonido algo percusivo como el del piano, pero indudablemente diferenciado de aquél. Se han realizado multitud de experimentos que muestran fenómenos de este tipo y que ponen de manifiesto la complejidad del timbre.

2.7. Direccionalidad del sonido

Hasta el momento hemos estudiado el sonido como una onda de presión que pasaba por un lugar, sin prestar atención a su procedencia. Pero los sonidos reales se origi-

nan en fuentes que están ubicadas en algún lugar del espacio circundante, dando origen a dos tipos de sensaciones: la **direccionalidad** y la **espacialidad**. La direccionalidad se refiere a la capacidad de localizar la dirección de donde proviene el sonido. Esta sensación es la que nos permite ubicar visualmente una fuente sonora luego de escucharla. La espacialidad, en cambio nos permite asociar un sonido con el ambiente en el cual éste se propaga, y estimar por ejemplo las dimensiones de una habitación o una sala sin necesidad de recurrir a la vista.

La direccionalidad está vinculada con dos fenómenos. El primero es la pequeña diferencia de tiempos que hay entre la percepción de un sonido con el oído derecho y con el oído izquierdo, debido a que el recorrido de la onda sonora desde la fuente (un instrumento, por ejemplo) hasta cada oído es diferente (**Figura 2.7**). Así, un sonido proveniente de la izquierda llegará antes al oído izquierdo, simplemente porque éste está más cerca de la fuente sonora. Esta diferencia es siempre menor que **0,6 ms**.

El otro fenómeno es la diferencia de presiones sonoras (o intensidades), también causada por la diferencia entre las distancias. En el ejemplo del sonido que viene de la izquierda, la presión sonora es mayor en el oído izquierdo, no sólo por estar más cerca de la fuente, sino porque además la cabeza actúa como barrera para el sonido.

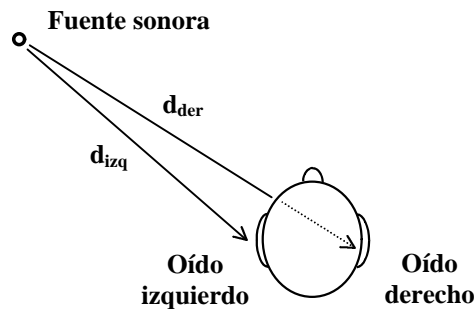


Figura 2.7. Direccionalidad del sonido. El recorrido entre la fuente sonora y el oído izquierdo es menor que el correspondiente al oído derecho, es decir $d_{izq} < d_{der}$. Por esto el sonido llega antes y con mayor presión al oído izquierdo que al derecho.

2.8. Efecto Haas (de precedencia)

Un experimento interesante consiste en alimentar unos auriculares estereofónicos con dos señales iguales, una de las cuales se encuentra ligeramente retardada respecto a la otra (**Figura 2.8**). Si se va aumentando el retardo desde **0** a **0,6 ms**, se crea la sensación de una **fuentes virtual** (es decir aparente) que parece desplazarse desde el frente hacia el lado que no experimenta retardo. Después de los **0,6 ms** y hasta los **35 ms** de retardo, la fuente virtual permanece más o menos fija, pero parece *ensancharse* cada vez más. Para retardos mayores de **35 ms** la fuente virtual se divide en dos, percibiéndose separadamente ambos canales, como provenientes de fuentes diferentes. A medida que el retardo se hace mayor, el segundo sonido aparece como un **eco** del primero. Este experimento

ilustra el denominado **efecto de precedencia**, o también **efecto Haas** (en honor al investigador que estudió sus consecuencias para la inteligibilidad de la palabra), que puede utilizarse para controlar de un modo más realista la ubicación aparente de una fuente en la imagen estereofónica.

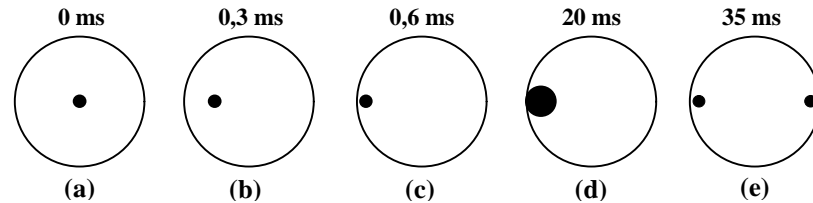


Figura 2.8. Efecto **Haas**, o efecto de **precedencia**. Se envía por medio de auriculares un sonido corto a ambos oídos, estando el correspondiente al oído derecho retrasado respecto al del oído izquierdo. En la figura se muestran las imágenes auditivas ante diferentes retardos: **(a)** La señal llega a ambos oídos simultáneamente (sin retardo). **(b)** La señal llega al oído izquierdo **0,3 ms** después que al oído derecho: la fuente virtual se desplaza hacia la derecha. **(c)** La señal llega al oído izquierdo **0,6 ms** después que al oído derecho: la fuente virtual deja de moverse. **(d)** La señal llega al oído izquierdo **20 ms** después que al oído derecho: la fuente virtual parece ensancharse. **(e)** La señal llega al oído izquierdo **35 ms** después que al oído derecho: por primera vez se crea la sensación de *dos fuentes virtuales*.

2.9. Espacialidad

La espacialidad del sonido depende de varios factores. El primero es la **distancia** entre la fuente y el oído. Esto está vinculado a la familiaridad que se tenga con una fuente sonora específica (o un tipo de fuente). A mayor distancia, la presión sonora es menor, lo que hace que si se conoce la fuente, se pueda tener una idea de la distancia. Por ejemplo, si escuchamos a alguien *hablar normalmente*, podemos saber si se encuentra cerca o lejos. Si se trata de una fuente desconocida, el cerebro la asociará inconscientemente con alguna fuente que resulte más familiar.

El segundo factor lo constituyen las **reflexiones tempranas**. En el descampado, la onda sonora generada por una fuente se aleja indefinidamente atenuándose hasta volverse inaudible (**Figura 2.9a**). En un ambiente cerrado, en cambio, la onda sonora se refleja en las paredes múltiples veces (**Figura 2.9b**). Las primeras reflexiones se denominan **reflexiones tempranas**. Las reflexiones tempranas proveen al sistema auditivo una clave temporal que se relaciona con la distancia entre las paredes, lo cual a su vez se vincula al tamaño del ambiente. Esto crea la sensación de **ambiencia**.

El tercer factor que hace a la espacialidad del sonido es la **reverberación**. El fenómeno de la reverberación se produce como consecuencia de las numerosas **reflexiones tardías** del sonido. Mientras que las primeras reflexiones (las reflexiones tempranas) están distanciadas considerablemente, las subsiguientes comienzan a superponerse entre sí, debido a que aparecen las reflexiones de las reflexiones, y luego las reflexiones

de las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente. Esto lleva a que al cabo de unos pocos instantes se combinen miles de reflexiones que dan origen a la reverberación (**Figura 2.10**).

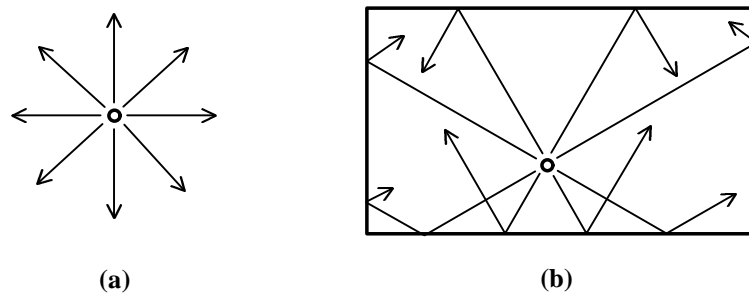


Figura 2.9. (a) Una fuente sonora en campo abierto: el sonido se aleja indefinidamente de la fuente. (b) Una fuente sonora encerrada en un ambiente cerrado: el sonido se refleja una y otra vez en las superficies del recinto (paredes, techo y piso).

El efecto más conocido de la reverberación es el hecho de que el sonido se prolonga aún después de interrumpida la fuente. Por ejemplo si golpeamos las manos, aunque el sonido generado es muy corto, “permanece” en el ambiente durante algunos instantes. El tiempo de permanencia, o **tiempo de reverberación**, depende de las características acústicas del ambiente, y nos da una clara sensación de espacialidad que puede y *debe* ser aprovechada en audiotécnica para evocar ambientes de gran realismo.

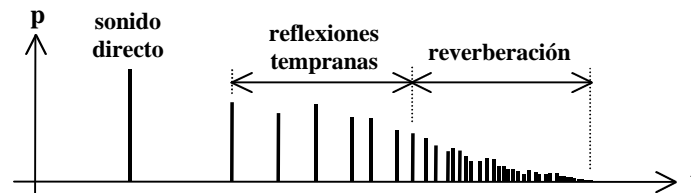


Figura 2.10. Reflexiones tempranas y reverberación en un ambiente cerrado.

El último factor que interviene en la sensación de espacialidad es el movimiento de la fuente. Muchas fuentes son fijas, pero otras son móviles, y la movilidad es percibida a través no solo del desplazamiento evocado por la dirección de procedencia del sonido, sino por el denominado **efecto Doppler**, por el cual la frecuencia de una fuente móvil parece cambiar. Así, cuando una ambulancia se acerca a nosotros, la altura (frecuencia) del sonido emitido por la sirena es mayor (más agudo) que cuando la ambulancia se detiene. Cuando, contrariamente, ésta se aleja, la altura baja, (más grave). Este efecto sólo rara vez se utiliza en música, ya que normalmente se supone que los instrumentos musicales se mantienen en una posición determinada, o los eventuales desplazamientos se producen con lentitud, siendo el cambio de frecuencia imperceptible.

Tiene aplicación, sin embargo, en las bandas de sonido de películas o videos, ya que permite simular con mayor realismo una fuente móvil (típicamente un vehículo).

2.10. Enmascaramiento

Dentro de las cualidades del oído hay una que tiene consecuencias de gran importancia para la audición, y es el hecho de que los sonidos son capaces de **enmascarar** a otros sonidos. Enmascarar a un sonido significa ocultarlo o hacerlo imperceptible. El **enmascaramiento** es un fenómeno bastante familiar para todos. Sucede, por ejemplo, cuando intentamos escuchar a alguien que habla en medio de un ruido muy intenso: no podemos discriminar lo que dice porque su voz es *enmascarada* por el ruido.

Es interesante observar que el enmascaramiento *es una propiedad del oído, no del sonido*. En un buen equipo de audio, si mezclamos un sonido muy intenso (por ejemplo **90 dB**) con otro muy débil (por ejemplo **20 dB**), la salida de los parlantes contendrá *ambos* sonidos en sus proporciones originales. Esto puede comprobarse aislando sucesivamente, mediante filtros adecuados, uno u otro sonido. Sin embargo el oído *no percibirá* el de **20 dB**.

Se ha estudiado con gran detalle el efecto enmascarador de los sonidos sobre otros sonidos. Para ello se determinó cómo cambia la curva del umbral de audición ante la presencia de un sonido dado (denominado **sonido máscara**, o **sonido enmascarante**). Esta determinación se repitió para diversos sonidos máscara, de distintas frecuencias, amplitudes y contenidos espectrales. A modo de ejemplo, en la **Figura 2.11** se muestra el efecto de un tono máscara de **400 Hz** para varios niveles sonoros (**40 dB**, **60 dB** y **80 dB**). Se puede apreciar que a medida que aumenta el nivel de presión sonora del tono máscara, mayor resulta el incremento del umbral, lo cual significa que los otros tonos deberán ser cada vez más intensos para no ser enmascarados. Por otra parte, la región enmascarada se ensancha, vale decir que la zona de influencia de la máscara crece. En otras palabras, al aumentar el nivel del tono máscara, se produce un incremento cuantitativo (mayor nivel) y cualitativo (más frecuencias) del umbral.

El enmascaramiento es, en cierto sentido, un defecto del oído, pero también es una virtud, ya que nos permite desembarazarnos de una cantidad de información inútil o difícil de procesar por el cerebro. Una interesante aplicación del enmascaramiento es la compresión de los datos de **audio digital**, de manera de reducir la cantidad de espacio requerido para almacenar un tiempo dado de música. La técnica se basa en aprovechar que mucha información que aparece en una grabación de alta calidad no aporta nada a la audición, ya que es enmascarada por otros tonos presentes, de modo que puede eliminarse, con ahorro de espacio. Por ejemplo, si se detecta que existe un tono de **400 Hz** de **80 dB**, de acuerdo a lo indicado por la curva de **80 dB** de la **Figura 2.11** un tono de **1 kHz** y **30 dB** será inaudible, y por consiguiente se puede eliminar sin perjuicio alguno para la calidad de la reproducción. Esta idea se aplica en los **DCC (Digital Compact Cassette)**, o cassette compacto digital) y en los **MD (Minidisc)**, así como en el formato comprimido **MP3** usado en Internet. Últimamente también se está utilizando para mejorar la calidad de los **CD (Compact Disc)** del estándar de **16 bits** a **19** ó **20 bits**.

La música funcional de los locales comerciales, los bares y algunas salas de espera de consultorios médicos, también aprovecha el fenómeno de enmascaramiento, posibilitando cierta “privacidad pública”, al impedir que las conversaciones ajenas puedan ser escuchadas por terceras personas.

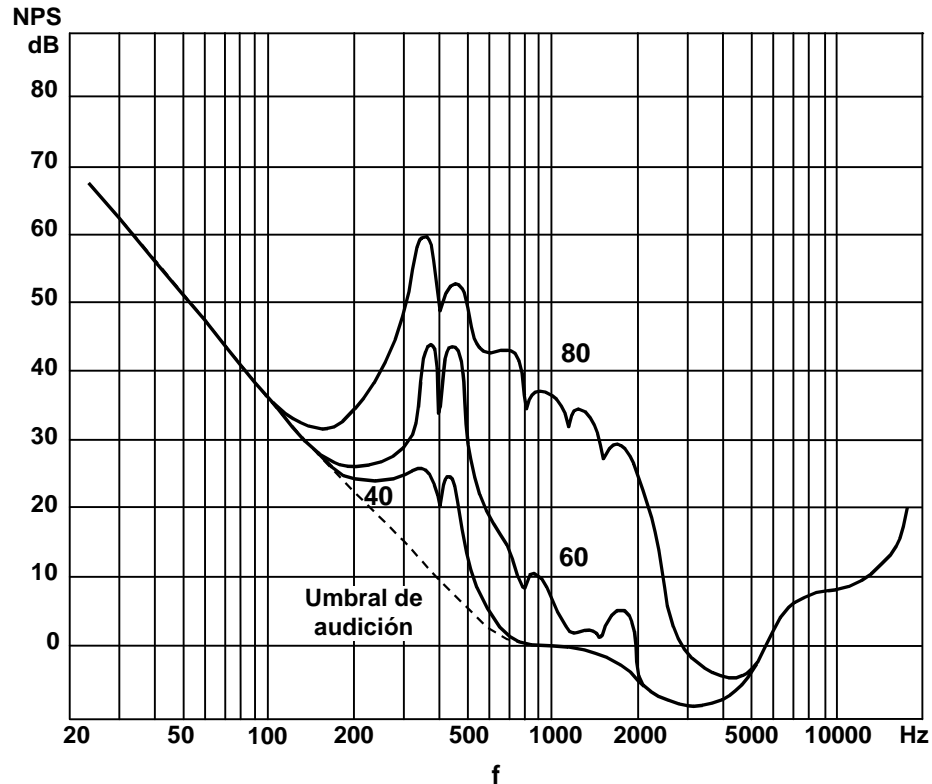


Figura 2.11. Enmascaramiento. Curvas de umbral de audición ante la presencia de un **tono máscara** de **400 Hz** (según Egan, Harold y Hake). Se muestran las curvas correspondientes a los casos en que el tono máscara tiene niveles de presión sonora de **40 dB**, **60 dB** y **80 dB** respectivamente, y en línea de trazos, el umbral de audición original. Se observa que cuanto mayor es el nivel del tono máscara, mayor es el incremento del umbral, y *más amplia* la zona del espectro afectada.

Por último, también se apela al enmascaramiento en forma inconsciente cuando se incrementa el volumen de un equipo de música o del walkman ante la existencia de ruidos ambientes. En este caso, al elevar el nivel sonoro de la música, ésta enmascara al ruido ambiente, permitiendo escuchar la música en mejores condiciones. En el mundo moderno el ruido ambiente es considerable, lo que ha llevado a la sociedad al acostumbamiento, y aún a la predilección por la música “a todo volumen”. Esto es potencialmente peligroso para la salud auditiva (ver capítulo 5), ya que para enmascarar el ruido con la música se requiere que el nivel de ésta se encuentre entre **20 y 30 dB** por arriba del ruido. Así, si el ruido ambiente es de **75 dB**, es probable que el usuario del walkman esté escuchando a un nivel cercano a los **100 dB**.

Capítulo 3

Acústica Musical

3.1. Introducción

La **Acústica Musical** estudia no sólo el comportamiento de los instrumentos musicales (tanto acústicos como electroacústicos), sino también las relaciones entre los distintos sonidos para dar origen a sensaciones musicalmente significativas, como la percepción de una escala musical, la sensación de consonancia y disonancia, los diferenciación tímbrica, etc.

3.2. Consonancia y disonancia

Al superponer dos sonidos de frecuencias muy próximas entre sí tiene lugar un fenómeno de **batido (batimento)** o **pulsaciones** entre ambos, consistente en una fluctuación periódica de la amplitud. Por ejemplo, si superponemos dos tonos puros de **700 Hz** y **800 Hz** e igual amplitud, se tiene la situación ilustrada en la **Figura 3.1**. Al sumarlos, dado que en el instante inicial ($t = 0$) están en fase (es decir que los cruces por cero coinciden en el tiempo), la amplitud se duplica. A medida que transcurre el tiempo, debido a la diferencia de frecuencia, las dos senoides se van desfasando, y hacia los **5 ms**, el octavo semiperiodo de la senoide de **800 Hz** y el séptimo de la de **700 Hz** están prácticamente en contrafase, razón por la cual el resultado es casi nulo. Hacia los **10 ms** vuelven a estar en fase, y por lo tanto la amplitud vuelve a ser doble. Se obtiene así un sonido modulado por una envolvente que se repite cada **10 ms**, es decir que tiene una frecuencia de **100 Hz**. Obsérvese que esta frecuencia es la diferencia entre las dos frecuencias superpuestas:

$$100 \text{ Hz} = 800 \text{ Hz} - 700 \text{ Hz} .$$

El resultado anterior se puede generalizar. Si se superponen (suman) dos sonidos de frecuencias f_1 y f_2 , (f_1 mayor que f_2), entonces aparecen pulsaciones de frecuencia $f_1 - f_2$. Si la diferencia de frecuencias es muy pequeña, entonces las pulsaciones serán muy lentas, y no se percibirán como una pulsación sino como una suave envolvente. Por ejemplo, si las frecuencias son **440,1 Hz** y **440 Hz**, la diferencia es **0,1 Hz**, es decir una pulsación cada **10 s**. En este caso, dado que la gran mayoría de las notas usadas en mú-

sica son mucho más cortas que eso, no llegará a completarse una pulsación, produciéndose más bien la sensación de un sonido más cantado, más expresivo.

Si las pulsaciones son un poco más rápidas, por ejemplo **1 ó 2 Hz**, se percibe un efecto llamado **trémolo**, semejante a notas repetidas. Si son bastante más rápidas, por ejemplo **5 ó 10 Hz** hasta unos **50 Hz**, el resultado produce una sensación de agitación comúnmente denominada **disonancia**.

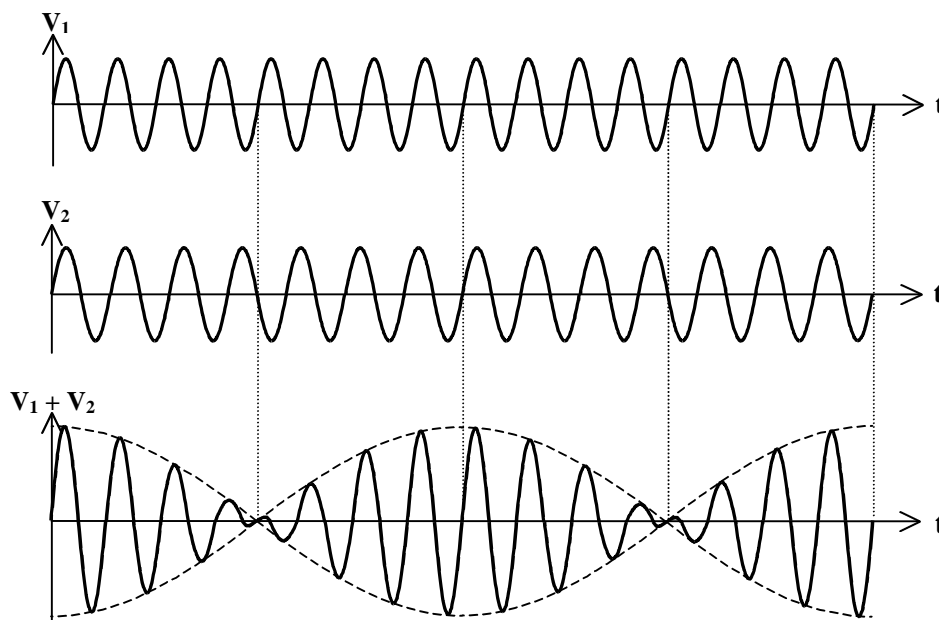


Figura 3.1. Batido entre dos tonos de frecuencia **800 Hz** (arriba) y **700 Hz** (al medio). Se ha representado un tiempo de **20 ms**.

El efecto de batido analizado anteriormente suponía que los sonidos eran tonos puros, es decir ondas senoidales. Si en lugar de ello se tienen dos sonidos de los más frecuentemente utilizados en la música, es decir sonidos formados por cierta cantidad de armónicos, es posible que se produzcan batidos entre los *armónicos* de ambos sonidos. Supongamos, por ejemplo, un acorde formado por dos sonidos de **220 Hz** y **311 Hz** (un **LA** y un **RE#** respectivamente). Es sabido en música que dicho acorde resulta disonante. Si efectuamos la resta entre ambas frecuencias obtenemos

$$311 \text{ Hz} - 220 \text{ Hz} = 91 \text{ Hz} ,$$

que es un batido demasiado rápido para provocar sensación de disonancia. Pero si tenemos en cuenta los armónicos de ambos, que son respectivamente **220 Hz**, **440 Hz**, **660 Hz**, ... y **311 Hz**, **622 Hz**, **933 Hz**, ..., resulta que el tercer armónico de **220 Hz**, es decir **660 Hz**, interfiere con el segundo armónico de **311 Hz**, es decir **622 Hz**, causando pulsaciones de frecuencia

$$660 \text{ Hz} - 622 \text{ Hz} = 38 \text{ Hz} .$$

El resultado es una sensación de disonancia. Si los sonidos hubieran sido senoidales, si bien la combinación sonaría algo extraña, no se percibiría casi agitación alguna.

Nos preguntamos ahora cuándo dos sonidos forman un acorde **consonante**. La condición para esto es que no exista interferencia entre armónicos importantes, es decir intensos, de uno y otro sonido. Así, tenemos que la consonancia más perfecta es el **unísono** (frecuencias exactamente iguales, ya que en ese caso no hay en absoluto pulsaciones. Luego sigue la **octava**, es decir cuando los sonidos están en una relación de frecuencias **2:1** (un sonido tiene el doble de frecuencia que el otro). Aquí tampoco hay posibilidad de “choques” entre armónicos, porque todos los armónicos del más agudo coinciden exactamente con armónicos del más grave. Luego sigue la **quinta**, que corresponde a una relación de frecuencias de **3:2** (uno de los sonidos tiene frecuencia **1,5** veces la del otro). Tomemos por ejemplo la quinta formada por el **LA** de **220 Hz** y el **MI** de **330 Hz**. En este caso los armónicos sucesivos, mostrados en la **Figura 3.2**, difieren en **110 Hz** ó más.

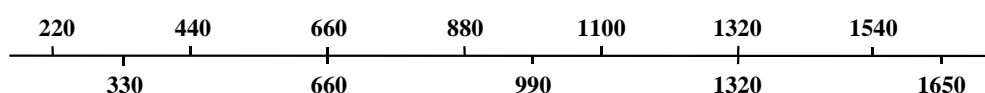


Figura 3.2. Primeros armónicos de las notas **LA** de **220 Hz** y **MI** de **330 Hz**. La mínima distancia entre armónicos de uno y otro sonido es de **110 Hz**.

El mismo tipo de análisis muestra que las siguientes consonancias son, en orden decreciente de perfección, las que corresponden a pares de sonidos con relaciones de frecuencias de **4:3** (**cuarta**), **5:4** (**tercera mayor**), **6:5** (**tercera menor**), **5:3** (**sexta mayor**) y **8:5** (**sexta menor**). En la **Tabla 3.1** se listan las consonancias con sus correspondientes relaciones de frecuencia.

Tabla 3.1. Relaciones de frecuencia entre los sonidos de las diversas consonancias

| Unísono | 8 ^{va} | 5 ^{ta} | 4 ^{ta} | 3 ^{ra} mayor | 3 ^{ra} menor | 6 ^{ta} mayor | 6 ^{ta} menor |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | $\frac{3}{2}$ | $\frac{4}{3}$ | $\frac{5}{4}$ | $\frac{6}{5}$ | $\frac{5}{3}$ | $\frac{8}{5}$ |

3.3. Escalas musicales

Las escalas musicales surgen históricamente de la necesidad de satisfacer tres principios: **economía**, **reproducibilidad**, y **funcionalidad**.

3.3.1. Economía

De todos los sonidos disponibles (es decir audibles) deben seleccionarse la menor cantidad posible. Una razón es que la mayoría de los instrumentos permiten realizar sólo una cantidad relativamente pequeña de sonidos. Algunas excepciones son la voz

humana, los instrumentos de arco (violín, viola, etc.) y el trombón a vara. En el caso de la música grupal (orquestas, bandas), el hecho de que algunos instrumentos posean una cantidad limitada de sonidos condiciona fuertemente los sonidos utilizables por los instrumentos de afinación continua. Otra razón es la necesidad de lograr la máxima variedad con la mayor simplicidad.

3.3.2. Reproducibilidad

Los sonidos seleccionados deben ser fácilmente reproducibles, tanto vocal como instrumentalmente. Cuando se habla de “reproducibles” significa que debe ser fácil de lograr una afinación suficientemente precisa como para no alterar de modo apreciable el sentido de lo que se ejecuta o canta.

3.3.3. Funcionalidad

La escala adoptada debe satisfacer los criterios estéticos correspondientes al uso que se le va a dar. Por ejemplo, si el uso será armónico (es decir que se emplearán combinaciones simultáneas de sonidos), entonces la mayor cantidad posible de superposiciones entre sonidos de la escala deberán resultar aceptables o “agradables” de acuerdo al estilo armónico que se va a practicar. Esto implica que al adoptar una escala se deben tener en cuenta cuestiones como el gusto y otros aspectos.

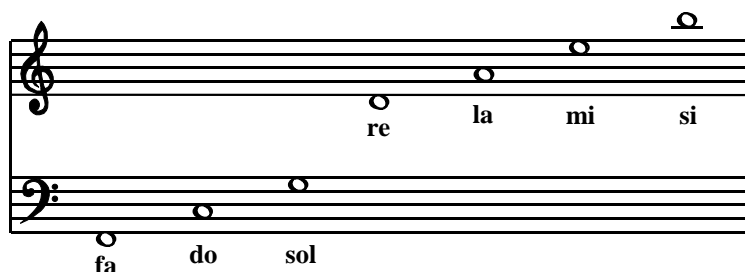
3.3.4. Escalas para uso monofónico

En este caso, que corresponde a las músicas más primitivas, sólo aparece un sonido por vez. Corresponde al canto o a los instrumentos monofónicos como la flauta, etc. El principio de funcionalidad en este caso no implica ninguna restricción. El principio de reproducibilidad requiere casi exclusivamente la memoria, ya que los sonidos sucesivos deben ser fácilmente memorizables.

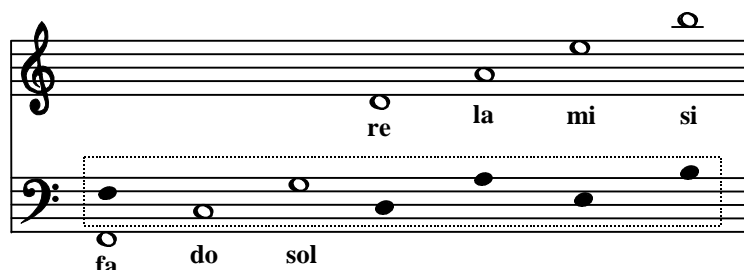
El criterio básico será que existan armónicos comunes entre los sonidos más importantes de la escala, ya que de esa manera éstos actuarán como “pivotes” entre ambos, permitiendo una transición segura, es decir con buena afinación, entre ellos.

El intervalo más fácil de memorizar es el *unísono* (igual frecuencia), ya que corresponde a una repetición exacta de la altura anterior. Luego sigue la *octava*, ya que la octava de un sonido equivale a su segundo armónico. Después sigue la *quinta*, cuyo segundo armónico coincide con el tercero de la nota original. Podríamos seguir investigando los intervalos básicos, pero dado que los armónicos superiores al tercero son en general poco intensos, no resulta muy seguro basarse en la memoria de armónicos difíciles de escuchar.

Se utiliza en realidad otro criterio, que es el **encadenamiento** de quintas y de octavas, es decir que partiendo de un sonido, se toma primero su quinta, luego la quinta de la quinta, y así sucesivamente hasta completar un número deseado de sonidos. Para la escala más simple, se toman siete sonidos, que en notación musical son:



Luego se sube o baja la cantidad de octavas que haga falta para que todos los sonidos se encuentren dentro de una misma octava. Así, el **fa** se sube una octava, el **do** y el **sol** no se modifican, el **re** y el **la** se bajan una octava, y el **mi** y el **si** se bajan dos octavas. Se obtiene la escala recuadrada en línea de puntos:



El último paso sería reordenar las notas de modo que sus frecuencias vayan en aumento. La escala así obtenida se llama **escala de Pitágoras**, o **escala pitagórica**, ya que el célebre filósofo y matemático griego fue quien la sistematizó.

3.3.5. Escalas para uso armónico o polifónico

En un estadio más avanzado de la evolución de la música surge la necesidad de combinar sonidos simultáneos, al intentar varias personas cantar una misma melodía. Entre cantantes de igual tesitura vocal era posible cantar al unísono (igual altura). Pero, por ejemplo, entre las voces masculinas y las femeninas hay una diferencia promedio de una octava, de modo que el primer intervalo de uso simultáneo (además del caso trivial del unísono) fue la octava (relación de frecuencias **2:1**). Luego fueron surgiendo otros intervalos, como la quinta (**3:2**) y la cuarta (**4:3**), y posteriormente surgió la polifonía, en la cual se superponían diferentes melodías, formando en cada instante diversos intervalos simultáneos.

El principio de funcionalidad válido para esta aplicación requiere que la mayor cantidad posible de superposiciones de sonidos de la escala que se adopte resulte “agradable”, concepto desde luego *muy relativo*. En la época en que se consolidaron las escalas sobre las que se basan las hoy en uso, el criterio era el de la *consonancia*.

Las consonancias disponibles son, en orden decreciente de perfección, las ya indicadas en la **Tabla 3.1** (dicho orden coincide aproximadamente con el orden histórico en que fueron siendo aceptadas en la evolución de la música). En una música polifónica desarrollada, es de esperar que cada una de estas consonancias aparezca con cierta frecuencia, por lo que es preciso elegir los sonidos de la escala de manera de lograr la mayor cantidad posible de superposiciones consonantes. En la escala de Pitágoras, las **octavas**, las **quintas** y las cuartas son *acústicamente perfectas*, pero las **terceras** y **sextas** no. Si tomamos por ejemplo, el intervalo entre un **DO** y un **MI** pitagóricos, que parecería ser una tercera mayor, resulta la siguiente relación de frecuencias:

$$\frac{f_{\text{MI}}}{f_{\text{DO}}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{81}{64},$$

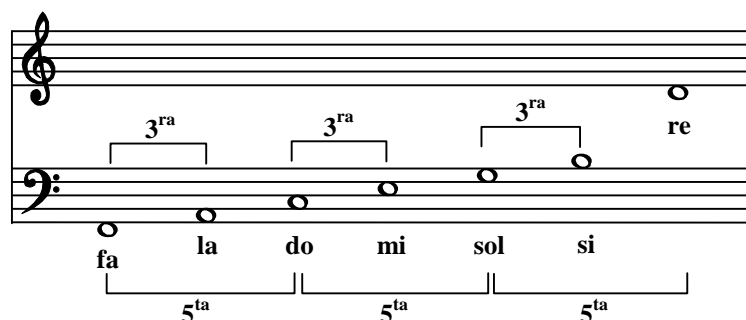
donde los cuatro primeros factores $\frac{3}{2}$ corresponden al encadenamiento de cuatro quintas desde el do hasta el mi agudo, y los factores $\frac{1}{2}$ corresponden a bajar dos octavas.

Vemos que el resultado difiere de una tercera mayor acústicamente perfecta, a la cual correspondería una relación de $\frac{5}{4}$, es decir

$$\frac{5}{4} = \frac{80}{64} \neq \frac{81}{64}.$$

La diferencia, correspondiente a una relación $\frac{81}{80}$, se denomina **coma pitagórica**, y es un pequeño intervalo de alrededor de $\frac{1}{10}$ de tono. Esta diferencia es claramente perceptible, produciendo una consonancia no tan perfecta como el intervalo perfecto.

Este inconveniente aparece porque al construir la escala pitagórica no se utilizaron terceras perfectas. Para subsanarlo, en lugar de generar la escala por encadenamiento de 6 quintas, se utilizan sólo 3 quintas, lo cual origina 4 notas. Las tres notas que faltan se logran tomando las terceras mayores perfectas sobre las tres primeras notas:



Luego se procede igual que en la escala de Pitágoras, subiendo o bajando la cantidad de octavas que haga falta para que todos los sonidos se encuadren dentro de una misma octava. Así, el **fa** y el **la** se suben una octava, y el **re** se baja una octava. Finalmente se reordenan. Esta escala se denomina **escala natural**, **escala perfecta** o **escala de Aristógenes**.

3.3.6. Escala temperada

Tanto la escala pitagórica como la natural poseen 7 notas en cada octava. Al ir evolucionando la música, ya no fue suficiente con estas 7 notas. Así, la denominada **música ficta** fue introduciendo algunas notas *falsas* (“ficta” significa “fingida” o “falsa”) no pertenecientes a la escala.

Hay varias razones por las cuales resulta interesante agregar algunas notas más. La primera es la necesidad de la **transposición**, es decir subir o bajar una melodía para adaptarla a la tesitura de una voz o instrumento diferente de aquel para el que fue concebida. La transposición más simple es la transposición a la octava superior o inferior según el caso, pero a veces tal transposición resulta excesiva, ya que quizás era suficiente con transportar una quinta o una cuarta. El problema es que para realizar una transposición con esos intervalos hace falta agregar un sonido nuevo en la escala de Pitágoras y dos en la natural.

La segunda razón es la necesidad de realizar **modulaciones**. En música, modular equivale a realizar un cambio de tonalidad, es decir de escala, dentro de una misma pieza, de manera que algunos pasajes de la pieza utilizan una escala, y otros, otra escala.

Ambas situaciones requieren, entonces, el agregado de nuevos sonidos a la escala. Esto tiene el inconveniente de que si se quiere conservar el carácter acústicamente perfecto de los intervalos de la escala, se haría necesario agregar una cantidad enormemente grande de nuevos sonidos, lo cual no sólo no es práctico sino que además va en contra del concepto mismo de escala planteado al principio.

Después de diversas pruebas durante varios siglos se propuso una escala con **12** sonidos en cada octava, en la cual los intervalos elegidos, pese a no ser perfectos, resultan bastante aceptables. Esta escala se denomina **escala temperada**. En realidad se han propuesto y utilizado históricamente varias escalas temperadas. La actualmente en uso es la que utiliza el **temperamento uniforme**. En ella se divide la octava en **12** intervalos exactamente iguales, denominados **semitonos**, cuyas frecuencias sucesivas están relacionadas por la expresión

$$f_{\text{siguiente}} = \sqrt[12]{2} \cdot f = 1,05946 \cdot f .$$

Con esta ecuación se pueden calcular, a partir de una frecuencia estándar, como la del **LA 440 Hz**, las frecuencias de todos los otros sonidos de la escala. Los valores correspondientes a la octava central se incluyeron en el capítulo 2.

3.4. Instrumentos musicales acústicos

Haremos aquí una breve descripción de los mecanismos básicos de producción de sonido de los instrumentos musicales. Los instrumentos musicales se clasifican según el medio productor de sonido en instrumentos de **cuerda**, de **viento** y de **percusión**.

3.4.1. Instrumentos de cuerda

Los instrumentos de cuerda producen sus sonidos por medio de una cuerda vibrante. Los métodos para poner la cuerda en vibración son de tres tipos: la **percusión**, el **punteo**, y el **frotado**. La percusión consiste en golpear la cuerda, como sucede en el piano. El punteo, en separar la cuerda de su posición de reposo y soltarla, mecanismo característico de la guitarra. Finalmente, el frotado consiste en rozar la cuerda con un material de gran adherencia como ciertas fibras naturales y sintéticas, procedimiento utilizado en los instrumentos como el violín.

De estos tres mecanismos, el de frotado es el único que permite entregar energía en forma permanente, y así reponer la que se va disipando. En los otros casos el sonido se extingue más o menos rápidamente.

Cuando la cuerda vibra, transmite en forma directa al aire algo de energía sonora. Sin embargo, el mecanismo principal de emisión de sonido no es éste. La mayor parte de la energía de la cuerda pasa a través del puente (apoyo de la cuerda) a una tabla delgada de gran superficie denominada **placa armónica**, **tabla armónica** o **caja armónica**, y al vibrar ésta se produce una importante emisión sonora.

Se puede verificar lo anterior comparando una guitarra eléctrica *sin amplificación* con una guitarra acústica. La guitarra acústica posee caja armónica, y en cambio la guitarra eléctrica no. El sonido de esta última es prácticamente inaudible.

La frecuencia de vibración de una cuerda depende de la tensión que soportan, de su masa (o peso) por unidad de longitud, y de su longitud. Si **T** es la tensión en **kgf** (ki-

logramos fuerza), μ es la densidad lineal (masa por unidad de longitud), en **g/m** (gramos por metro), y **L** es la longitud en **cm**, entonces la frecuencia **f** viene dada por la fórmula

$$f = \frac{4.950}{L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}.$$

Por ejemplo, una cuerda de piano de **120 cm**, cuya densidad lineal es de **7,4 g/m**, sometida a una tensión de **66 kgf** tiene una frecuencia

$$f = \frac{4.950}{120} \sqrt{\frac{66}{7,4}} = 123,2 \text{ Hz},$$

que corresponde a un **si** grave, una octava y un semitono por debajo del **do** central.

La fórmula revela varias cosas. En primer lugar, al tensar más la cuerda (es decir al aumentar **T**), aumenta la frecuencia. Este es el método clásico para afinar un instrumento de cuerda: al ajustar las clavijas se modifica precisamente la tensión. En segundo lugar, al aumentar la densidad baja la frecuencia. Por ese motivo siempre las cuerdas graves son más gruesas. En la guitarra, por ejemplo, dado que una cuerda de nylon con la masa suficiente para las cuerdas más graves sería imprácticamente gruesa, se las recarga con un entorchado (arrollamiento) de cobre. En tercer lugar, la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud **L**. Este principio se utiliza en los instrumentos de mástil como la guitarra, el violín, el contrabajo, etc. para obtener muchos sonidos diferentes de cada cuerda (en el piano y en el arpa esto no es necesario). Otra aplicación de esta propiedad es que al reducir la longitud de la cuerda a la mitad, su frecuencia aumenta al doble, es decir *sube una octava*. Este fue uno de los primeros descubrimientos de la acústica antigua, realizada por los griegos utilizando el monocordio, un instrumento de una sola cuerda. Otro descubrimiento vinculado con esta propiedad es que si se divide la cuerda en partes iguales, se obtiene la serie de armónicos. Al dividirla por **2**, se obtiene el segundo armónico, al dividirla por **3**, el tercero, y así sucesivamente. Esto es utilizado por los guitarristas, para obtener el efecto denominado **armónico**.

3.4.2. Instrumentos de viento

Los instrumentos de viento producen sonido por vibración de una así denominada **columna de aire**. La columna de aire es simplemente el aire dentro de un tubo, y el mecanismo de vibración consiste en que la onda sonora se refleja una y otra vez en los extremos del tubo, siendo un hecho de lo más notable que la reflexión se produce lo mismo esté el extremo abierto o cerrado (aunque con diferentes características).

Hay dos mecanismos de producción de sonido en una columna de aire. El primero es el de un obstáculo que provoca remolinos o turbulencias que luego son acentuadas por la resonancia del tubo. Es el caso de la flauta. El segundo es el de la lengüeta, es decir una lámina elástica de metal, caña o plástico que obstruye el pasaje del aire. Esto implica un aumento de presión hasta que finalmente se vence su resistencia. Esto produce una descompresión que vuelve a obstruir el pasaje de aire, repitiéndose el ciclo. A esta categoría pertenece la mayoría de los instrumentos (oboe, clarinete, fagot, etc.). Inclusive los instrumentos denominados **metales**, como el trombón o la trompeta, utilizan este mecanismo, donde la lengüeta está formada por... *¡los labios presionados!*

La frecuencia de los instrumentos de viento depende de la velocidad del sonido c y de la longitud del tubo L , según la fórmula *aproximada*, válida para tubos abiertos en ambos extremos, como la flauta, el oboe, la trompeta, etc.:

$$f = \frac{c}{2L}.$$

Para tubos cerrados en un extremo (la embocadura), como el clarinete, en cambio, vale la aproximación

$$f = \frac{c}{4L}.$$

Además de estas frecuencias aparecen las frecuencias de los sonidos armónicos, que difieren en ambos casos. Para tubos abiertos las frecuencias son:

$$f_n = n \frac{c}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

y para tubos cerrados en un extremo

$$f_n = (2n-1) \frac{c}{4L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

En este caso sólo aparecen los armónicos impares. Esto da un timbre muy particular, del cual el ejemplo más representativo es el clarinete.

La primera observación está referida a la dependencia de la velocidad del sonido. Como ésta aumenta con la temperatura, resulta que la frecuencia producida por un instrumento de viento aumenta con la temperatura. Esto justifica por qué los *vientistas* deben “calentar” el instrumento, y también por qué al variar la temperatura durante un espectáculo los vientos se desafinan.

La segunda observación se refiere a la variación inversa con la longitud del tubo. Esto es similar a lo que sucedía en las cuerdas. En este caso hay tres formas de variar la longitud. Una forma es mediante orificios, como en la flauta. Al cerrar todos los orificios, la longitud es máxima, y el tono producido, grave. A medida que se van destapando orificios, la longitud efectiva del tubo se va achicando, y el tono se va haciendo más agudo. Otra forma es mediante unas válvulas que intercalan trozos adicionales de tubo, como en la trompeta. La última forma, es mediante un tubo deslizante (tipo telescopio), que al introducirse o extraerse del tubo principal reduce o aumenta la longitud total.

La tercera observación es que mediante el procedimiento anterior no se puede obtener mucho más de una octava, ya que cuando la longitud del tubo se vuelve demasiado pequeña, la calidad del sonido empeora. Por otra parte, a diferencia de la guitarra o el violín, donde hay varias cuerdas, en una flauta no es posible tener varios tubos (salvo en la denominada **flauta de Pan**). Entonces se recurre a la producción de armónicos. Soplando de una forma particular, es posible seleccionar qué armónico se producirá (o lo que es lo mismo, se inhiben los otros). Combinando los armónicos con la variación de la longitud por cualquiera de los procedimientos detallados, se consigue cubrir varias octavas.

3.4.3. Instrumentos de percusión

Los instrumentos de percusión son aquéllos que producen sonido al golpear objetos. Los hay de altura determinada, como los xilófonos (placas de madera), los metalófonos (placas de metal) y las campanillas (varillas de metal), y los de altura indeterminada, como los parches (tambores, bombos) en general (salvo los timbales), los platillos, etc.

A diferencia de los instrumentos de cuerda y de viento, los instrumentos de percusión crean sonidos con espectro no armónico, por lo cual siempre aparecen parciales o sobretonos no armónicos. Cuando éstos son débiles, la altura es determinada, pero cuando son intensos (como en los tom-tom) o muy abundantes (como en los platillos), la altura es indeterminada. En muchos instrumentos se crea además una resonancia con una columna de aire, por ejemplo en la marimba, o el vibrafón, lo cual acentúa el sonido y ayuda a filtrar los parciales inarmónicos.

Dentro de la percusión existen efectos especiales, como el uso de un arco de contrabajo sobre el borde de un platillo, o el efecto de las escobillas, o el de los resortes en el redoblante.

La percusión provee una gran riqueza de posibilidades, aunque en mucha música se la relega al papel de una simple base rítmica.

3.5. Instrumentos musicales electrónicos

Los instrumentos musicales electrónicos surgieron prácticamente con la electrónica, pero recién alcanzaron difusión masiva con el advenimiento de la tecnología digital. Antes de eso, los sintetizadores analógicos eran, o bien muy rudimentarios, o bien excesivamente costosos e inaccesibles, y, en cualquier caso, reservados para los especialistas, debido a las dificultades para obtener los sonidos deseados. En esta sección haremos una descripción muy sucinta de algunas de las características más importantes de estos instrumentos.

3.5.1. Osciladores

El elemento fundamental de todo sintetizador es el **oscilador**, es decir el dispositivo encargado de generar la señal eléctrica que luego se transformará en onda sonora. La salida de un oscilador puede controlarse por medio de varios parámetros. En primer lugar, puede controlarse la frecuencia, que determinará la altura del sonido producido. Luego está la amplitud, que determina la sonoridad. Después, podemos seleccionar la forma de onda. En los sintetizadores analógicos existían pocas formas de onda posibles: ondas senoidal, cuadrada y triangular, trenes de pulsos, y en algunos casos ruido blanco. En los sintetizadores digitales actuales, es posible seleccionar cientos y hasta miles de formas de onda diferentes. Ello se debe a que se utilizan sonidos muestreados, es decir sonidos reales (o sintéticos) grabados y almacenados en bancos de memoria. Luego, cada vez que se requiere producir un sonido, el oscilador simplemente reproduce el sonido durante el tiempo que haga falta (según la duración de la nota a ejecutar).

3.5.2. Control de envolventes

Hay muchos parámetros que pueden controlarse por medio de envolventes. Originalmente la envolvente surge como modelo físico para describir cómo varía en el tiempo de la amplitud de una forma de onda (capítulo 1), tal como sucede en todos los

instrumentos acústicos. En un contexto más general, una envolvente es la evolución en el tiempo de cualquier parámetro imaginable asociado a un generador de sonido. Así, pueden variar en el tiempo la altura, el contenido armónico, etc.

3.5.3. Envolvente de altura

La envolvente de altura (o de frecuencia fundamental) permite simular efectos de los instrumentos reales, los cuales varían inicialmente un poco su frecuencia. También pueden generar sonidos nuevos, o que imitan sonidos naturales, como los ladridos.

3.5.4. Envolvente de filtrado

Uno de los procedimientos directos de la época de los sintetizadores analógicos era generar una forma de onda con un gran contenido armónico (por ejemplo un tren de pulsos muy angostos y muy altos), y luego aplicarles diversos filtros que eliminaban o atenuaban algunos de los armónicos, o bien enfatizaban otros. La envolvente aplicada a estos filtros, permitía ir cambiando en el tiempo a qué armónicos se daba preferencia. En los sintetizadores actuales, la envolvente de filtrado permite, por ejemplo, simular electrónicamente el hecho general de que los armónicos de alta frecuencia se atenúan más rápido que los de baja frecuencia. Entonces si se tiene un filtro que deja pasar sólo las frecuencias hasta cierta frecuencia f_c , reduciendo paulatinamente esa frecuencia se logra ir eliminando primero los armónicos de mayor frecuencia.

3.5.5. Moduladores

Otra característica habitual en los instrumentos acústicos es el control de la expresión a través de pequeñas fluctuaciones periódicas de algunos parámetros, por ejemplo la altura (vibrato) o la amplitud (trémolo). Si en lugar de las envolventes (o si además de ellas) se agrega una modulación en los correspondientes parámetros de control del oscilador, se consigue simular dicha expresividad. La aplicación de moduladores se estudiará más detenidamente en el capítulo 18 para el caso de los efectos.

3.5.6. Seguimiento de altura (key tracking)

En los instrumentos acústicos, gran parte de las propiedades de los sonidos varían según qué nota se esté ejecutando. Por ejemplo, las notas más graves suelen tener un contenido armónico mayor que las más agudas. También sus envolventes (ya sea la primaria, es decir la de amplitud, como cualquier otra que esté actuando sobre diversas características del sonido) pueden tener velocidades distintas según la altura. Por ejemplo, un sonido agudo se extingue más rápidamente, por lo cual su envolvente decaerá más rápido que la de los sonidos graves.

3.5.7. Controladores

Los osciladores, con todas las características descriptas, pueden ser controlados por medio de una **interfaz**. Una interfaz es un dispositivo que permite la comunicación entre entes de naturaleza diversa, por ejemplo entre un sintetizador y un ser humano. El controlador más clásico es un teclado, que simula el teclado de órgano, piano o clave. Existen otros controladores, como por ejemplo guitarras, vientos o percusión, que permiten también enviar órdenes al sintetizador sobre qué sonidos debe producir. En todos los casos, la idea es que el músico ejecute un instrumento que le sea técnicamente familiar.

Los controladores pueden enviar información de varias clases. Lo más básico es, por supuesto, enviar información sobre qué altura generar. Pero a través de sensores en las teclas, permiten enviar información sobre la *fuerza* con que se tocó la tecla, que el sintetizador normalmente transformará en un valor de amplitud. El parámetro enviado realmente no es la fuerza, sino la velocidad con que se bajó la tecla, razón por la cual dicho parámetro recibe el nombre de **velocidad** (en inglés, **velocity**).

Aún cuando la **velocidad** se utilice con mayor frecuencia para controlar la amplitud del sonido, muchas veces se puede utilizar para controlar otros parámetros o funciones. Por ejemplo, se puede emplear para simular el hecho característico de los instrumentos acústicos de que los sonidos más fuertes tienen mayor contenido armónico. Entonces se puede controlar, mediante la **velocidad**, la apertura o cierre de un filtro. Así, cuando se oprime la tecla rápidamente (con fuerza), el filtro deja pasar todos los armónicos. Cuando se oprime lentamente (con suavidad), en cambio, bloquea los armónicos superiores, lográndose un sonido no sólo más suave sino también más opaco.

Algunos teclados están equipados a su vez de **celdas de carga** (es decir sensores de presión) debajo de las teclas, cuya finalidad sí es medir la fuerza que se ejerce sobre la tecla, pero no *durante* su bajada sino *después*. El objeto es lograr influir sobre el sonido después de iniciado, algo que en el teclado de piano no es posible pero que en cambio es muy común en instrumentos como el violín, la guitarra o la trompeta. Este parámetro se denomina **postpulsación** (en inglés **aftertouch**). La postpulsación puede utilizarse para alterar características de la modulación, y así darle control al intérprete del tipo de vibrato, por ejemplo, que produce. También puede usarse para variar la sonoridad de un sonido que ya empezó, y así simular una nota sostenida y *crescendo* en las cuerdas o los vientos, por ejemplo.

Por último existen controles de **afinación, modulación y volumen**, a través de palancas, pedales o diales (ruedas). Estos controles permiten modificar en tiempo real la afinación, la modulación o el volumen en forma totalmente personal, lo cual permite crear el efecto expresivo exacto que busca el intérprete.

3.5.8. Efectos

Una posibilidad muy interesante que poseen ahora cada vez más frecuentemente los sintetizadores (aún los muy económicos) es la posibilidad de agregar efectos al sonido. Por *efectos* se entiende modificaciones que le dan mayor expresividad, o mayor realismo, o mayor espacialidad, etc. Por ejemplo, es posible agregar reverberación, o simular mayor cantidad de instrumentos (coro), o mejorar el sonido o su percepción (resaltadores), etc.

3.5.9. Posibilidades adicionales

La discusión anterior sugiere el hecho sumamente interesante de que con los mismos recursos introducidos para imitar con mayor fidelidad los instrumentos conocidos, es posible crear sonidos totalmente nuevos. De hecho, uno de los métodos de síntesis más poderosos que se conocen, la síntesis por modulación de frecuencia, fue descubierto haciendo experimentos con el vibrato en los cuales se llevaban los parámetros totalmente fuera de contexto, acercando la frecuencia de la modulación a la frecuencia fundamental del sonido.

3.5.10. Interconexión MIDI

Las posibilidades de aplicación de los sintetizadores se multiplicaron al introducirse la norma de comunicaciones **MIDI** (**M**usical **I**nstrument **D**igital **I**nterface, Interfaz digital para instrumentos musicales). Esta norma establece un código de comunicación entre instrumentos musicales, y entre instrumentos musicales y computadoras. Esto permite varias cosas. En primer lugar, mediante programas de computadora denominados **secuenciadores** (**sequencers**) es posible controlar el instrumento por computadora, lo cual implica entre otras cosas, ejecutar automáticamente música previamente programada. También permite ejecutar un acompañamiento orquestal mientras el músico toca en tiempo real la parte solista en su teclado.

También es posible seleccionar los instrumentos, o modificarlos (editarlos) para lograr personalizarlos al gusto del intérprete. Es posible cambiar virtualmente todos los parámetros de cualquier sonido, así como parámetros globales como la afinación, mediante órdenes adecuadas enviadas en forma de códigos **MIDI**.

Por último, también es posible realizar una “grabación” de una interpretación. Esta grabación se diferencia de una grabación tradicional en que lo que se graba no son señales de audio sino las señales **MIDI** que permiten al sintetizador repetir en forma idéntica la ejecución. Esto no quiere decir que no pueda luego modificarse la ejecución. A diferencia de una grabación convencional, en la cual si se cometió un error no hay mucho que pueda hacerse para corregirlo decorosamente, en una grabación **MIDI** es posible eliminar y reemplazar notas equivocadas, se puede mejorar la expresividad de un pasaje, se pueden agregar voces imposibles de tocar, cambiar de timbre, etc. Las posibilidades son casi ilimitadas. En el caso de instrumentos de gran jerarquía, es posible lograr interpretaciones magistrales, debido a la cantidad de posibilidades de control que se ofrecen al ejecutante. Sin embargo, el dominio de la totalidad de tales posibilidades requiere una práctica y condiciones personales comparables a las necesarias para la interpretación de cualquier instrumento tradicional.

Capítulo 4

Acústica Arquitectónica

4.1. Introducción

La **Acústica Arquitectónica** estudia los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, ya sea una sala de concierto o un estudio de grabación. Esto involucra también el problema de la aislación acústica.

Las habitaciones o salas dedicadas a una aplicación determinada (por ejemplo para la grabación de música, para conferencias o para conciertos) deben tener cualidades acústicas adecuadas para dicha aplicación. Por **cualidades acústicas** de un recinto entendemos una serie de propiedades relacionadas con el comportamiento del sonido en el recinto, entre las cuales se encuentran las reflexiones tempranas, la reverberación, la existencia o no de ecos y resonancias, la cobertura sonora de las fuentes, etc.

4.2. Ecos

El fenómeno más sencillo que tiene lugar en un ambiente con superficies reflectoras del sonido es el **eco**, consistente en una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente unos **100 ms** (o más) después de emitido el sonido. Se produce después de un tiempo **t** relacionado con la distancia **d** a la superficie más próxima por la expresión

$$t = \frac{2d}{c},$$

donde **c** es la velocidad del sonido, es decir **345 m/s**. El factor **2** se debe a que el sonido recorre de ida y de vuelta la distancia entre la fuente sonora y la superficie. De esta fórmula se deduce que para tener un eco la superficie más próxima debe estar a unos **17 m**. Cuando hay *dos* paredes paralelas algo distantes se puede producir un eco repetitivo.

4.3. Reflexiones tempranas

Cuando la fuente sonora está rodeada por varias superficies (piso, paredes, techo) un oyente recibirá el sonido directo, y además el sonido reflejado en cada pared. Las

primeras reflexiones recibidas, que se encuentran bastante separadas en el tiempo, se denominan **reflexiones tempranas**. Esta situación se ilustra en la **Figura 4.1**.

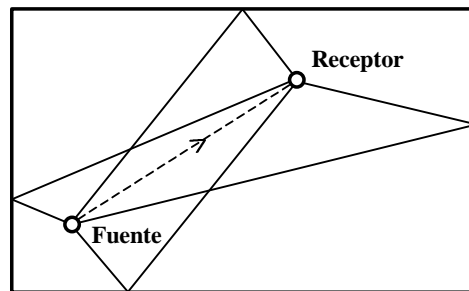


Figura 4.1. En línea de puntos, el sonido directo. En líneas llenas, algunas de las primeras reflexiones o **reflexiones tempranas**.

En salas no demasiado grandes, las primeras reflexiones están bastante cerca en el tiempo unas de otras, de manera que no se llegan a percibir como eco.

4.4. Ambiencia

La distribución en el tiempo de las reflexiones tempranas crea la sensación de **ambiencia**, es decir la sensación que permite al oyente identificar auditivamente el espacio en el que se encuentra. Las personas no videntes desarrollan una especial habilidad para interpretar la información espacial contenida en la ambiencia.

Arquitectónicamente, el control de la ambiencia se puede lograr mediante un cuidadoso diseño que involucra trazar, sobre un plano de la sala, “rayos” acústicos similares a los de la **Figura 4.1**, medir cuidadosamente sus recorridos, y de allí determinar los tiempos de llegada de las correspondientes reflexiones. Hoy en día este trabajo se realiza con el auxilio de computadoras digitales y programas adecuados.

4.5. Absorción sonora

Las superficies de un recinto reflejan sólo parcialmente el sonido que incide sobre ellas; el resto es absorbido. Según el tipo de material o recubrimiento de una pared, ésta podrá absorber más o menos el sonido, lo cual lleva a definir el **coeficiente de absorción sonora**, abreviado con la letra griega α (alfa), como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}}.$$

El coeficiente de absorción tiene una gran importancia para el comportamiento acústico de un ambiente, y por esa razón se han medido y tabulado los coeficientes de

absorción para varios materiales y objetos. En general, los materiales duros, como el hormigón o el mármol, son muy reflectores y por lo tanto poco absorbentes del sonido, y en cambio los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, son poco reflectores y por consiguiente muy absorbentes.

En la **Tabla 4.1** se dan los valores de α para varios materiales típicos de construcción, objetos y personas (ya que las personas también absorben el sonido). Se proporcionan para varias frecuencias, ya que α depende bastante de la frecuencia. En general la absorción aumenta con la frecuencia, debido a que para frecuencias altas la longitud de onda es pequeña y entonces las irregularidades de la superficie o el propio espesor del material son más comparables con la longitud de onda. En algunos casos, sin embargo, algún fenómeno de resonancia entre el material y la pared puede mejorar la absorción en bajas frecuencias.

4.6. Tiempo de reverberación

Después del periodo de las reflexiones tempranas, comienzan a aparecer las reflexiones de las reflexiones, y las reflexiones de las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente, dando origen a una situación muy compleja en la cual las reflexiones se densifican cada vez más. Esta permanencia del sonido aún después de interrumpida la fuente se denomina **reverberación**.

Ahora bien; en cada reflexión, una parte del sonido es absorbido por la superficie, y otra parte es reflejada. La parte absorbida puede transformarse en minúsculas cantidades de calor, o propagarse a otra habitación vecina, o ambas cosas. La parte reflejada mantiene su carácter de sonido, y viajará dentro del recinto hasta encontrarse con otra superficie, en la cual nuevamente una parte se absorberá y otra parte se reflejará. El proceso continúa así hasta que la mayor parte del sonido sea absorbido, y el sonido reflejado sea ya demasiado débil para ser audible, es decir, se extinga.

Para medir cuánto demora este proceso de extinción del sonido se introduce el concepto de **tiempo de reverberación**, **T**, técnicamente definido como *el tiempo que demora el sonido en bajar 60 dB por debajo de su nivel inicial* (se ha elegido **60 dB** porque con esa caída se tiene la sensación de que el sonido se ha extinguido completamente). En algunas publicaciones se suele representar también este valor con el símbolo **RT₆₀**, formado por la sigla en inglés de *reverberation time* (tiempo de reverberación), seguida por la referencia a los **60 dB**. Otra abreviatura es **T₆₀**.

Como ejemplo, si al interrumpir un sonido de **90 dB** éste se reduce a **30 dB** en **3 s**, entonces será **T = 3 s**. Salvo para sonidos inicialmente muy intensos, antes de caer **60 dB** el sonido se vuelve inaudible por quedar enmascarado por el ruido de fondo o ruido ambiente.

El tiempo de reverberación depende de cuán absorbentes sean las superficies de la sala. Así, si las paredes son muy reflectoras (es decir que reflejan la mayor parte del sonido que llega a ellas), se necesitarán *muchas reflexiones* para que se extinga el sonido, y entonces **T** será grande. Si, en cambio, son muy absorbentes, en cada reflexión se absorberá una proporción muy alta del sonido, por lo tanto en unas pocas reflexiones el sonido será prácticamente inaudible, por lo cual **T** será pequeño. Dado que los materiales duros, como el hormigón o los azulejos, son poco absorbentes del sonido, un ambiente con paredes de este tipo tendrá un tiempo de reverberación largo. Una sala

cubierta con materiales absorbentes como cortinados, alfombras, etc., por el contrario, tendrá un tiempo de reverberación corto.

Tabla 4.1. Coeficientes de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia (según varias fuentes).
Los valores no suministrados no estaban disponibles.

| Material | Coeficiente de absorción α a la frecuencia | | | | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1.000 | 2.000 | 4.000 |
| Hormigón sin pintar | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,04 |
| Hormigón pintado | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Ladrillo visto sin pintar | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| Ladrillo visto pintado | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Revoque de cal y arena | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,06 |
| Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm | 0,29 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,09 |
| Yeso sobre metal desplegado | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,03 |
| Mármol o azulejo | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Madera en paneles (a 5 cm de la pared) | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,10 |
| Madera aglomerada en panel | 0,47 | 0,52 | 0,50 | 0,55 | 0,58 | 0,63 |
| Parquet | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| Parquet sobre asfalto | 0,05 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,10 | 0,22 |
| Parquet sobre listones | 0,20 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,07 |
| Alfombra de goma 0,5 cm | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,03 | 0,10 |
| Alfombra de lana 1,2 kg/m ² | 0,10 | 0,16 | 0,11 | 0,30 | 0,50 | 0,47 |
| Alfombra de lana 2,3 kg/m ² | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,50 | 0,63 | 0,83 |
| Cortina 338 g/m ² | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,17 | 0,24 | 0,35 |
| Cortina 475 g/m ² fruncida al 50% | 0,07 | 0,31 | 0,49 | 0,75 | 0,70 | 0,60 |
| Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm | 0,11 | 0,14 | 0,36 | 0,82 | 0,90 | 0,97 |
| Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm | 0,15 | 0,25 | 0,50 | 0,94 | 0,92 | 0,99 |
| Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm | 0,17 | 0,44 | 0,99 | 1,03 | 1,00 | 1,03 |
| Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm | 0,06 | 0,20 | 0,45 | 0,71 | 0,95 | 0,89 |
| Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm | 0,07 | 0,32 | 0,72 | 0,88 | 0,97 | 1,01 |
| Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm | 0,13 | 0,53 | 0,90 | 1,07 | 1,07 | 1,00 |
| Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 25 mm | 0,15 | 0,25 | 0,40 | 0,50 | 0,65 | 0,70 |
| Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 50 mm | 0,25 | 0,45 | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,85 |
| Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 25 mm | 0,20 | 0,40 | 0,80 | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 50 mm | 0,30 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Ventana abierta | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Vidrio | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,04 |
| Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm | — | 0,80 | 0,71 | 0,86 | 0,68 | — |
| Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm | — | 0,72 | 0,61 | 0,68 | 0,79 | — |
| Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm | — | 0,70 | 0,61 | 0,70 | 0,78 | — |
| Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm | — | 0,72 | 0,62 | 0,69 | 0,78 | — |
| Panel cielorraso fisurado Auratone (USG) 5/8" | 0,34 | 0,36 | 0,71 | 0,85 | 0,68 | 0,64 |
| Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI) 5/8" | 0,31 | 0,32 | 0,51 | 0,72 | 0,74 | 0,77 |
| Asiento de madera (0,8 m ² /asiento) | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 |
| Asiento tapizado grueso (0,8 m ² /asiento) | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| Personas en asiento de madera (0,8 m ² /persona) | 0,34 | 0,39 | 0,44 | 0,54 | 0,56 | 0,56 |
| Personas en asiento tapizado (0,8 m ² /persona) | 0,53 | 0,51 | 0,51 | 0,56 | 0,56 | 0,59 |
| Personas de pie (0,8 m ² /persona) | 0,25 | 0,44 | 0,59 | 0,56 | 0,62 | 0,50 |

La propiedad anterior se puede expresar por medio de una fórmula, denominada **fórmula de Sabine**, en honor al físico norteamericano que la obtuvo a principios de este siglo. Según dicha fórmula el tiempo de reverberación T puede calcularse como:

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S},$$

donde V es el volumen de la habitación en m^3 , S es el área de su superficie interior total en m^2 , y α es el coeficiente de absorción sonora, ya definido como la fracción de la energía sonora incidente que es absorbida por las superficies de la habitación.

Como ejemplo, supongamos una sala rectangular de **4 m** de ancho, por **6 m** de largo, por **3 m** de alto. Entonces

$$S = 4 \times 3 + 4 \times 3 + 6 \times 3 + 6 \times 3 + 4 \times 6 + 4 \times 6 = 108 \text{ m}^2$$

$$V = 4 \times 3 \times 6 = 72 \text{ m}^3$$

Si $\alpha = 0,1$ (las superficies absorben el **10%** de la energía sonora incidente), resulta

$$T = 0,161 \cdot \frac{72}{0,1 \times 108} = 1,07 \text{ s}$$

Dado que, según vimos, los coeficientes de absorción α dependen de la frecuencia, resulta también que el tiempo de reverberación depende de la frecuencia.

En general, los recintos están formados por diversos materiales, cuyos coeficientes de absorción no tienen por qué ser iguales. Si una sala tiene una parte S_1 de su superficie con coeficiente α_1 , otra parte S_2 con coeficiente α_2 , ... y por último una parte S_n con coeficiente α_n , entonces

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}$$

Por ejemplo, si en el caso anterior las paredes tienen $\alpha = 0,1$, en tanto que el techo tiene un cielorraso acústico con $\alpha = 0,6$ y el piso $\alpha = 0,15$, resulta

$$T = 0,161 \cdot \frac{72}{0,1 \cdot 60 + 0,6 \cdot 24 + 0,15 \cdot 24} = 0,48 \text{ s}$$

Vemos cómo el uso del cielorraso acústico redujo considerablemente el tiempo de reverberación.

4.7. Tiempo de reverberación óptimo

Varias investigaciones realizadas evaluando las acústicas de las mejores salas del mundo (según la opinión de las audiencias o usuarios y de expertos) han revelado que

para cada finalidad existe *un tiempo de reverberación óptimo*, que aumenta al aumentar el volumen en m^3 de la sala. En la **Figura 4.2** se muestra el resultado de uno de estos estudios. Debe aclararse que *no hay coincidencia* entre los resultados presentados por diversos investigadores, aunque cualitativamente son similares.

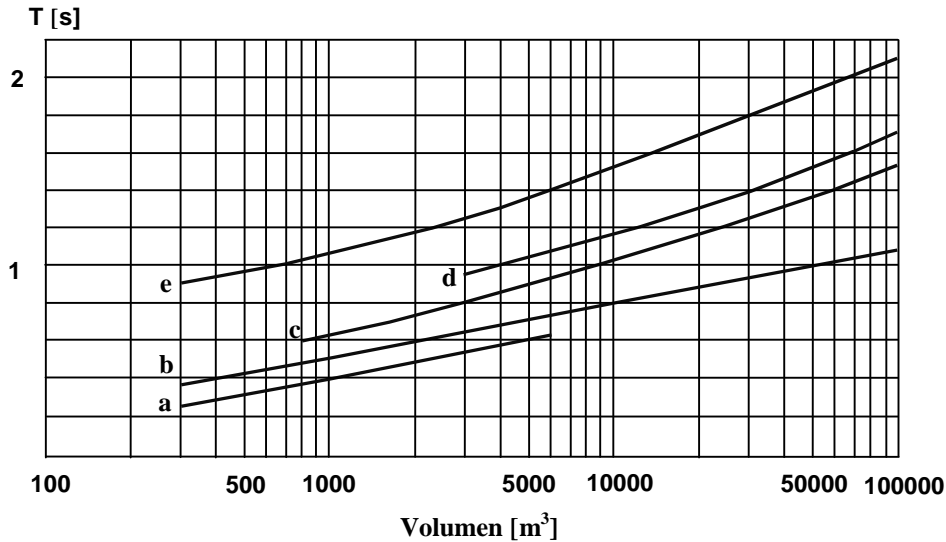


Figura 4.2. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala (según L. L. Beranek). (a) Estudios de radiodifusión para voz. (b) Salas de conferencias. (c) Estudios de radiodifusión para música. (d) Salas de conciertos. (e) Iglesias.

En general, se observa que la palabra requiere menores tiempos de reverberación que la música, debido a que la parte más significativa de la palabra son las consonantes, que son a la vez débiles y más cortas que las vocales. En consecuencia, con un tiempo de reverberación alto las vocales se prolongan demasiado, enmascarando a las consonantes que les siguen, lo que reduce la inteligibilidad de la palabra. La música, por el contrario, *se beneficia* con un tiempo de reverberación considerable, ya que éste permite empalmar mejor los sonidos y disimular pequeñas imperfecciones de ejecución, a la vez que aporta una espacialidad que es deseable en la música.

Como ejemplo de aplicación, supongamos un pequeño teatro de **10 m** de ancho por **12 m** de fondo por **6 m** de altura, que va a ser utilizado para obras de teatro. El volumen de la sala será

$$V = 10 \times 12 \times 6 = 720 \text{ m}^3 ,$$

lo cual significa, eligiendo la curva **b** de la **Figura 4.2**, que el tiempo de reverberación óptimo será de **0,45 s**. De la fórmula del tiempo de reverberación es posible calcular el valor de α necesario para obtener este tiempo óptimo:

$$\alpha = 0,161 \cdot \frac{V}{T \cdot S}$$

Teniendo en cuenta que

$$S = 12 \times 10 + 12 \times 10 + 12 \times 6 + 12 \times 6 + 10 \times 6 + 10 \times 6 = 504 \text{ m}^2,$$

resulta

$$\alpha = 0,161 \cdot \frac{720}{0,45 \cdot 504} = 0,51.$$

Este valor es bastante elevado, lo cual significa que el tratamiento acústico resultará costoso, situación bastante común en la arquitectura acústica. El tratamiento acústico suele ser *casi tan costoso como la construcción del edificio*.

4.8. Campo sonoro directo y reverberante

Un segundo elemento que interviene en la acústica de un ambiente es cómo se distribuye en él el **campo sonoro**. Por **campo sonoro** se entiende el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio. A los efectos del análisis, el campo sonoro se divide en dos componentes: el **campo directo** y el **campo reverberante**. El **campo directo** contiene la parte del sonido que acaba de ser emitido por la fuente, y que por lo tanto *aún no experimentó ninguna reflexión*, y el **campo reverberante**, en cambio, incluye el sonido *después de la primera reflexión*.

Estas dos componentes tienen comportamientos muy diferentes. El campo directo disminuye con la distancia a la fuente, y lo hace a razón de **6 dB** por cada duplicación de la distancia. Así, si a **1 m** de una fuente sonora se mide un nivel de presión sonora de **80 dB**, a **2 m** (el doble de **1 m**) tendremos **74 dB**; a **4 m** (el doble de **2 m**) habrá **68 dB**; a **8 m** (el doble de **4 m**) existirá un campo directo de **62 dB**, y así sucesivamente.

El campo reverberante, en cambio, es *constante* en los ambientes cerrados, como habitaciones, salas y otros recintos. Esto se debe a que el sonido sufre multitud de reflexiones, y todas ellas se superponen entre sí, resultando una *distribución prácticamente uniforme* del sonido.

En el descampado, donde el sonido puede propagarse libremente sin que se produzcan reflexiones, *sólo existe la componente de campo directo*. Por esta razón, el nivel de presión sonora disminuye rápidamente con la distancia. Así, una persona hablando normalmente a **50 m** se escuchará sólo muy débilmente. En un ambiente cerrado, en cambio, si bien muy cerca de la fuente predomina el campo directo, a cierta distancia predomina el campo reverberante.

En la **Figura 4.3** se ilustran ambas componentes de la presión sonora y el campo sonoro resultante de la superposición de ambas. Existe una distancia denominada **distancia crítica** que limita las regiones en las que predomina uno u otro campo. Para distancias menores que la distancia crítica, predomina el campo directo, y para distancias mayores, predomina el campo reverberante. Por esta razón se suele denominar también **campo cercano** y **campo lejano** a las componentes directa y reverberante.

Una característica del campo directo es que es bastante **direccional**, mientras que el campo reverberante es **difuso**, es decir **adireccional**. Por esta razón, en un teatro, cerca del escenario se percibe claramente la procedencia de los sonidos, pero más lejos no tanto (aunque por efecto Haas, el sonido directo, que llega siempre primero, permite percibir la dirección del sonido aún con un importante campo reverberante).

El campo reverberante permite explicar por qué dentro de una habitación los sonidos se perciben con mayor sonoridad que en un ámbito abierto. En éste último sólo existe el campo directo. En una habitación el sonido se ve *reforzado* por el campo reverberante, que *acumula la energía sonora que no es absorbida en las reflexiones*. En el descampado, al no haber reflexiones, la energía sonora simplemente se aleja continuamente de la fuente, *sin posibilidad de acumularse*.

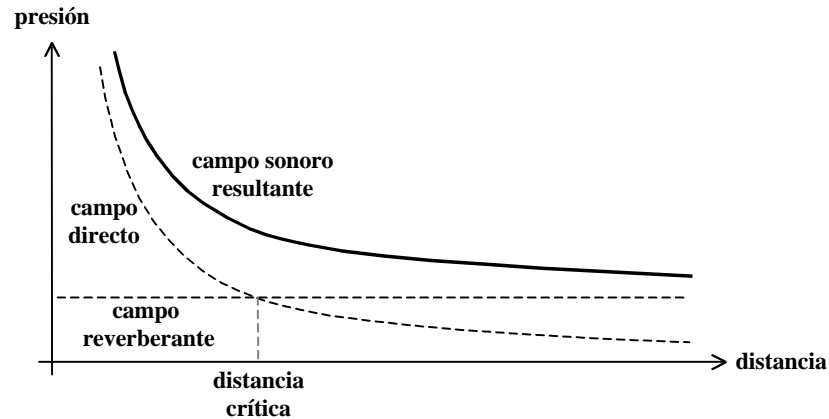


Figura 4.3. Campo directo y campo reverberante. Se indica también la distancia crítica, que limita las regiones donde predomina una u otra componente del campo sonoro.

De la discusión anterior se desprende que el campo reverberante será tanto mayor cuanto más reflectoras del sonido sean las superficies de un ambiente (o, lo que es lo mismo, cuanto menor sea el coeficiente de absorción), ya que en ese caso será mayor la energía acumulada. Como también el tiempo de reverberación aumenta cuando aumenta la reflexión, resulta que *a mayor tiempo de reverberación, mayor campo reverberante*.

Esto explica por qué en los ambientes con paredes duras, como los gimnasios, a igualdad de la fuente el nivel sonoro es tan alto. A esto se agrega el hecho de que el campo reverberante tiende a enmascarar el habla, por lo que la gente inconscientemente sube la voz para aumentar el campo directo, y poder comunicarse por lo menos con las personas más próximas. Esto a su vez incrementa el campo reverberante, pues significa más energía sonora para acumular en el ambiente.

4.9. Resonancias

En las salas pequeñas, aparece un tercer elemento que incide en la calidad acústica, que son las **resonancias** o **modos normales de vibración**. Esto sucede como consecuencia de las reflexiones sucesivas en paredes opuestas. Si en una habitación se genera una onda sonora que viaja perpendicularmente a dos paredes enfrentadas, al reflejarse en una de ellas lo hará también perpendicularmente, de modo que volverá sobre sí misma y posteriormente se reflejará en la pared opuesta. Así, se generará lo que se denomina una **onda estacionaria**, es decir una onda que va y vuelve una y otra vez entre las

dos paredes. Esta onda es, de hecho, una onda sonora que se escuchará precisamente como un sonido. Si la distancia entre las dos paredes es L , la longitud de tal onda es $2 \cdot L$, y por consiguiente deberá cumplirse (según lo visto en la sección 1.1) que

$$2 \cdot L = \frac{c}{f},$$

donde c es la velocidad del sonido (**345 m/s**) y f la frecuencia del sonido resultante. De aquí se puede obtener la frecuencia, que resulta ser

$$f = \frac{c}{2 \cdot L}.$$

Como ejemplo, supongamos que las paredes distan unos **3 m** entre sí. Entonces

$$f = \frac{345}{2 \cdot 3} = 57,5 \text{ Hz},$$

que corresponde al **si bemol** casi **3** octavas por debajo del **la central** (**LA 440 Hz**). Esta es sólo una de las muchas **frecuencias de resonancia** que puede tener esta sala. Otras corresponden a los armónicos de esa nota (es decir los múltiplos de **57,5 Hz**, como **115 Hz**, **172,5 Hz**, etc.).

¿Qué consecuencias tiene esto para las condiciones acústicas del recinto? Las resonancias se ponen de manifiesto cuando aparece un sonido de igual o similar frecuencia. Por ejemplo, si un bajo ejecuta esta nota, la acústica de la habitación parecerá amplificar dicho sonido, en desmedro de los otros sonidos. A esto se agrega que para las frecuencias de resonancia el tiempo de reverberación es mucho más prolongado, por lo cual dicha nota se prolongará más que las otras. Esto se considera un defecto acústico importante. Entre las posibles soluciones, están: a) evitar las superficies paralelas, que favorecen las resonancias, b) agregar absorción acústica que reduzca el tiempo de reverberación, c) ecualizar el sistema de sonido de modo de atenuar las frecuencias próximas a la resonancia o resaltar las otras frecuencias.

Las resonancias rellenan el espectro musical, lo cual favorece el canto solista, es decir las melodías sencillas y no demasiado rápidas. Por ese motivo resulta agradable cantar en el baño (especialmente para la voz masculina). Es un ambiente pequeño, y por lo tanto con resonancias notorias. Sin embargo, desde el punto de vista de la escucha de la música, no resulta tan agradable, porque distorsiona lo que se quiere escuchar.

Otra consecuencia de las resonancias es que la **difusión** del sonido no es satisfactoria, es decir que la distribución espacial del mismo no es uniforme: en algunos puntos el nivel sonoro es mucho mayor que en otros, siendo la diferencia mayor que la atribuible al campo directo.

A medida que crece el tamaño de una habitación, las resonancias tienden a estar cada vez más próximas entre sí, y se transforman en reverberación, mejorando también la difusión. Lo mismo sucede cuando la forma de la sala es irregular.

En el diseño de pequeñas salas o estudios de grabación o ensayo es primordial prestar atención a los problemas de difusión y de resonancias. Las siguientes son algunas recomendaciones:

1) Evitar las simetrías. Si la habitación tiene forma rectangular, las aristas deberían ser todas de diferente longitud (la forma cúbica de algunas habitaciones es particu-

larmente deficiente desde el punto de vista acústico). Algunas proporciones satisfactorias son $1 : 1,14 : 1,39$, $1 : 1,28 : 1,54$ y $1 : 1,6 : 2,23$.

2) Si es posible, evitar los paralelismos. Esto puede lograrse inclinando una o dos paredes, e inclusive el cielorraso.

3) En casos severos, recubrir con material absorbente una de cada par de paredes paralelas, o mejor aún (aunque es una solución más costosa), colocar algunas baldosas difusoras disponibles comercialmente (por ejemplo las RPG).

4.10. Materiales absorbentes acústicos

Los materiales de construcción y los revestimientos tienen propiedades absorbentes muy variables. A menudo es necesario, tanto en salas de espectáculo como en estudios de grabación y monitoreo realizar tratamientos específicos para optimizar las condiciones acústicas. Ello se logra con materiales absorbentes acústicos, es decir materiales especialmente formulados para tener una elevada absorción sonora.

Existen varios tipos de materiales de esta clase. El más económico es la lana de vidrio, que se presenta en dos formas: como fieltro, y como panel rígido. La absorción aumenta con el espesor, y también con la densidad. Permite absorciones sonoras muy altas. El inconveniente es que debe ser separada del ambiente acústico mediante paneles protectores cuya finalidad es doble: proteger la lana de vidrio de las personas, y a las personas de la lana de vidrio (ya que las partículas que se podrían desprender no sólo lastiman la piel sino que al ser respiradas se acumulan irreversiblemente en los pulmones, con el consecuente peligro para la salud). Los protectores son en general planchas perforadas de Eucatex u otros materiales celulósicos. Es de destacar que salvo las planchas perforadas de gran espesor, no tienen efecto propio en la absorción, por lo tanto las planchas perforadas aplicadas directamente sobre la pared son poco efectivas.

Otro tipo de material son las espumas de poliuretano (poliéster uretano, y poliéster uretano) o de melamina. Son materiales que se fabrican facetados en forma de cuñas anecoicas (**Figura 4.4a**). Esta estructura superficial se comporta como una *trampa de sonido*, ya que el sonido que incide sobre la superficie de una cuña se refleja varias veces en esa cuña y en la contigua. El resultado es un aumento de la superficie efectiva de tres veces o más (**Figura 4.4b**).

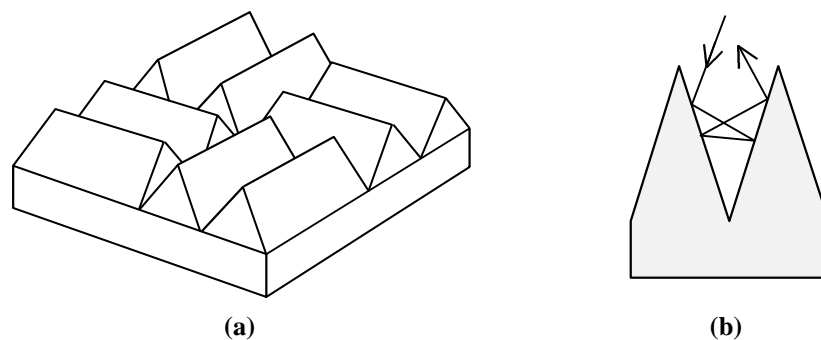


Figura 4.4. (a) Una muestra de material absorbente a base de espumas poliuretánicas con terminación superficial en cuñas anecoicas. (b) Mecanismo por el cual las cuñas anecoicas logran gran absorción sonora.

Para tratamiento acústico de cielorrasos se pueden emplear plafones fonoabsorbentes basados en fibras minerales (basalto), fibra de vidrio, fibras celulósicas, corcho, etc. con diversas terminaciones superficiales de fantasía. En general se instalan suspendidas por medio de bastidores a cierta distancia de la losa. Cuanto mayor es la separación, mejor es la absorción resultante, sobre todo si se intercala algo de lana de vidrio.

Es necesario efectuar aquí dos advertencias. La primera se refiere al poliestireno expandido (telgopor). Si bien es un excelente aislante térmico, *sus características acústicas son muy pobres*, contrariamente a lo que mucha gente supone, y por lo tanto no debería utilizarse en aplicaciones en las que la absorción o la aislación acústica sean críticas. La segunda advertencia es con respecto a la costumbre de recubrir los cielorrasos con cajas de huevos, bajo la creencia de que son buenos absorbentes del sonido. En realidad no son efectivas para esta aplicación, debido a que carecen de la porosidad y el volumen necesarios. Tal vez la confusión se origine en la semejanza que presentan con las cuñas anecoicas. No son recomendables para ninguna aplicación acústica seria.

El tratamiento de pisos se realiza normalmente con alfombras, las cuales son más efectivas si se colocan sobre bajoalfombras porosos de fibra vegetal (arpillera, yute) o poliéster. El efecto de las alfombras no se reduce a absorber el sonido, sino que atenúan los ruidos de pisadas u objetos que caen o rozan el suelo (por ejemplo, cables de micrófonos). A igual estructura, la absorción de una alfombra aumenta con el espesor. El tipo de fibra constitutiva de una alfombra (lana, nylon) no afecta significativamente a su coeficiente de absorción.

Por último, los cortinados también pueden aprovecharse como absorbentes sonoros, especialmente cuando forman parte del diseño arquitectónico con algún fin estético o funcional. Hay que tener en cuenta que a mayor separación de la pared, mayor efectividad en la absorción. También es importante la porosidad, ya que una cortina plástica impermeable no tiene propiedades absorbentes. Por el contrario, una cortina de tela gruesa, de terciopelo, etc., será bastante absorbente. La absorción también aumenta con el plegado, fruncido o drapeado, es decir la relación entre el área efectivamente ocupada por la cortina y el área de la cortina estirada. Una cortina fruncida al **50%** puede llegar casi a duplicar su coeficiente de absorción.

Una aplicación interesante de las cortinas es la obtención de una acústica variable. Para ello se coloca una cortina frente a una pared relativamente reflectora. Al correr la cortina se va descubriendo la pared, y el conjunto se vuelve menos absorbente.

4.11. Aislación acústica

Aislar acústicamente un recinto significa impedir que los sonidos generados dentro del mismo trasciendan hacia el exterior y, recíprocamente, que los ruidos externos se perciban desde su interior.

La **aislación acústica** (o **aislación sonora**) es muy importante en todo lo que tenga que ver con sonido profesional. Si el recinto es una sala de concierto o de espectáculos en la cual se ejecuta o propala música a alto nivel sonoro, es preciso evitar que los sonidos trasciendan convirtiéndose en ruidos molestos al vecindario. Si se trata de una sala de grabación o un estudio radiofónico, cualquier ruido proveniente del exterior contaminará el sonido que se desea difundir o grabar, en desmedro de su calidad, lo cual también debe evitarse.

En una primera aproximación al problema, podemos observar que la aislación sonora se logra interponiendo una pared o tabique entre la *fente sonora* y el *receptor*. La aislación es tanto mayor cuanto mayor sea la densidad superficial (kg/m^2) del tabique y cuanto mayor sea la frecuencia del sonido. Esta es la razón por la cual las paredes gruesas (y por lo tanto pesadas) ofrecen mayor aislación que las delgadas. También explica por qué de la música del vecino se escucha mucho más la base rítmica de la percusión grave (baja frecuencia) que las melodías, por lo general más agudas (alta frecuencia).

Un análisis más detallado indica que es posible obtener una mayor aislación acústica por medio de tabiques dobles, o, más generalmente, múltiples. En otras palabras, dada una cantidad de material (por ejemplo **20 cm** de espesor de hormigón) podemos sacarle mayor provecho si lo dividimos en dos partes (en este caso dos paredes de **10 cm** cada una) y lo separamos con un espacio de aire. Si el espacio de aire se rellena con algún material absorbente (típicamente, lana de vidrio), el resultado es una aislación todavía mayor.

Este tipo de estructura se utiliza mucho con placas de roca de yeso (Durlock, Placo, Pladur). Estas placas están formadas por yeso recubierto a ambos lados por celulosa (cartón). El espesor es, normalmente, unos **12 mm**, y se suelen usar de a 2 separadas **50**, **70** ó **90 mm** mediante perfiles de chapa. El espacio entre ambas placas se rellena con lana de vidrio (**Figura 4.5a**). La aislación que se logra es sorprendente para el espesor y el peso total. Se puede obtener mayor aislación aún utilizando dos placas de roca de yeso de cada lado, y montándolas sobre perfiles independientes para evitar las conexiones rígidas propensas a transmitir las vibraciones (estructura alternada, **Figura 4.5b**).

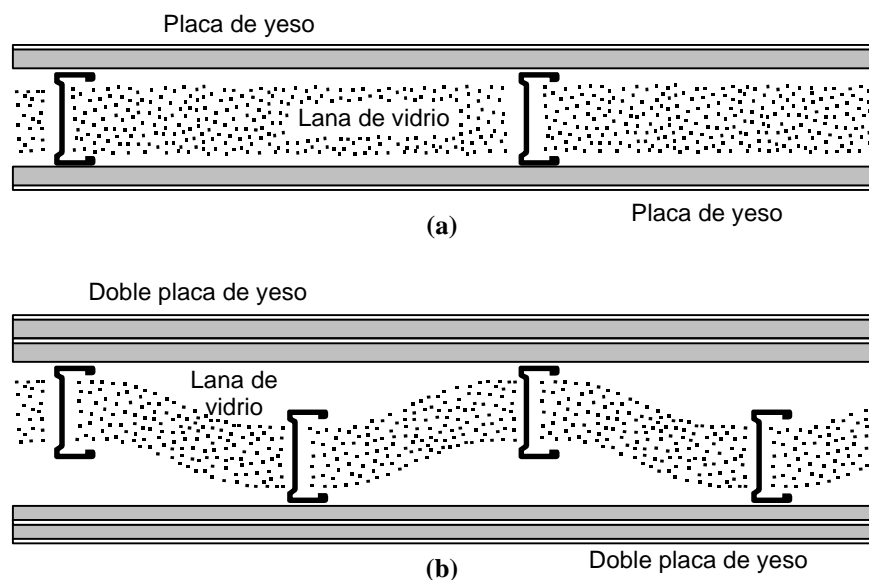


Figura 4.5. (a) Vista superior en corte de un montaje de placas de roca de yeso con estructura formada por perfiles de chapa. (b) Estructura alternada sin conexión rígida. Notar la diferencia de espesores a uno y otro lado de la pared.

También se utiliza el concepto de tabique doble para construir ventanas de gran aislación sonora, como las “peceras” que separan la sala de control de la sala de graba-

ción de los estudios. En este caso se utilizan dos hojas de vidrio grueso de distintos espesores (por ejemplo **6 mm** y **8 mm**), fijados al marco mediante masillas no endurecibles de silicona. En los bordes interiores (en forma más o menos oculta) se coloca material absorbente, como lana de vidrio o espuma de poliuretano. Para evitar que por diferencias de temperatura se produzcan condensaciones por dentro, lo cual empañaría los vidrios, se colocan gránulos de **sílica gel**, un poderoso deshumectante. En la **Figura 4.6** se muestra la estructura de una ventana de este tipo.

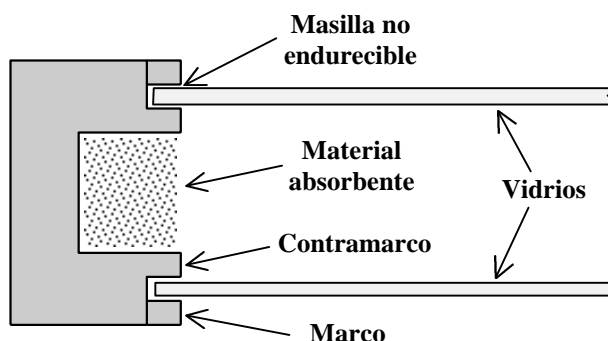


Figura 4.6. Corte según un plano horizontal de una ventana de doble vidrio. Obsérvese el diferente espesor de los vidrios.

Para catalogar la aislación sonora de diferentes materiales y estructuras se usan dos parámetros: la **pérdida de transmisión, PT**, y la **clase de transmisión sonora, STC** (Estados Unidos), o el **índice de reducción acústica, R_w** (Europa y Argentina).

La **pérdida de transmisión, PT**, es un parámetro expresado en **dB** que depende de la frecuencia e indica en cuánto se atenúa la *energía sonora* incidente al atravesar el tabique. Así, una pérdida de transmisión de **40 dB** significa que la energía sonora que pasa al otro lado es **40 dB** menor que la incidente.

Obsérvese que se está hablando de la *energía sonora*, que no es lo mismo que la *presión sonora*. Si un tabique tiene **PT = 40 dB**, y del lado de la fuente hay un nivel de presión sonora de **90 dB**, *no es válido* afirmar que del otro lado hay **90 dB – 40 dB**, es decir **50 dB**. Puede haber menos o más de **50 dB**, según las circunstancias. Por ejemplo, si el lado receptor es muy reverberante, habrá más de **50 dB**; y si el tabique es muy pequeño, por ejemplo una pequeña ventanilla en el medio de una pared muy gruesa, entonces del lado receptor habrá probablemente menos de **50 dB**. Si bien el análisis detallado no es muy complejo, escapa al objeto de este libro.

La **clase de transmisión sonora** (en inglés, sound transmission class), **STC**, es una especie de valor promedio de la pérdida de transmisión a varias frecuencias. Es un valor único que permite evaluar rápidamente la calidad de la aislación sonora que ofrece un tabique, especialmente en lo referido a la privacidad de la palabra. Así, un valor de **STC** inferior a **25** implica que la voz normal se entiende perfectamente, y un valor superior a **45** implica que la voz alta casi no se percibe. El índice de reducción sonora **R_w** es la versión europea, también usada en la Argentina (puede diferir hasta en **1 dB**).

En la **Tabla 4.2** se detallan los valores de **PT** a varias frecuencias y de **STC**, correspondientes a varios materiales y estructuras. Se han considerado los materiales y

estructuras actuando en condiciones casi ideales. No se ha tenido en cuenta, por consiguiente, la denominada **transmisión por flancos**, es decir el sonido que se filtra a través de fisuras, intersticios o juntas mal selladas, o que se propaga por la estructura en forma de vibraciones, o que se transmite por tuberías de ventilación o aire acondicionado, o por los caños de distribución de energía eléctrica. En todo proyecto de aislación acústica deben tenerse en cuenta todos estos detalles, ya que de lo contrario se corre el riesgo de invertir grandes sumas de dinero sin lograr los resultados esperados. Es importante saber que el intersticio debajo de una puerta puede llegar a empeorar la atenuación de una pared en **20 dB** ó más. Pueden utilizarse burletes perimetrales en las puertas y masilla con silicona (es decir, no endurecible) en toda fisura, grieta o junta.

Por último, debe advertirse que la información brindada en este capítulo se ha incluido a título informativo, siendo conveniente obtener una opinión especializada antes de encarar un proyecto que involucre grandes inversiones, ya que es muy fácil cometer errores que luego se pagarán, a la larga o a la corta, muy caro.

Tabla 4.2. Pérdida de transmisión de diversos materiales en función de la frecuencia, y clase de transmisión sonora (según varias fuentes).

| Material o estructura | STC | PT a la frecuencia | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------|-----|-----|------|------|------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Hormigón (90 mm) | 37 | 30 | 30 | 37 | 35 | 38 | 41 |
| Hormigón (140 mm) | 45 | 30 | 34 | 41 | 48 | 56 | 55 |
| Hormigón (190 mm) | 53 | 37 | 46 | 46 | 54 | 59 | 60 |
| Hormigón (290 mm) | 50 | 33 | 41 | 45 | 51 | 57 | 61 |
| Hormigón (90 mm) + aire (25 mm) + fibra de vidrio (65 mm) + hormigón (90 mm) + placa de yeso (16 mm) | 62 | 49 | 54 | 57 | 66 | 71 | 81 |
| Placa de yeso (Durlock) (12 mm) | 28 | 15 | 20 | 25 | 29 | 32 | 27 |
| Placa de yeso (Durlock) (2×12 mm) | 31 | 19 | 26 | 30 | 32 | 29 | 37 |
| Placa de yeso (12 mm) + aire (90 mm) + placa de yeso (12 mm) | 33 | 12 | 23 | 32 | 41 | 44 | 39 |
| Placa de yeso (2×12 mm) + aire (90 mm) + placa de yeso (12 mm) | 37 | 16 | 26 | 36 | 42 | 45 | 48 |
| Placa de yeso (2×12 mm) + aire (70 mm) + placa de yeso (2×12 mm) | 45 | 23 | 30 | 45 | 49 | 52 | 52 |
| Placa de yeso (12 mm) + aire (20 mm) + fibra de vidrio (50 mm) + placa de yeso (12 mm) | 45 | 21 | 35 | 48 | 55 | 56 | 43 |
| Placa de yeso (2×12 mm) + aire (40 mm) + fibra de vidrio (50 mm) + placa de yeso (2×12 mm) | 55 | 34 | 47 | 56 | 61 | 59 | 57 |
| Vidrio (6 mm) | 31 | 25 | 28 | 31 | 34 | 30 | 37 |
| Vidrio laminado (6 mm) | 35 | 26 | 29 | 32 | 35 | 35 | 43 |
| Vidrio (3mm) + aire (50 mm) + vidrio (3 mm) | 38 | 18 | 26 | 38 | 43 | 48 | 35 |
| Vidrio (3mm) + aire (100 mm) + vidrio (6 mm) | 45 | 29 | 35 | 44 | 46 | 47 | 50 |
| Puerta madera maciza (24 kg/m ²) sin burlete | 22 | 19 | 22 | 26 | 24 | 23 | 20 |
| Puerta madera maciza con burlete | 26 | 22 | 25 | 29 | 25 | 26 | 28 |
| Puerta de madera maciza (24 kg/m ²) + aire (230 mm) + Puerta acero chapa # 18 hueca (26 kg/m ²) + burlete magnético en el marco | 49 | 35 | 44 | 48 | 44 | 54 | 62 |

Capítulo 5

Efectos del ruido en el hombre

5.1. Introducción

El excesivo nivel sonoro, ya sea éste el resultado del ruido molesto de una maquinaria industrial o de la música más excelsa, tiene efectos nocivos para el hombre que han sido detalladamente estudiados por investigadores de todas partes del mundo. Es importante recalcar que tanto la música como el ruido de una fábrica tienen similares efectos nocivos cuando sus niveles sonoros son elevados. El cerebro los discrimina, pero el oído, que es quien sufre el daño, no.

Una cualidad del mundo moderno es, precisamente, la de que a causa del vertiginoso crecimiento de la tecnología, se ha incrementado el nivel sonoro ambiental, que hoy *se reconoce como un **contaminante** más*. Una consecuencia indirecta de esto es la tendencia a escuchar música con niveles excesivos, lo cual trae aparejados diversos problemas, como afecciones nerviosas, somáticas y auditivas.

5.2. Efectos no clínicos

El primer efecto es la molestia. A modo de criterio general, puede afirmarse que el nivel de *comfort auditivo* se da hasta los **70 a 80 dBA**, dependiendo del tipo de sonido, la motivación para escucharlo, y las características personales de quien lo escucha. Por encima de **120 dBA** se percibe dolor además de un sonido ensordecedor.

En relación con la eficiencia en el trabajo, se observa que la misma se reduce ante un ruido repentino o inusual, pero al volverse éste repetitivo el individuo se acostumbra y recupera la eficiencia. Esto es especialmente cierto para el caso de los trabajos manuales o que no requieren una gran elaboración intelectual. Las tareas intelectuales se ven más afectadas por el ruido que las físicas.

Uno de los efectos más notorios del ruido o los sonidos intensos es la interferencia a la palabra, lo cual crea dificultades para la comunicación oral. Esto a su vez lleva a las personas a elevar la voz, forzando sus cuerdas vocales.

Por otra parte, por encima de los **90 dBA** desaparece la alta fidelidad, ya que las propias distorsiones del oído impiden una escucha fiel de la música. Dichas distorsiones son, en parte, resultado de una contracción muscular refleja dentro del oído medio que actúa como mecanismo de protección del sistema auditivo. Otra razón es que los sonidos de nivel tan elevado enmascaran mucho más a los sonidos más débiles, con lo cual desaparece toda sutileza. Esto muestra lo inútil de llevar el nivel sonoro muy por encima de este valor.

5.3. Efectos clínicos no auditivos

Se han descrito numerosos efectos clínicos (efectos que se manifiestan a través de síntomas o patologías) no auditivos del ruido. Entre ellos pueden citarse la hipertensión arterial pasajera, las taquicardias, las cefaleas, el nerviosismo, el estrés, la reducción del rendimiento físico y la pérdida de la concentración y de la atención. También hay variaciones del ritmo respiratorio, disminución de la secreción salival y del tiempo de tránsito intestinal. Por último, se producen afecciones de la garganta como resultado de forzar la voz.

A partir de estudios epidemiológicos se han comprobado incrementos significativos en la incidencia de ataques cardíacos, neurológicos, digestivos y endócrinos, los cuales llegan a ser hasta 4 veces más frecuentes en la población expuesta a ruidos muy intensos, como sucede en las zonas aledañas de los aeropuertos.

Los sonidos intensos inciden también en el sentido del equilibrio, a través de dos mecanismos. El primero son las vibraciones intensas que se producen en el órgano sensor del equilibrio, que está muy próximo al oído interno y comunicado con él. El segundo es la interferencia entre las señales nerviosas de los dos sistemas, dado que los respectivos nervios están muy próximos. Esto repercute en el control del equilibrio, llegando a producirse mareos e inestabilidades ante la exposición prolongada a sonidos muy intensos (por ejemplo ante la escucha de música excesivamente fuerte, lo cual suele suceder en las discotecas y otros locales bailables).

5.4. Efectos auditivos

El efecto sobre la audición humana ha sido una de las primeras consecuencias de los niveles sonoros excesivos que se estudiaron. Las investigaciones se realizaron aprovechando datos obtenidos en ambientes laborales. La consecuencia más notoria es la *pérdida de audición*. Esta dolencia, conocida como **hipoacusia**, sobreviene ante la exposición a ruidos extremadamente fuertes aún cuando sea durante poco tiempo, o ante la exposición reiterada a lo largo del tiempo a ruidos no tan intensos.

Ejemplos del primer caso son las explosiones, bombas de estruendo, o disparos de armas de fuego sucedidas cerca de una persona, sin mediar ningún tipo de protección auditiva. El segundo caso se da por lo general en ambientes laborales, aunque también se puede dar en el interior de vehículos, en ambientes con música muy fuerte, y ante el uso del walkman, discman o de radios portátiles con auriculares, ya que en general el usuario ajustará el volumen de modo de contrarrestar el ruido ambiente (ya bastante elevado), enmascarándolo.

La pérdida auditiva se determina midiendo, por medio de una audiometría, cuánto sube el umbral auditivo en cada frecuencia respecto al considerado normal (ver capítulo 2, sección 2.4), teniendo en cuenta que el aumento del umbral significa que hace falta más nivel de presión sonora para percibir la presencia de un sonido. Luego se promedian los valores a **500 Hz, 1 kHz y 2 kHz**, obteniéndose la **pérdida auditiva promedio, PAP**. Se considera que hay hipoacusia, o incapacidad auditiva, cuando la **PAP** supera los **25 dB**, ya que se ha comprobado que a partir de esta cifra *comienzan las dificultades para la comprensión de la palabra*.

Se define el riesgo de la exposición a determinado nivel de ruido de origen laboral durante un tiempo dado como *el porcentaje de las personas expuestas que adquieren algún grado de incapacidad auditiva menos el porcentaje de las personas no expuestas que adquieren el mismo grado de incapacidad*. Se toma esta diferencia para eliminar los casos de presbiacusia (es decir la pérdida gradual de la audición con la edad), y conservar sólo aquellos atribuibles exclusivamente a la exposición al ruido.

En la **Tabla 5.1** se indican los porcentajes de personas no expuestas a ruidos importantes que adquieren incapacidad de acuerdo al criterio anterior, en función de la edad, es decir, la distribución estadística de presbiacúsicos.

Tabla 5.1. Porcentaje de personas con presbiacusia en función de la edad.

| Edad | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| % | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 14 | 21 | 33 | 50 |

La Organización Internacional de Normalización (ISO, International Organization for Standardization) ha emitido una norma, la ISO 1999, que proporciona los riesgos (según la definición anterior) en función del nivel sonoro laboral promedio en dBA, y los años de exposición, como se indica en la **Tabla 5.2** (los datos consignados corresponden a la primera edición de la ISO 1999). A los efectos de calcular el riesgo de acuerdo con la definición dada, se considera que la vida laboral comienza a los 20 años de edad.

Tabla 5.2. Riesgo porcentual en función del nivel sonoro y de los años de exposición.

| Nivel sonoro promedio [dBA] | Años de exposición | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 85 | 1 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 7 |
| 90 | 4 | 10 | 14 | 16 | 16 | 18 | 20 | 21 | 15 |
| 95 | 7 | 17 | 24 | 28 | 29 | 31 | 32 | 29 | 33 |
| 100 | 12 | 29 | 37 | 42 | 43 | 44 | 44 | 41 | 35 |
| 105 | 18 | 42 | 53 | 58 | 60 | 62 | 61 | 54 | 41 |
| 110 | 26 | 55 | 71 | 78 | 78 | 77 | 72 | 62 | 45 |
| 115 | 36 | 71 | 83 | 87 | 84 | 81 | 75 | 64 | 47 |

El nivel sonoro promedio se calcula sobre **8 horas diarias y 6 días por semana**. Si la jornada laboral es de menos horas, se resta al nivel real **3 dBA** por cada reducción a la mitad, y lo mismo para cada reducción a la mitad de la semana laboral. Por ejemplo, si un disc jockey trabaja **4 horas por día y 3 días por semana** (es decir, la mitad de horas y la mitad de días) sometido a **106 dBA**, equivale a $106 - 3 - 3 = 100 \text{ dBA}$ para la tabla anterior, y por lo tanto después de **10 años** de actividad el riesgo de sufrir daño auditivo irreversible es de un **29%**.

Vemos, entonces, que para los **100 a 110 dBA** que en promedio hay en las discotecas, salones de fiestas, conciertos de rock, etc., el riesgo de sufrir hipoacusia en pocos años es muy alto. Por esta razón el técnico de sonido (en especial el disc jockey y quien hace sonido en salas o exteriores) está expuesto a ver deteriorado uno de sus sentidos más preciados y *laboralmente más imprescindibles*: el oído. Esto implica la necesidad de trabajar siempre con protectores auditivos, ya sean del tipo de los tapones (de siliconas, de lana mineral, etc.) o del tipo de copa (auriculares, orejeras, etc.), los que utilizados sistemáticamente reducen los riesgos considerablemente.

Los valores de la tabla anterior han llevado a la mayoría de los países a promulgar reglamentaciones por las cuales se exige que en *ambientes laborales* no se exceda un nivel promedio de **90 dBA** (lo cual en realidad brinda una protección relativa, porque hasta un **21%** de los sometidos a este nivel sonoro puede desarrollar hipoacusia). En la República Argentina, la ley que se aplica es la **Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo, N° 19.587**. En general cada país cuenta con legislación propia que regula la máxima exposición a ruido laboral admisible, pero en general los límites para una jornada de **8 horas** oscilan entre **85 dBA y 90 dBA**.

La tabla muestra que cuando el nivel de ruido es inferior a los **80 dBA** el porcentaje de personas afectadas más allá de lo atribuible a la presbiacusia no es significativo. Por otra parte, la **Agencia de Protección Ambiental (EPA, Environmental Protection Agency)** de los Estados Unidos, ha concluido que una exposición permanente (**24 horas diarias**) a un nivel de ruido de **70 dBA** o bien una exposición de carácter laboral (**8 horas diarias**) a **75 dBA** aseguran que un **96%** de la población no sufrirá mayores daños auditivos que los correspondientes a la propia presbiacusia.

5.5. Evolución de la sordera profesional

La sordera profesional, inducida por ruido o sonidos de nivel muy alto, comienza perjudicando la audición de las altas frecuencias. El sonido pierde brillo, y más adelante empiezan a perderse las frecuencias imprescindibles para comprender la palabra. Es de notar que la percepción de la música se ve afectada mucho más tarde, ya que la comprensión de la música es mucho menos crítica que la de la palabra.

Después de una exposición no muy larga a niveles muy altos, por ejemplo durante **2 horas a 100 dBA**, se produce una hipoacusia temporaria, es decir que después de unas horas de descanso auditivo desaparece, volviendo la audición a niveles normales. Sin embargo, la calidad de la audición poco después de la exposición es un fiel reflejo de lo que será la audición después de unos años de someter reiteradamente el oído a estos niveles. En otras palabras, la hipoacusia sigue, a largo plazo y de forma irreversible, evolución similar que al principio se da temporariamente.

Soporte teórico

Capitulos 6 al 14 del libro
Acústica y Sistemas de Sonido
por el Ing. Federico Miyara

Capítulo 6

Señales y Sistemas

6.1. Introducción

La interconexión entre dos o más dispositivos, tales como micrófonos, amplificadores, ecualizadores, altavoces, etc., da origen a lo que se denomina un **sistema**. Estos dispositivos, así como el sistema resultante, tienen la característica común de que *todos reciben, procesan y entregan señales de algún tipo*. El concepto de **señal** es el de *una magnitud variable en el tiempo que transmite o transporta información*. En el caso de los sistemas de sonido, existen dos tipos principales de señal: acústicas y eléctricas. La conversión entre ambos tipos de señal se realiza por medio de dispositivos denominados genéricamente **transductores** (micrófonos, altoparlantes, auriculares). Otros tipos de señales involucradas en sistemas de audio son las magnéticas (cintas, discos rígidos) y las ópticas (discos compactos, transmisión por fibra óptica).

A efectos de lograr un resultado óptimo, es necesario tomar ciertos recaudos en la interconexión de los componentes de un determinado sistema. Cuestiones como la adaptación de impedancias, el ancho de banda, el rango dinámico, la relación señal a ruido y otras, deben ser cuidadosamente analizadas en cada caso particular si se desea sacar el máximo provecho del equipamiento disponible. En lo que sigue nos ocuparemos de algunos de estos aspectos, varios de los cuales serán profundizados en capítulos ulteriores.

6.2. Señales

Según hemos visto, todos los equipos, dispositivos y sistemas trabajan con señales, es decir con magnitudes variables que transmiten información. En el caso de los sistemas de sonido, *la información es, precisamente, la forma de onda del sonido*. La señal original es el sonido mismo tal como llega al elemento transductor, es decir al micrófono. El micrófono convierte la señal sonora en una señal eléctrica. ¿Qué relación existe entre ambas señales? Idealmente, la señal eléctrica debería tener exactamente la misma forma de onda que la señal sonora, con un mero cambio de unidades: la señal sonora es una presión sonora, mientras que la señal eléctrica es una tensión (o voltaje). Este es el concepto de **analogía**. Por eso se dice que la señal eléctrica es una representación **análoga** o **analógica** de la señal sonora. En la **Figura 6.1** se ilustra esta situación, mostrando una señal sonora y su analogía eléctrica. Aunque las amplitudes se han

dibujado deliberadamente diferentes, ello no implica ninguna relación de tamaño entre las señales, simplemente porque no es posible comparar una presión con una tensión eléctrica (del mismo modo que no tiene sentido decir que “la longitud de esta mesa es mayor que una hora”).

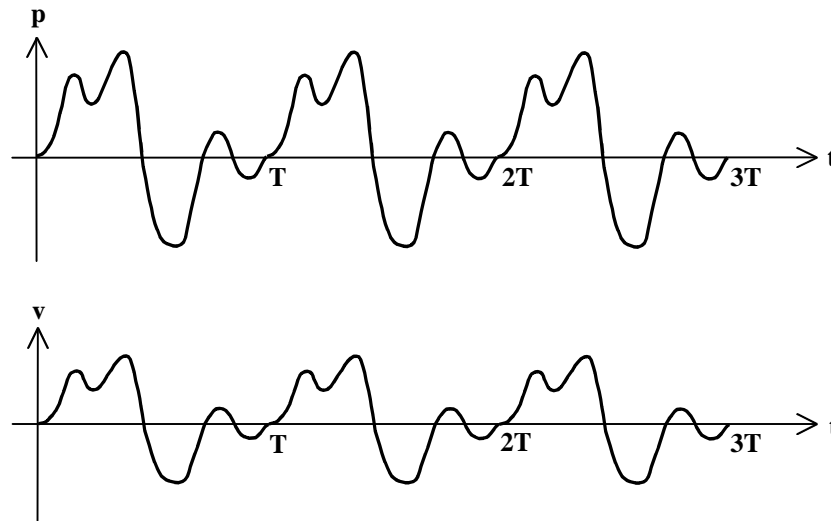


Figura 6.1. Forma de onda de una señal sonora (presión) y su análoga eléctrica (tensión). Obsérvese que las formas de onda, así como sus frecuencias, son iguales. El cambio aparente de amplitud, en realidad se debe a que los factores de escala no son iguales. En otras palabras, no es posible comparar unidades de presión con unidades de tensión eléctrica.

Hemos dicho que *idealmente* las formas de onda de dos señales análogas (como el sonido y la tensión correspondiente producida por el micrófono) deberían coincidir. En los casos *reales*, no obstante, esto es sólo aproximadamente así, debido básicamente a dos fenómenos: las **distorsiones** (o deformaciones de la onda) y el **ruido**. Las distorsiones son las alteraciones en la forma de onda, y el ruido es una **señal espuria** o indeseada que se agrega a la señal de interés. La calidad de un transductor será función de qué tan pequeños sean los efectos de estos fenómenos. El micrófono ideal no es aquel que carece por completo de distorsión y ruido (ya que ello es una imposibilidad física), sino aquel *capaz de reducirlos a un nivel imperceptible para el oído humano*.

6.3. Sistemas

Un **sistema** es, generalmente hablando, el resultado de interconectar entre sí un conjunto de dispositivos con entidad propia. Hay dos razones básicas para *pensar en términos de sistemas* cuando se encara la solución de un problema técnico. La primera, es porque resulta más sencillo subdividir el problema en varios subproblemas más simples, y luego resolver éstos mediante herramientas y recursos más específicos. La segunda razón es que las soluciones a los subproblemas pueden tener otros usos. Así, es muy probable que un subproblema sea también parte de otros problemas, o, lo que es lo

mismo, que al resolver otros problemas técnicos complejos surjan situaciones similares a algunas ya resueltas con anterioridad. Por ejemplo, el problema de la **amplificación** es muy recurrente en la electrónica, de modo que el diseño de un amplificador puede aprovecharse en muchas situaciones diferentes. Esto no sólo permite amortizar mejor la inversión realizada para el diseño del producto, sino que extiende su mercado potencial y permite a una empresa especializarse en su fabricación, lo cual redundará en una optimización de los procesos de manufactura y en una mejor calidad final del equipo.

A modo de ejemplo, supongamos que se requiere un teclado capaz de entregar una potencia de **100 W** y que tenga la posibilidad de ecualización para compensar los defectos acústicos de la sala en que se lo vaya a utilizar, es decir un “sintecualiamplificador”. Difícilmente haya muchos potenciales usuarios de un producto tan específico. Quizás pudieran venderse **100** ó **200** unidades por año, lo cual no justifica la inversión en el desarrollo de tal equipo. En cambio, podemos desarrollar un teclado que sólo produzca señal de bajo nivel, y separadamente un ecualizador y un amplificador de **100 W**. El mercado para el amplificador será potencialmente mucho más amplio, porque no sólo lo requerirán los **100** ó **200** usuarios del “sintecualiamplificador” sino quien tenga un reproductor de **CD**, quien posea un sintonizador, quien desee amplificar su casettera o su **DAT**, etc. Algo similar sucederá con la parte ecualizadora y con el teclado mismo.

Este planteo *modular* requiere que los fabricantes de los diversos componentes de un sistema se pongan de acuerdo acerca de ciertas pautas mínimas de compatibilidad, que aseguren que sea posible, por ejemplo, conectar el amplificador de una marca con el ecualizador de otra. Para ello existen **normas** que son respetadas por todos aquellos que pretenden ofrecer un producto versátil. En ese sentido, hoy en día la cuestión se ha facilitado bastante, pero sigue siendo necesario verificar la interconectabilidad de dos equipos para asegurar su funcionamiento óptimo.

6.4. Diagramas de bloques

Para representar gráficamente las interconexiones entre los diversos dispositivos se utilizan diagramas de bloques. Un **diagrama de bloques** es un dibujo en el cual cada componente de un sistema se representa con un símbolo adecuado (por ejemplo un triángulo o un rectángulo), con una o más **entradas**, por las cuales ingresan la o las señales a procesar, y también con una o más **salidas**, por las cuales se obtienen la o las señales ya procesadas. Cada bloque puede a su vez contener **parámetros**, que son valores numéricos que se asignan a determinadas variables que afectan el funcionamiento. En un amplificador, por ejemplo, uno de tales parámetros sería el control de **ganancia** (o **volumen**). En la **Figura 6.2** se muestra un ejemplo elemental de diagrama de bloques correspondiente a un micrófono, un preamplificador, un ecualizador, un amplificador de potencia y un parlante.

Una característica de los diagramas de bloques es que son esquemáticos. No se presentan los detalles del conexionado. Las líneas, que en la realidad son pares de cables, están representadas en general por un solo hilo (representación **unifilar**). A pesar de ello, la interconexión real supone algunas condiciones de compatibilidad. Por ejemplo, las impedancias de entrada y salida, el nivel de señal, el tipo de señal, el tipo de referencia para la señal, el rango dinámico, la respuesta en frecuencia, el tipo de conectores, la potencia, etc.

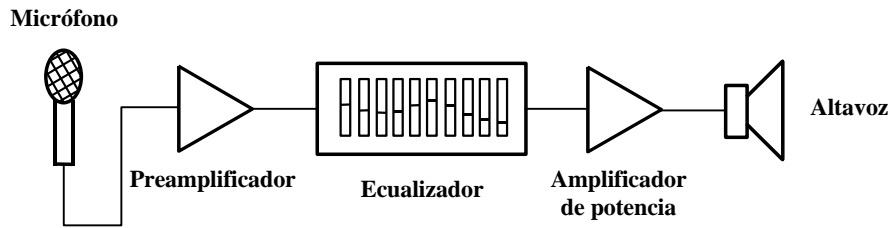


Figura 6.2. Un ejemplo de diagrama de bloques

6.5. Ruido

Se entiende por **ruido** toda señal espuria o indeseada que se superponga a la señal útil. La naturaleza relativa de este concepto puede ilustrarse del siguiente modo: si en un lugar hay cuatro personas, de las cuales **A** escucha a **B** y **C** escucha a **D** (Figura 6.3), entonces lo que habla **D** es ruido para **A**, pero ¡lo que habla **B** es ruido para **C**!

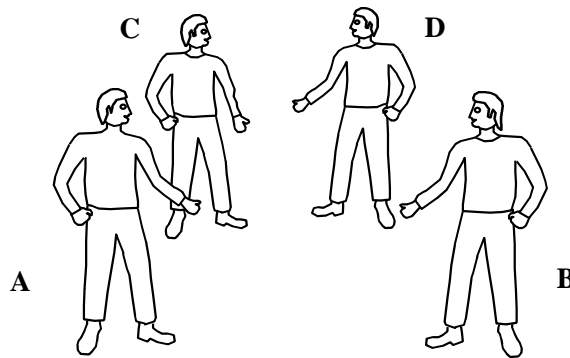


Figura 6.3. Cuatro personas conversando. **A** escucha a **B** y **C** escucha a **D**. Lo que habla **D** es ruido para **A** pero no para **C**; y lo que habla **B** es ruido para **C** pero no para **A**.

En los sistemas de sonido existen dos tipos de ruido: el **ruido acústico** y el **ruido eléctrico**. El ruido acústico es el ruido ambiente propiamente dicho, formado por un sinnúmero de fuentes cercanas y lejanas que se superponen. Por ejemplo, el ruido de los vehículos de la calle o de la gente que conversa, el ruido de máquinas, ventilación, etc., que se filtran a través de defectos en la aislación sonora. Este ruido puede reducirse a un mínimo por medio del control de ruido, mejorando aislaciones o reduciendo la emisión de las fuentes. El ruido eléctrico se origina en los fenómenos físicos que tienen lugar dentro de los circuitos eléctricos y electrónicos, y si bien es posible reducirlo cuidando el diseño y fabricación de los componentes y dispositivos, existen límites físicos que impiden eliminarlo por completo. Lo importante es mantenerlo por debajo del umbral de la audición, lo que es hoy posible aunque costoso. Otro tipo de ruido eléctrico es el

que se origina en los soportes magnéticos, como cintas o discos, que se traslada a la señal eléctrica. En los sistemas digitales, existe además el ruido de **cuantización** o de **digitalización**, que comentaremos oportunamente.

El ruido puede clasificarse también según su espectro de frecuencias. Hay ruidos de espectro continuo, de espectro discreto, y mixtos. El ruido eléctrico de los componentes es de espectro continuo, es decir que contiene todas las frecuencias del espectro audible. El ruido ambiente, suele ser de tipo mixto. Se combinan ruidos de espectro continuo, como el ruido del viento o la combinación de numerosas fuentes relativamente lejanas, con ruidos que poseen frecuencias específicas, como el ruido de ventiladores u otras máquinas. Por ejemplo, si un ventilador tiene **4** aspas y gira a **1200 rpm** (revoluciones por minuto), genera un tono de $4 \times 1200 / 60 = 80 \text{ Hz}$, más sus armónicos (el ventilador genera además ruido aerodinámico, que es de espectro continuo). Los transformadores de las fuentes de alimentación, así como los balastos (inductancias) de los tubos fluorescentes vibran con la frecuencia de la línea de alimentación, es decir **50 Hz**, provocando también zumbidos audibles. Estos zumbidos también pueden acoplarse eléctricamente, a través del efecto capacitivo o **efecto antena** de los cables, razón por la cual éstos deben ser de excelente calidad y adecuadamente blindados (el **blindaje** o cubierta metálica de los cables permite eliminar este efecto).

Otro tipo de ruido que es a veces muy insidioso es el que se origina en los **acoples** entre los parlantes y los micrófonos (ver capítulo 12). Este ruido, de espectro discreto, está normalmente constituido por un único tono cuya frecuencia puede variar según la distancia recorrida por el sonido entre el parlante y el micrófono (puede ser a través de un camino directo o por reflexiones, según el tipo de orientación, la direccionalidad del micrófono, la cobertura del parlante, la ubicación respecto a superficies reflectoras, la ganancia del sistema, etc.).

Finalmente, existen los ruidos de conexiónado, tanto en el instante en que se realiza la conexión o desconexión, o al mover accidentalmente cables, como los permanentes, ocasionados por deficiencias en los cables y contactos. Los primeros suelen ser bastante intensos, y pueden evitarse bajando el nivel al mínimo antes de realizar cualquier tipo de conexión.

En la mayoría de los equipos de audio se especifica la **relación señal/ruido**, **S/R**, definida como

$$S/R = 20 \log_{10} \frac{\text{señal}}{\text{ruido}},$$

donde la **señal** se refiera al máximo valor de señal que admite el equipo para un funcionamiento correcto (sin distorsión).

6.6. Rango dinámico

El **rango dinámico**, **RD**, es un parámetro asociado a una señal que representa la relación entre el máximo y el mínimo nivel de la señal, expresada logarítmicamente en **decibels**:

$$RD = 20 \log_{10} \frac{S_{\text{máxima}}}{S_{\text{mínima}}}.$$

Para algunos tipos de señal se define el concepto de **nivel**, como una expresión logarítmica de la señal en **dB**, referida a un valor de referencia. Por ejemplo, la **presión sonora**, vista en el capítulo 1, tiene asociado un **nivel de presión sonora**, dado por

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad [\text{dB}] .$$

En esos casos, el rango dinámico **RD** puede obtenerse también como diferencia entre los niveles máximo y mínimo de la señal. Por ejemplo,

$$\text{RD} = \text{NPS}_{\text{máxima}} - \text{NPS}_{\text{mínima}} .$$

Si, por ejemplo, la señal sonora producida por un instrumento es como máximo de **100 dB** y como mínimo de **38 dB**, entonces

$$\text{RD} = 100 \text{ dB} - 38 \text{ dB} = 62 \text{ dB} .$$

La importancia del rango dinámico es que permite determinar si una señal atravesará satisfactoriamente un sistema dado, comparándola con su especificación de la relación señal/ruido. Por ejemplo, la señal anterior no podría grabarse satisfactoriamente en una cassettera con una relación señal/ruido de **58 dB**, pero sí en un **DAT** con una relación señal a ruido de **95 dB**.

6.7. Distorsión

La distorsión es la deformación de la forma de onda de una señal. El caso más sencillo, representado en la **Figura 6.4** es cuando la señal es una senoide pura. Como se

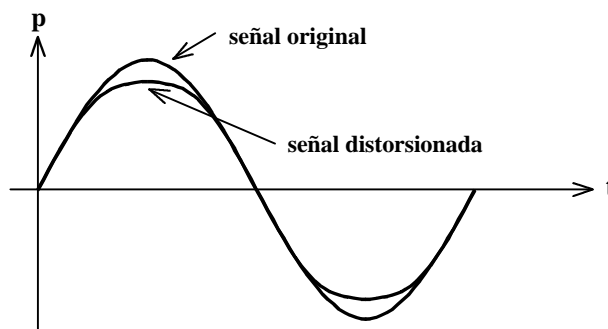


Figura 6.4. Deformación de una onda senoidal a causa de una distorsión en el sistema.

puede observar, la forma de onda cambió pero la frecuencia fundamental sigue siendo la misma. Ello implica que aparecen armónicos de la fundamental, que se agregan a la señal original. Este tipo de distorsión se denomina **distorsión armónica**, y se especifica

por medio de un parámetro denominado **distorsión total armónica, THD** (siglas de la denominación inglesa: **T**otal **H**armonic **D**istortion) que expresa los armónicos generados como porcentaje de la señal senoidal original:

$$\text{THD} = \frac{\text{armónicos}}{\text{fundamental}} \cdot 100 \, \%.$$

El efecto audible de la distorsión armónica es el de agregar algo de brillo al timbre de la onda senoidal. En la mayoría de los casos no es un efecto desagradable, aun cuando altera la señal original.

Lamentablemente, es muy raro que en una señal real aparezca una senoide pura. En general aparecen ondas mucho más complejas, formadas en el mejor de los casos por fundamentales que ni siquiera están relacionadas armónicamente. En estos casos aparece otro tipo de distorsión denominada **distorsión por intermodulación**. Tomemos el caso más simple, que es el de dos tonos senoidales puros de frecuencias f_1 y f_2 . Esta distorsión se caracteriza por el hecho de que además de los armónicos de f_1 y f_2 aparecen frecuencias iguales a las sumas y restas de esos armónicos, es decir aparecen las frecuencias dadas por la fórmula:

$$f = |n \cdot f_1 \pm m \cdot f_2|,$$

donde n y m son números enteros (incluyendo el 0), y las barras verticales significan que se toma el valor absoluto (es decir el resultado sin el signo en caso de que diera negativo). Estas frecuencias nuevas se llaman **productos de intermodulación**, o también **productos de distorsión**.

La distorsión por intermodulación se mide con una señal formada por un tono de **60 Hz** superpuesto a uno de **7 kHz**, siendo el de **60 Hz** de amplitud 4 veces mayor que el de **7 kHz**, y se especifica con un parámetro abreviado **IMD** (siglas del inglés, intermodulation distortion) que expresa el porcentaje de los armónicos generados respecto a la señal original.

Para ver el efecto audible de esta distorsión, supongamos por ejemplo que utilizamos como frecuencias f_1 y f_2 las correspondientes a un acorde de tercera mayor (ver capítulo 3), por ejemplo **100 Hz** y **125 Hz**. Este acorde forma una consonancia en su versión original, formada por las notas **sol** y **si**. Las frecuencias presentes originalmente son los armónicos de cada una, es decir **100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 600 Hz, ...** y **125 Hz, 250 Hz, 375 Hz, 500 Hz, 675 Hz, ...** Si ahora restamos **375 Hz – 200 Hz**, obtenemos un sonido de frecuencia **225 Hz**, que es disonante con el de **200 Hz**. El resultado de ésta y otras disonancias que se verifican entre la gran cantidad de sonidos parásitos generados es un sonido desagradable si uno espera escuchar una consonancia.

La distorsión por intermodulación resulta, así, mucho más perjudicial para la calidad del sonido que la distorsión armónica. Si bien cualquier dispositivo que distorsiona lo hace de las dos maneras, no necesariamente todas las distorsiones armónicas están acompañadas por la misma distorsión por intermodulación, razón por la cual es importante en las especificaciones técnicas de los equipos disponer de ambas cifras.

Tanto la distorsión armónica como la por intermodulación son distorsiones **no lineales**, es decir que se producen cuando las amplitudes son grandes. Para señales de pequeña amplitud la distorsión es, normalmente, despreciable. Por ese motivo en gene-

ral es la distorsión quien pone un límite al máximo nivel de señal que puede manejar un dispositivo. Cuando la distorsión se vuelve excesiva, se dice que el dispositivo se **satura**, o que entra en **saturación**.

6.8. Respuesta en frecuencia

Las distorsiones discutidas en la sección anterior son del tipo denominado **no lineal**. Existe otro tipo de distorsión, denominado **lineal**, que es independiente de la amplitud (mientras no sobrevenga la saturación, es decir las distorsiones no lineales). En este tipo de distorsión lo que ocurre es que cada frecuencia presente en la señal es tratada en forma diferente. De hecho, una señal senoidal no experimenta deformación alguna en su forma de onda.

Este comportamiento se conoce como **respuesta en frecuencia**, y se especifica como una curva que representa la relación en **dB** entre la entrada y la salida de un dispositivo para diversas frecuencias. Los detalles serán incluidos en cada caso particular. En la **Figura 6.5** se muestra un ejemplo.

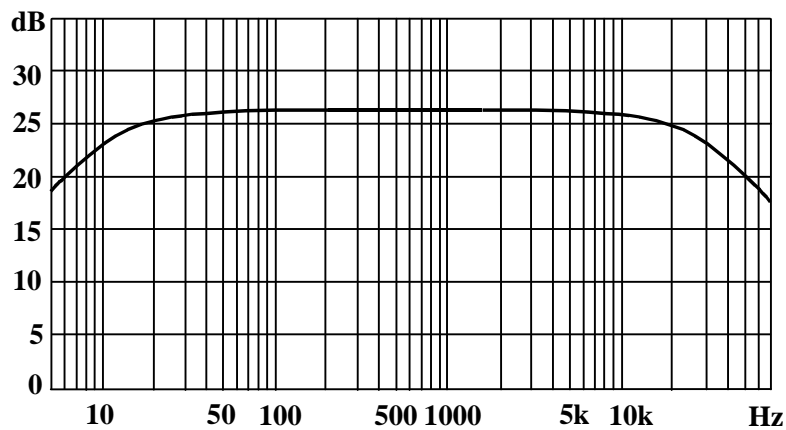


Figura 6.5. Respuesta en frecuencia de un amplificador.

6.9. Procesamiento de señal

Cada bloque de un sistema realiza algún tipo de procesamiento de señal, es decir modifica de alguna manera útil la señal que llega a su entrada. Existen numerosos dispositivos procesadores de señal. Repasaremos brevemente los más fundamentales, y posteriormente profundizaremos algunos conceptos sobre cada uno de ellos.

El primer procesador de la cadena de audio es el **micrófono**, un *transductor* capaz de convertir señal sonora en señal eléctrica. La necesidad de este dispositivo surge de que el procesamiento posterior se realiza hoy exclusivamente por medios electrónicos, que manejan señales eléctricas.

El segundo procesador de señal es el **amplificador**. Este componente toma una señal eléctrica de pequeño nivel y la transforma en una señal de igual forma de onda

pero mayor amplitud, es decir la **amplifica**. Los amplificadores son necesarios porque las señales de los transductores son normalmente de muy bajo nivel, insuficiente para comandar directamente un sistema de registro del sonido, o un parlante. Hay dos tipos de amplificadores: los que toman señales de muy bajo nivel y las convierten en señales de mediano nivel, denominados **preamplificadores**, y los que toman señales de mediano nivel y las amplifican hasta niveles muy elevados de potencia. Estos últimos se denominan **amplificadores de potencia**.

Un tercer tipo de procesador lo constituyen las varias formas de **filtros**. Estos dispositivos dejan pasar ciertas frecuencias del espectro de la señal de entrada, y bloquean las restantes frecuencias. Dos ejemplos son el **control de tonos** (graves-agudos, o graves-medios-agudos) y los **ecualizadores**. Se utilizan para varias funciones: para enfatizar algunas frecuencias presentes en el espectro de la señal de entrada pero que por alguna razón sufren atenuaciones dentro del sistema; para corregir problemas acústicos de la sala; para lograr ciertos efectos especiales; para reducir el ruido total del sistema bloqueando las bandas de frecuencia en las cuales hay ruido pero no señal, etc.

Otra clase de procesadores son los **compresores, expansores, limitadores y compuertas**. La aplicación de estos dispositivos permite acomodar el **rango dinámico**, es decir la relación entre el máximo y el mínimo nivel de una señal, al rango dinámico manejable por un procesador posterior. Así, los compresores reducen el rango dinámico, sin afectar mayormente la fidelidad de lo escuchado. Los limitadores son protecciones destinadas a evitar picos muy elevados que destruirían alguna parte del sistema (por ejemplo los tweeters). Los expansores permiten recuperar rango dinámico, así como reducir el ruido de bajo nivel. Por último, las compuertas eliminan la señal cuando su nivel está por debajo de cierto umbral, lo cual permite evitar que durante los silencios aparezca el ruido residual del dispositivo que le precede (cuando la señal es suficientemente alta, el ruido es enmascarado por ésta).

Finalmente, está una familia muy amplia de **procesadores de efectos**, dispositivos que crean efectos como la reverberación, las reflexiones tempranas (retardos), el enriquecimiento del espectro de un sonido, etc. La finalidad de estos es dar más realismo a una grabación o una sonorización, permitir una mayor expresividad, mejorar la calidad de los sonidos o de su percepción, etc.

Capítulo 7

Electricidad

7.1. Circuitos eléctricos

Es importante conocer algunos rudimentos de la terminología eléctrica y electrónica para sacar el mejor provecho a los equipos que integran una cadena de audio. Comencemos definiendo un **circuito eléctrico** como un conjunto de componentes interconectados por medio de **hilos conductores** (cables), de tal modo que exista uno o más lazos cerrados. Estos componentes pueden ser fuentes de alimentación (por ejemplo una batería, o la línea domiciliaria), fuentes de señal (por ejemplo micrófonos, sintetizadores), dispositivos eléctricos (lámparas, motores, resistores y capacitores) o componentes electrónicos (diodos, transistores y circuitos integrados o chips).

7.2. Corriente eléctrica

La característica de tales circuitos es que por ellos circula **corriente eléctrica**, que no es otra cosa que cargas eléctricas en movimiento. La intensidad de corriente eléctrica, o simplemente **corriente**, se define como la cantidad de carga eléctrica que circula por un conductor, y se mide en una unidad denominada **amper** (o **amperio**), abreviada **A**. Para corrientes pequeñas se utiliza la unidad **miliamper** (**mA**), es decir la milésima parte de un **amper**. Por ejemplo, por una lamparita común circula una corriente de alrededor de **0,3 A**, es decir **300 mA**.

Puede establecerse una analogía hidráulica para muchos conceptos eléctricos. En el caso de la corriente, se la puede asimilar a un caudal de agua circulando por una tubería.

7.3. Tensión

La corriente es una de las dos magnitudes circuitales más relevantes. La otra es la **tensión**. Esta magnitud se mide utilizando como unidad el **volt** (o **voltio**), razón por la cual a veces se le llama **voltaje**. A diferencia de la corriente, la tensión se mide entre dos puntos de un circuito. Así, en la línea domiciliaria, la tensión entre el vivo y el neutro es de **220 V**. Del mismo modo, la tensión entre el positivo y el negativo de una pila

común es de **1,5 V**. Un ejemplo más específico es la tensión entre los terminales de un micrófono. En este caso los niveles son muy pequeños, por lo cual es conveniente utilizar como unidad un submúltiplo del volt: el **milivolt (mV)**, que equivale a la milésima parte de **1 V**.

En la analogía hidráulica, la tensión es equivalente a la diferencia de presión a dos alturas diferentes de una cañería.

7.4. Fuente de tensión ideal

La **fente de tensión** es un componente de los circuitos que espontáneamente produce una tensión entre sus terminales. La fuente es **ideal** cuando dicha tensión es independiente de lo que se le conecte. En la realidad no existen las fuentes ideales, pero algunas fuentes, como la línea domiciliaria de **220 V** y las baterías de automóvil se aproximan bastante.

Hay dos tipos de fuentes de tensión: las fuentes constantes (tensión continua) y las fuentes variables en el tiempo (tensión alterna). En la **Figura 7.1** se muestran los símbolos utilizados para ambas. Las fuentes de tensión se pueden clasificar en **fuentes de alimentación**, y **fuentes de señal**. Las fuentes de alimentación son las que proporcionan la energía que un circuito necesita para poder funcionar. Normalmente son de valor elevado, del orden de algunos volts a varios cientos de volts, y constituyen una parte interna e inaccesible de los equipos. Las fuentes de señal, en cambio, tienen niveles normalmente mucho más bajos, que pueden llegar a ser menores de **1 mV**.



Figura 7.1. (a) Símbolo de una fuente de tensión constante. (b) Símbolo de una fuente de tensión variable

Las fuentes de alimentación pueden ser de continua (pilas, baterías, fuentes de los circuitos electrónicos) o de alterna (línea de distribución de energía domiciliaria de **220 V**). Las **fuentes de señal** son, casi siempre, de alterna.

7.5. Resistencia

Desde el punto de vista de los bloques, las señales eléctricas son casi siempre tensiones, aunque internamente los dispositivos electrónicos pueden trabajar *tanto con señales de tensión como con señales de corriente*. La conversión entre una corriente y una tensión se realiza con un elemento llamado **resistor** (o también, por abuso de terminología, **resistencia**). El resistor tiene asociado un valor llamado **resistencia** y simboliza-

do R , que se expresa en unidades de **ohm** (Ω), o su múltiplo, el **kiloohm** ($k\Omega$), igual a **1.000 Ω** . El símbolo de un resistor es una línea quebrada (ver **Figura 7.2**).

La propiedad fundamental de un resistor es la **Ley de Ohm**, que relaciona precisamente la tensión V entre sus terminales y la corriente I que circula por ella. Esta ley establece que

$$V = R \cdot I.$$

Esta famosa relación es básica para el estudio de los circuitos eléctricos. Por ejemplo, si por un resistor de **600 Ω** circula una corriente de **2 mA**, entonces la tensión entre los terminales de la resistencia será

$$V = 600 \times 0,002 = 1,2 \text{ V}.$$

También puede presentarse en su forma inversa:

$$I = \frac{V}{R}.$$

Esta fórmula indica que, a igual tensión, la corriente disminuye al aumentar la resistencia. Esta es la razón por la cual este dispositivo se denomina *resistor*: se “resiste” a la circulación de corriente.

En la **Figura 7.2** se muestra el diagrama de un circuito con una fuente de tensión y un resistor, ilustrando la Ley de Ohm.

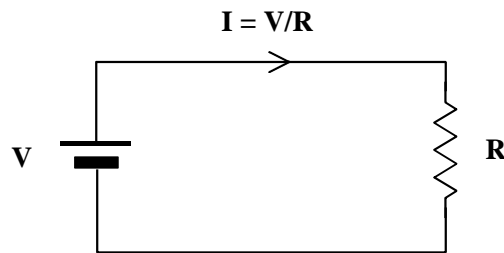


Figura 7.2. Circuito simple formado por una pila y una resistencia. La corriente y la tensión verifican la ley de Ohm: $V = R \cdot I$.

Todo conductor (cable) real tiene algo de resistencia. La resistencia aumenta con la longitud del conductor, y también aumenta al reducirse la sección. Así, un cable grueso tendrá baja resistencia, y un cable delgado, alta resistencia. Por esa razón, los cables destinados a conducir grandes corrientes deben ser gruesos.

En la analogía hidráulica que veníamos desarrollando, un resistor sería equivalente a un caño delgado. Al colocar ese caño comunicando un tanque de agua de gran altura con otro de pequeña altura, el caudal (corriente) será tanto más pequeño cuanto más delgado sea el caño, lo cual es equivalente a aumentar la resistencia (ver **Figura 7.3**).

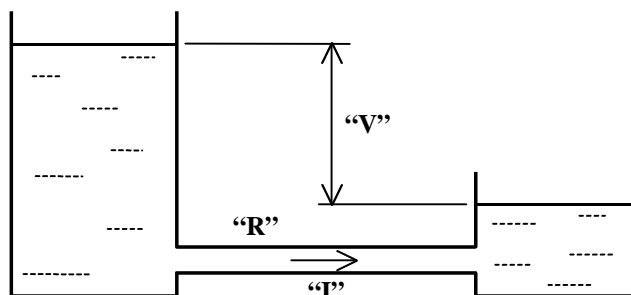


Figura 7.3. Analogía hidráulica del circuito de la **Figura 7.2**. La fuente está representada por los dos tanques con desnivel, y el resistor por un caño más o menos delgado que los comunica.

7.6. Potencia eléctrica

La **potencia eléctrica P** (o simplemente **potencia**) es la energía eléctrica entregada a un dispositivo por unidad de tiempo (normalmente, **1 s**). Se expresa en **watt** (o también **vatio**), unidad que se abrevia **W**. Se demuestra en Electrotecnia que la potencia entregada a cualquier elemento de dos terminales de un circuito puede calcularse como el producto entre la tensión en sus terminales y la corriente que circula por él, es decir

$$P = V \cdot I.$$

En el caso en que el dispositivo es un resistor de valor **R** , entonces la potencia vale

$$P = (R \cdot I) \cdot I = R \cdot I^2,$$

o también

$$P = V \cdot \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}.$$

Vemos que la potencia está relacionada siempre con el cuadrado de la corriente o de la tensión, es decir con el cuadrado de la señal (el valor de **R** o de **$1/R$** es un simple factor de proporcionalidad). A modo de ejemplo, consideremos un parlante de **8Ω** al cual se le aplica una tensión de **20 V** . Entonces la potencia eléctrica entregada vale

$$P = \frac{20 \times 20}{8} = 50 \text{ W}.$$

También podría interesarnos calcular la tensión necesaria para lograr cierta potencia. Para ello, de la fórmula de la potencia, despejamos **V^2** :

$$V^2 = P \cdot R,$$

y de allí,

$$V = \sqrt{P \cdot R} .$$

Supongamos, por ejemplo, que queremos suministrar a un parlante de 4Ω una potencia de 200 W . Entonces debemos aplicarle una tensión

$$V = \sqrt{200 \cdot 4} = \sqrt{800} = 28,3 \text{ V} .$$

7.7. Divisor de tensión

En la **Figura 7.2** vimos un circuito simple formado por una fuente de tensión y una resistencia. Hay muchas situaciones, particularmente las que involucran fuentes reales (ver la próxima sección), en las que deben considerarse fuentes con dos resistencias, en una configuración circuital como la ilustrada en la **Figura 7.4**.

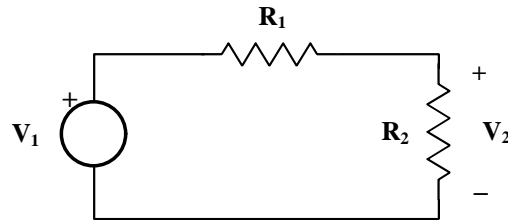


Figura 7.4. Estructura de un divisor de tensión

En esos casos, muchas veces es necesario determinar cuál es la tensión real aplicada en la resistencia R_2 . Dicha tensión se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$V_2 = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} .$$

Dado que R_2 es siempre menor que $R_1 + R_2$, la tensión aplicada en dicha resistencia no es V_1 sino un valor menor. Por esa razón, este tipo de circuito se denomina **divisor de tensión**.

Tomemos por ejemplo el caso en que el parlante de 4Ω del ejemplo anterior es alimentado con la fuente de $28,3 \text{ V}$, pero a través de un cable demasiado largo y delgado, cuya resistencia es de 1Ω (para un cable, este valor es demasiado alto; corresponde a una longitud de 29 m de cable de cobre de $0,5 \text{ mm}^2$ de sección). Entonces, aplicando la fórmula anterior, la tensión aplicada al parlante es

$$V_2 = 28,3 \frac{4}{1 + 4} = 22,6 \text{ V} ,$$

es decir que a causa de un cable inapropiado, la tensión en el parlante será bastante menor que la calculada.

Ahora bien: ¿hay alguna forma de obtener sobre el parlante *toda* la tensión de la fuente? Si revisamos la fórmula del divisor de tensión, vemos que para que ello se cumpla, debería ser

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1 ,$$

lo cual sólo se puede cumplir si $R_1 = 0$. Sin embargo, si R_2 es *mucho más grande* que R_1 la igualdad anterior se cumple *aproximadamente*:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cong 1 .$$

Esto significa que si R_2 es mucho mayor que R_1 , la tensión de la fuente se aprovecha casi totalmente. Por ejemplo, supongamos que en el ejemplo del parlante de 4Ω se utilizan cables de 2 mm^2 de sección y 10 m de longitud, cuya resistencia es de $0,09 \Omega$ en lugar de 1Ω . Entonces

$$V_2 = 28,3 \frac{4}{0,09 + 4} = 27,6 \text{ V} ,$$

tensión mucho más cercana al valor ideal. Este ejemplo muestra la importancia de una adecuada elección de los cables.

7.8. Fuente de tensión real

Las fuentes de tensión reales, ya sean de alimentación o de señal, siempre están acompañadas por una resistencia en serie, denominada **resistencia interna** (Figura 7.5a). Al conectar a una fuente real una resistencia externa, denominada **resistencia de carga**, o simplemente **carga**, de acuerdo a lo que hemos visto se forma un divisor de tensión (Figura 7.5b), y por lo tanto la tensión efectiva sobre dicha resistencia es menor que el valor original de la fuente.

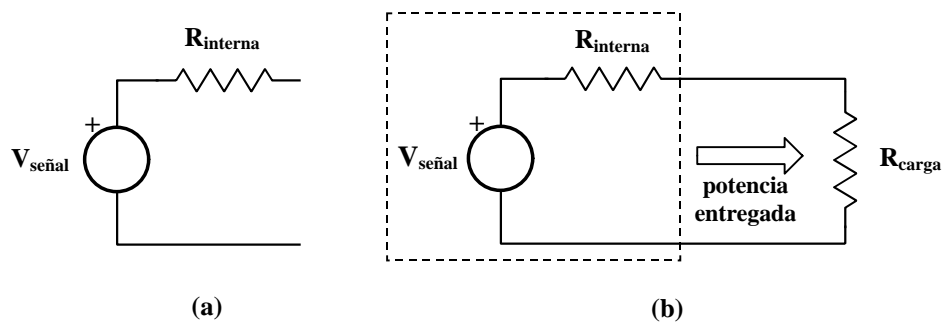


Figura 7.5. (a) Modelo de una fuente de señal con su resistencia interna (b) Una fuente de señal con su resistencia interna, que alimenta a una resistencia de carga.

En sistemas de sonido existen multitud de conexiones del tipo *fuentes-carga*. Algunas de ellas se detallan en la **Tabla 7.1**. En general se toma la precaución de que la resistencia de carga sea mucho mayor que la resistencia interna de la fuente:

$$R_{\text{carga}} \gg R_{\text{interna}} ,$$

de modo que la tensión efectiva sobre la carga se aproxime lo más posible a la tensión de la fuente. Esto se debe a que en la gran mayoría de los sistemas que se utilizan en audio las señales son de tensión (una excepción importante la constituyen las señales **MIDI**, que son señales de corriente) y siempre conviene mantener la señal lo más alta posible, a fin de lograr una relación señal/ruido elevada.

Tabla 7.1. Ejemplos de pares fuente-carga típicos de los sistemas de sonido.

| Fuente | Carga |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Micrófono | Entrada de micrófono de consola |
| Salida de línea de consola | Entrada de amplificador de potencia |
| Salida de amplificador de potencia | Altavoces o cajas acústicas |
| Salida de sintetizador | Entrada de línea de consola |
| Salida analógica de DAT | Entrada de línea de consola |
| Salida de línea de consola | Entrada de compresor - limitador |
| Salida de compresor – limitador | Entrada de amplificador de potencia |
| Salida de línea de consola | Entrada de ecualizador |
| Salida de ecualizador | Entrada de amplificador de potencia |
| Salida auxiliar de consola | Entrada de procesador de efectos |
| Salida de procesador de efectos | Retorno auxiliar de consola |
| Envío de inserción de consola | Entrada de procesador de efectos |
| Salida de procesador de efectos | Retorno de inserción de consola |

7.9. Adaptación de carga

Una pregunta frecuente es cuánta potencia es capaz de entregar un amplificador de audio. Esta pregunta tiene dos posibles interpretaciones. La primera, cuánta potencia estaría, idealmente, en condiciones de entregar. La segunda, la potencia que es *seguro* para su propia integridad que entregue.

La primera respuesta es que la máxima potencia que puede entregar una fuente se obtiene cuando se cumple la condición de **adaptación**, es decir

$$R_{\text{carga}} = R_{\text{interna}} .$$

Calculemos dicho valor para el amplificador que veníamos analizando, cuya tensión de salida es **28,3 V**, y cuya resistencia interna puede valer, típicamente, **0,02 Ω** (los amplificadores suelen tener muy baja resistencia de salida). Para ello, *carguémoslo* con una

resistencia también de **0,02 Ω**. Obsérvese que este valor es mucho menor que el valor de **4 Ω** para el que está realmente destinado este amplificador. El resultado es que como las dos resistencias son iguales, la tensión es *la mitad*:

$$V_2 = 28,3 \frac{0,02}{0,02 + 0,02} = 14,1 \text{ V} .$$

Con este valor, podemos calcular la potencia entregada a esa carga:

$$P = \frac{14,1 \times 14,1}{0,02} = 10.000 \text{ W} .$$

¡El resultado es inconcebiblemente grande! El problema es que no tuvimos en cuenta que el amplificador, para poder entregar **10.000W** tendría que disipar casi la misma potencia en forma de calor, lo cual equivale a unas **8** estufas a cuarzo generando calor. Como no es posible en un tamaño reducido y sin refrigeración forzada disipar tal cantidad de calor, pueden ocurrir dos cosas: 1) si el amplificador tiene protección, actúa ésta, limitando la potencia a algo más de los **200 W** para los cuales está previsto, ó 2) si el amplificador no tiene protección, se destruye.

En audio es raro trabajar con la condición de adaptación, ya que por lo que se dijo antes, es preferible trabajar con máxima tensión que con máxima potencia. No sucede lo mismo en radiofrecuencia, por ejemplo en señales de **FM** o de **TV**, dado que las señales recibidas en la antena son muy débiles y deben ser aprovechadas al máximo.

7.10. Resistores en serie y en paralelo

Hay varias situaciones en las que es necesario interconectar resistores. Supongamos que disponemos de **4** altavoces de **100 W** y **4 Ω**. Nos preguntamos cuál es la mejor manera de conectarlos para aprovechar al máximo un amplificador que entrega una potencia de **350 W** sobre una carga de **4 Ω**. La intuición sugiere que debería ser posible, de alguna forma, conectarlos de modo que cada uno de ellos reciba la cuarta parte de la potencia del amplificador, es decir **350/4 W = 87,5 W**, con lo cual el amplificador estaría dando toda su potencia, y los altavoces estarían recibiendo una potencia bastante cercana a la máxima que toleran.

El ejemplo anterior muestra un caso típico de interconexión de componentes. Postergaremos la solución al problema planteado para introducirnos en los conceptos más básicos de las conexiones en serie y en paralelo.

Dos resistores están conectados en serie cuando comparten un terminal. En este caso, por ambos resistores circula la misma corriente. La conexión en serie de dos resistencias **R₁** y **R₂** equivale a una resistencia igual a la suma de ambas (**Figura 7.6**):

$$R_{\text{serie}} = R_1 + R_2 .$$

Por ejemplo, si disponemos de dos altavoces de **4 Ω**, podemos conectarlos en serie para obtener un sistema de **8 Ω**.

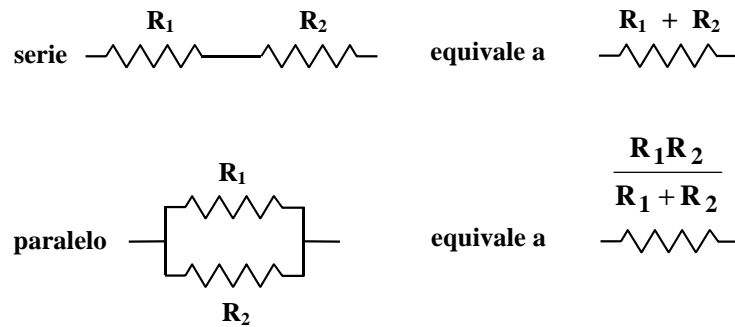


Figura 7.6. Conexiones en serie y en paralelo de dos resistencias, con sus valores de resistencia equivalente.

Dos resistores están conectados en paralelo cuando comparten *los dos* terminales, lo cual implica que están sometidos a la misma tensión (**Figura 7.6**). La resistencia equivalente de dos resistencias conectadas en paralelo es

$$R_{\text{paralelo}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Si conectamos en paralelo dos parlantes de $8 \, \Omega$, por ejemplo, se obtiene un sistema cuya resistencia equivalente es de

$$R_{\text{paralelo}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \, \Omega.$$

Cuando se conectan resistencias en serie, el resultado es siempre mayor que las resistencias originales. En cambio, cuando se conectan resistencias en paralelo, el resultado es menor que cualquiera de los componentes. Si las resistencias interconectadas son *iguales*, en el caso serie se obtiene una resistencia doble, y en el caso paralelo, una resistencia mitad.

Veamos ahora cómo se resuelve el problema planteado al principio. Existen dos posibles soluciones. En la primera se conectan de a dos altavoces en paralelo, con lo cual la resistencia obtenida es de $2 \, \Omega$. Luego se conectan dos de estos grupos en serie, obteniéndose nuevamente $4 \, \Omega$ (**Figura 7.7**). La segunda solución es similar, conectando

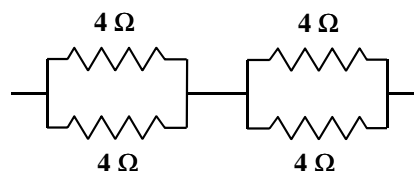


Figura 7.7. Conexión de cuatro altavoces en paralelo y en serie para obtener un sistema de potencia 4 veces mayor.

primero en serie y después en paralelo. En ambas soluciones, cada parlante está sometido a la mitad de la tensión total, lo cual implica que se le entrega la cuarta parte de la potencia. El conjunto aprovecha, por lo tanto la totalidad de los **350 W** que era capaz de entregar el amplificador.

7.11. Impedancia

Muchos componentes eléctricos se comportan como si su resistencia variara con la frecuencia de la señal aplicada. En otras palabras, sigue valiendo una relación similar a la Ley de Ohm, pero el valor de la resistencia depende de la frecuencia. En estos casos estamos en presencia de una **impedancia**, simbolizada con **Z**.

7.12. Defasaje

Las impedancias difieren de las resistencias aún en otro aspecto, que es el de producir un **defasaje** entre la tensión **V** y la corriente **I**, es decir que los picos de la senoide que representa a la tensión están desplazados en el tiempo respecto a los picos de la senoide que representa a la corriente. El concepto de defasaje se ilustra en la **Figura 7.8**.

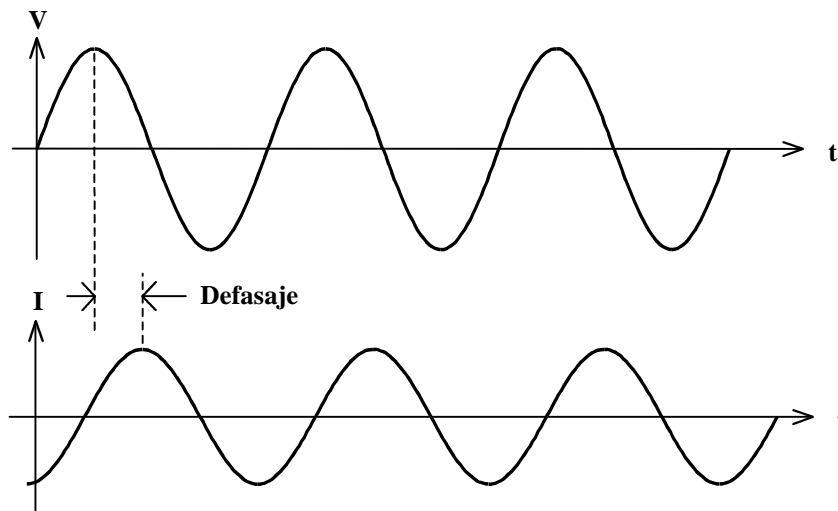


Figura 7.8. Concepto de **defasaje**. La corriente **I** que circula por una **impedancia** está desfasada con respecto a la tensión **V** entre sus terminales. En este caso la corriente está **atrasada** respecto a la tensión, porque su pico se alcanza algún tiempo después que el de la tensión.

En el caso en que la resistencia interna de la fuente de señal varíe con la frecuencia, es decir, que se trate de una impedancia, entonces se habla de **adaptación de impedancias**, lo cual sucede cuando las magnitudes de las impedancias son iguales y los defasajes, *opuestos*.

7.13. Valor eficaz (RMS)

Para una tensión continua (constante en el tiempo), la ecuación de la potencia sobre una resistencia era

$$P = \frac{V^2}{R}.$$

Si quisiéramos aplicar la misma fórmula en el caso de una tensión alterna (variable en el tiempo), nos encontraríamos con que la potencia varía en el tiempo, ya que V lo hace. Esto no es demasiado significativo, ya que con respecto a la potencia siempre interesa más su promedio:

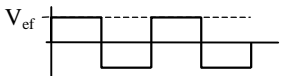
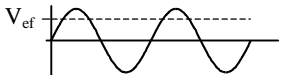
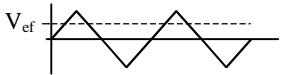


$$P_{\text{promedio}} = \text{promedio} \left(\frac{V^2}{R} \right).$$

Es interesante encontrar un valor de tensión continua *equivalente*, es decir que entregue a la resistencia la misma potencia promedio que la tensión alterna. Dicho valor se denomina **valor eficaz** de la tensión, y se abrevia V_{ef} (en inglés, **root mean square, RMS**). Con esta definición resulta

$$P_{\text{promedio}} = \frac{V_{\text{ef}}^2}{R}.$$

Lamentablemente, no hay una relación directa entre el valor eficaz y el valor de pico o amplitud de la señal. La relación depende enormemente de la forma de onda, como se muestra en la **Tabla 7.2**. Un caso bastante conocido es el de la tensión de la línea domiciliaria, cuyo *valor eficaz* es de **220 V**. Como se trata de una onda senoidal, su valor de pico es en realidad **311 V**. La razón por la cual el valor eficaz es menor que eso es que durante gran parte del ciclo toma valores mucho menores que **311 V**.

Tabla 7.2. Relación entre el valor eficaz y el valor de pico de varias formas de onda.

| Forma de onda | Valor eficaz | Forma de onda |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Cuadrada | Valor de pico |  |
| Senoidal | $0,707 \times \text{Valor de pico}$ |  |
| Triangular | $0,557 \times \text{Valor de pico}$ |  |
| Pulsos de 1 ms cada 10 ms | $0,316 \times \text{Valor de pico}$ |  |
| Pulsos de 0,1 ms cada 10 ms | $0,100 \times \text{Valor de pico}$ |  |

Capítulo 8

Micrófonos

8.1. Introducción

El primer elemento de la cadena de audio es el **micrófono**, un *transductor* capaz de convertir señal sonora en señal eléctrica. Con mayor precisión, convierte presión sonora en tensión. Estudiaremos algunos parámetros y especificaciones importantes, así como las estructuras constructivas de los micrófonos dinámicos y capacitivos.

8.2. Sensibilidad

A los fines de conectar un micrófono con el resto de los componentes, es importante conocer cuánta tensión produce ante una dada presión sonora. En el capítulo 6 vimos que ante determinada amplitud de la presión, en los terminales del micrófono se producía cierto valor de tensión. Dijimos en ese momento que no tenía sentido afirmar, por ejemplo, que “la presión es mayor que la tensión”. Pero sí tiene sentido determinar la relación que hay entre la tensión y la presión. Esa relación se denomina **sensibilidad** del micrófono. En la **Figura 8.1** se muestran las formas de onda de la presión y la tensión.

La **sensibilidad** de un micrófono puede definirse como *el cociente entre la tensión producida y la presión que le da origen*, es decir

$$S = \frac{v}{p} .$$

Recordemos que la unidad que se utiliza internacionalmente para medir la presión es el **pascal**, abreviado **Pa** (que equivale aproximadamente a **10** millonésimas, es decir **1** cienmilésima, de la presión atmosférica), de modo que la sensibilidad de un micrófono se expresa en volts por pascal (**V/Pa**). Otra manera muy difundida de expresar la sensibilidad es en **dB** referidos a **1 V/Pa**. En ese caso, llamando **sensibilidad de referencia**, S_{ref} , a **1 V/Pa**, se obtiene con esta fórmula:

$$S|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{S}{S_{\text{ref}}} .$$

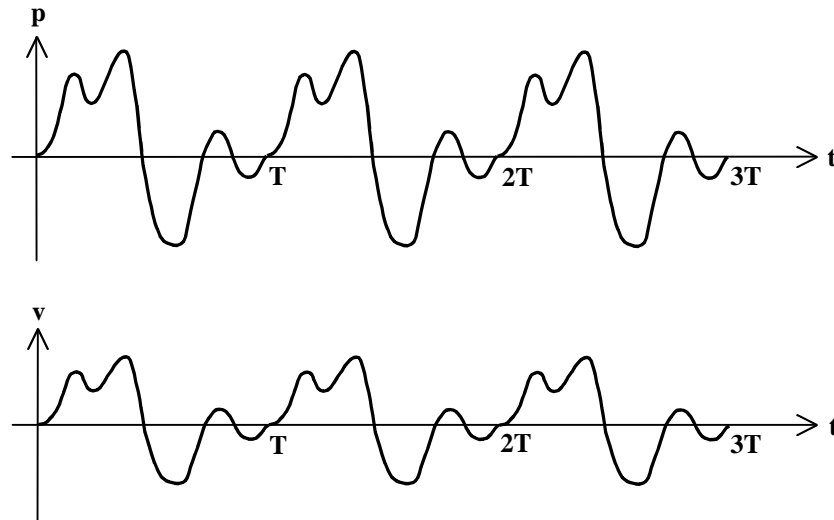


Figura 8.1. Presión sonora y su análoga, la tensión generada por un micrófono.

Por ejemplo, un micrófono que ante una presión sonora de **0,2 Pa** desarrolla una tensión de **1 mV**, tendrá una sensibilidad

$$S = \frac{0,001 \text{ V}}{0,2 \text{ Pa}} = 0,005 \frac{\text{V}}{\text{Pa}} ,$$

que en **dB** será

$$S|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{0,005}{1} = -46 \text{ dB} .$$

El signo (–) es porque la sensibilidad es menor que la de referencia, es decir debe calcularse el logaritmo de un número menor que **1**, que es negativo.

NOTA: A veces (especialmente en especificaciones de micrófonos que llevan muchos años en el mercado), en lugar de utilizar como referencia **1 V/Pa** se utiliza **1 V/μbar**. El **μbar** (**microbar**) es una unidad de presión igual a **0,1 Pa**, por lo cual la sensibilidad referida a **1 V/μbar** resulta **20 dB** menor (más negativa) que al referirla a **1 V/Pa**. Así, en el ejemplo anterior tendríamos $S|_{\text{dB ref 1 V/μbar}} = -66 \text{ dB}$.

Como segundo ejemplo, nos preguntamos qué tensión proporcionará este mismo micrófono ante un nivel de presión sonora de **94 dB**. Sabemos que

$$94 \text{ dB} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} ,$$

donde P_{ref} es la presión de referencia, que expresada en **micropascales**, **μPa** (es decir $1/1.000.000$ de **pascal**), es **20 μPa**. Nos interesa obtener **P**. Para ello, primero escribimos

$$\log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} = \frac{94}{20} = 4,7 .$$

De allí, aplicando la operación inversa del logaritmo, que consiste en elevar **10** a una potencia igual al logaritmo, se tiene

$$\frac{P}{P_{\text{ref}}} = 10^{4,7} = 50119 .$$

Entonces

$$P = 50119 \times P_{\text{ref}} = 50119 \times 20 \mu\text{Pa} \cong 1 \text{ Pa} .$$

El valor de **94 dB** es un valor bastante utilizado precisamente porque corresponde a una presión sonora de **1 Pa**. Con este valor, conociendo la sensibilidad, se obtiene la tensión:

$$V = S \times P = 0,005 \times 1 = 0,005 \text{ V} .$$

La señal de tensión de los micrófonos es, normalmente, muy pequeña (salvo para niveles de presión sonora muy altos), lo cual implica que está muy expuesta a los ruidos eléctricos. Por esta razón *es preciso utilizar cables y conexiones de excelente calidad para los micrófonos*, así como **preamplificadores** de bajo ruido.

Para simplificar el cálculo de la presión, la **Tabla 8.1**, reproducida del capítulo 1, da la equivalencia entre la presión y el nivel de presión sonora para varios valores.

Tabla 8.1. Conversión entre el valor de la presión y el nivel de presión sonora.

| NPS (dB) | P (Pa) |
|----------|----------|
| 120 | 20,0 |
| 110 | 6,3 |
| 105 | 3,6 |
| 100 | 2,0 |
| 95 | 1,1 |
| 90 | 0,63 |
| 85 | 0,36 |
| 80 | 0,20 |
| 75 | 0,11 |
| 70 | 0,063 |
| 60 | 0,020 |
| 50 | 0,0063 |
| 40 | 0,0020 |
| 30 | 0,00063 |
| 20 | 0,00020 |
| 10 | 0,000063 |
| 0 | 0,000020 |

8.3. Respuesta en frecuencia

Una característica importante de cualquier componente de un sistema que procesa señal, en particular de los micrófonos, es su **respuesta en frecuencia**. La **respuesta en frecuencia** de un micrófono es una gráfica que indica la sensibilidad en **dB** en función de la frecuencia. El aspecto típico de la respuesta en frecuencia de un micrófono se muestra en la **Figura 8.2**. Se observa que la respuesta *no es plana*, vale decir que no es

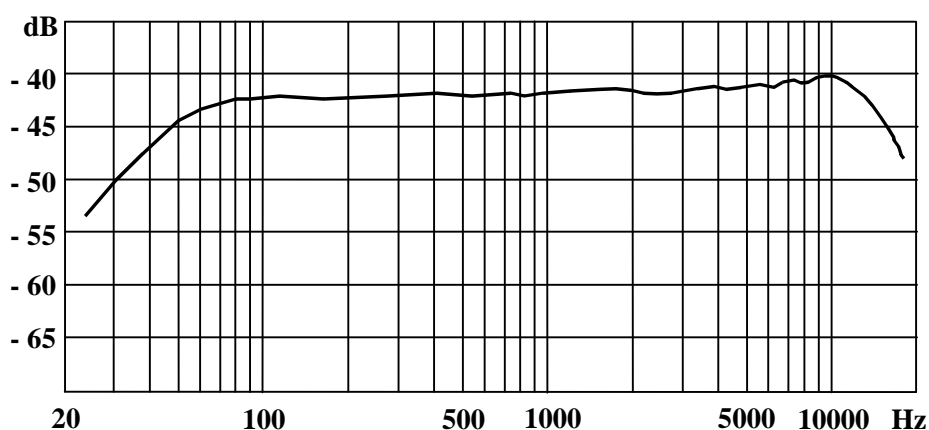


Figura 8.2. Curva de la respuesta en frecuencia de un micrófono típico.

constante con la frecuencia. Esto significa que ante dos sonidos de diferente frecuencia, por ejemplo **30 Hz** y **10 kHz**, pero *idéntica amplitud*, el micrófono generará *tensiones diferentes*. En este ejemplo, la sensibilidad para **30 Hz** es de **-50 dB**, mientras que para **10 kHz** es de **-40 dB**, lo cual hace una diferencia de **10 dB**. Esto implica que la tensión generada por el micrófono a **10 kHz** será (a cálculo hecho) más de **3** veces mayor que la generada a **30 Hz**.

También se nota en la respuesta cierta *irregularidad* (fluctuaciones) en alta frecuencia. Esto es una consecuencia directa de que la longitud de onda a esas frecuencias ya es comparable al tamaño del micrófono (por ejemplo a **10 kHz** la longitud de onda es de **3,45 cm**), lo cual hace que el propio micrófono interfiera en el campo sonoro causando el equivalente de “sombras” acústicas sobre sí mismo, que dependen mucho de la longitud de onda.

Finalmente, se aprecia que existe una banda de frecuencias, que en el ejemplo abarca desde alrededor de **50 Hz** hasta unos **15.000 Hz**, en que la respuesta es bastante plana. Los extremos se denominan respectivamente **frecuencia inferior** y **frecuencia superior**, definidas como aquellas frecuencias por debajo de la cual y por encima de la cual la sensibilidad cae **3 dB** (o en algunas especificaciones, **1 dB**) por debajo del valor a **1 kHz**. Cuando se desea dar una idea rápida de la respuesta en frecuencia de un micrófono, se especifican las frecuencias inferior y superior, lo cual en general es suficiente para decidir si un micrófono es o no adecuado para determinada aplicación.

8.4. Direccionalidad

Otra característica importante en los micrófonos es su direccionalidad. Debido a su construcción, y a los principios de la Acústica, la sensibilidad de un micrófono varía según el ángulo respecto a su eje desde donde viene el sonido. En la **Figura 8.3** se ilustra este hecho.

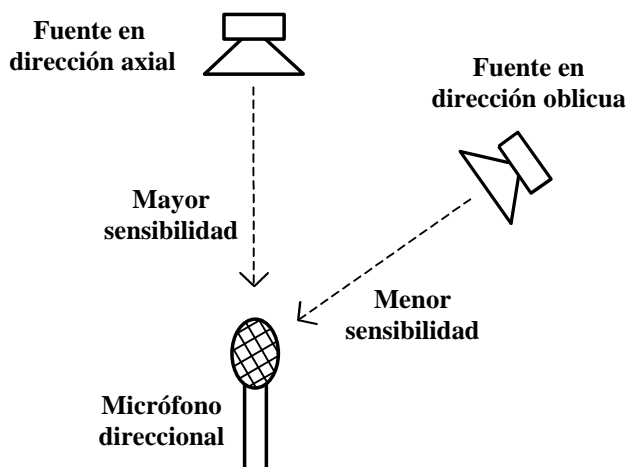


Figura 8.3. Efecto sobre la sensibilidad de un micrófono direccional (por ejemplo cardioide) de las diversas orientaciones de la fuente.

Se pueden indicar las características direccionales de un micrófono por medio de un **diagrama direccional** o **diagrama polar** como el que se muestra en la **Figura 8.4**.

En este tipo de diagrama se indica cómo varía de la sensibilidad del micrófono con el ángulo entre la fuente sonora y el **eje principal**, es decir aquella dirección de máxima sensibilidad. En el ejemplo de la **Figura 8.4**, por ejemplo, a los **90°** la sensibilidad es unos **6 dB** menor que en el eje principal.

El **patrón direccional** (forma del diagrama polar) de un micrófono varía con la frecuencia, debido a que para altas frecuencias, la longitud de onda es pequeña, comparable al tamaño del propio micrófono, que proyecta sobre sí mismo “sombras” acústicas que dependen de la orientación y de la longitud de onda (y por lo tanto de la frecuencia). En la **Figura 8.5** se repite el diagrama polar de la **Figura 8.4**, incluyendo otras dos frecuencias.

Se han popularizado varios **patrones direccionales**, cada uno destinado a un tipo dado de aplicaciones. El patrón **omnidireccional**, cuyo diagrama polar se ilustra en la **Figura 8.6**, tiene la misma sensibilidad en todas las direcciones, por lo cual no requiere ser enfocado hacia la fuente. Este tipo de micrófono se utiliza precisamente cuando se requiere captar sonido ambiental, sin importar su procedencia. Los micrófonos omnidireccionales, en general tienen menor variación del patrón polar con la frecuencia, razón por la cual no “colorean” el sonido proveniente de direcciones diferentes del eje principal, es decir que no presentan picos importantes en la respuesta en frecuencia.

En la **Figura 8.4** se muestra un patrón **cardioide**. Estos micrófonos son bastante direccionales, reduciéndose muchísimo su sensibilidad en la dirección opuesta a la principal (**180°**). Debido a su característica direccional, los micrófonos cardioides tienen la

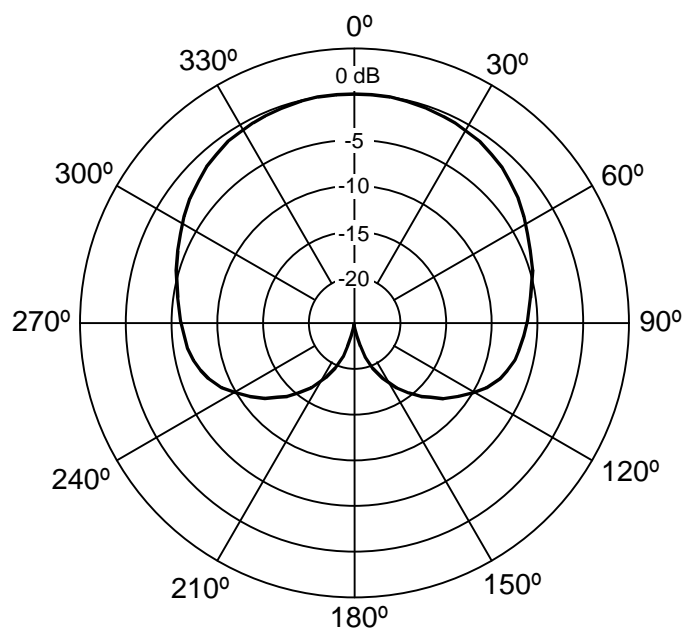


Figura 8.4. Un ejemplo de **diagrama direccional** o **diagrama polar** de micrófono. En él se indica cómo varía la sensibilidad con la dirección de procedencia del sonido, respecto a la sensibilidad máxima (**0 dB**), que corresponde a la dirección principal del micrófono. Este ejemplo corresponde a un micrófono **cardioide**.

particularidad de que cuando la fuente se aproxima mucho al micrófono (**3 ó 4 cm**), la respuesta en frecuencia cambia, aumentando la sensibilidad en las bajas frecuencias. Esto se denomina **efecto de proximidad**, y es utilizado por los vocalistas para engrosar el tono de su voz.

Una de las principales aplicaciones del patrón cardioide (también llamado **direccional** o **unidireccional**) es la de tomar sonido de una fuente determinada cuya posición es bastante estable, como por ejemplo un instrumento musical, rechazando lo más posible los sonidos provenientes de otras fuentes. Así, la captación del ruido ambiente se reducirá considerablemente, ya que el ruido es *multidireccional*, es decir que proviene de todas las direcciones. Un micrófono omnidireccional, lo captará en su totalidad, mientras que uno cardioide tomará sólo una parte de dicho ruido.

Dado que en estos micrófonos el patrón polar *cambia bastante con la frecuencia* (**Figura 8.5**), al captar sonidos laterales, estos resultarán “filtrados”, acentuándose algunas frecuencias por sobre otras, lo cual implicará que dichos sonidos laterales estarán bastante distorsionados, o “coloreados”. Los micrófonos cardioides de mejor calidad están diseñados para evitar lo más posible estas fluctuaciones con la frecuencia de sus patrones polares.

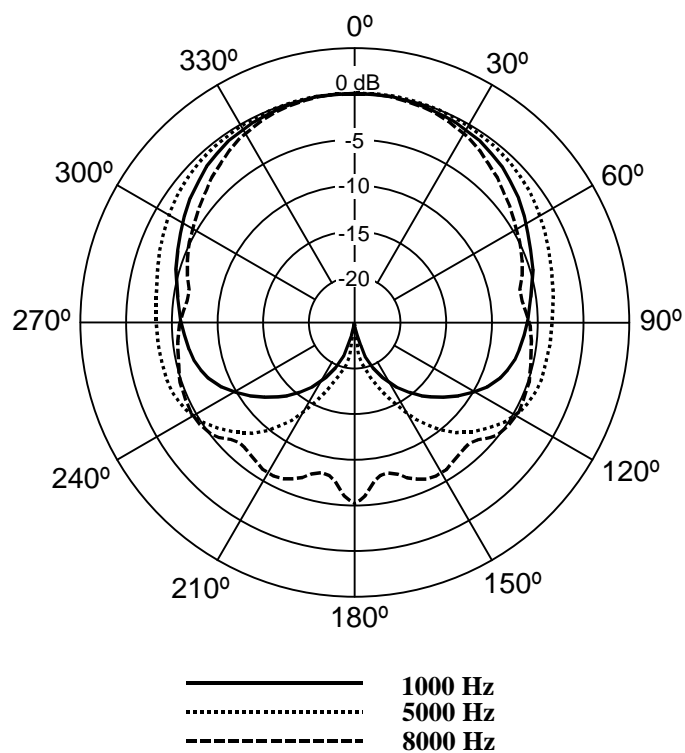


Figura 8.5. Variación con la frecuencia del diagrama polar del micrófono cardioide de la **Figura 8.4**. Las diferentes curvas responden al diferente patrón de “sombras” acústicas para cada longitud de onda.

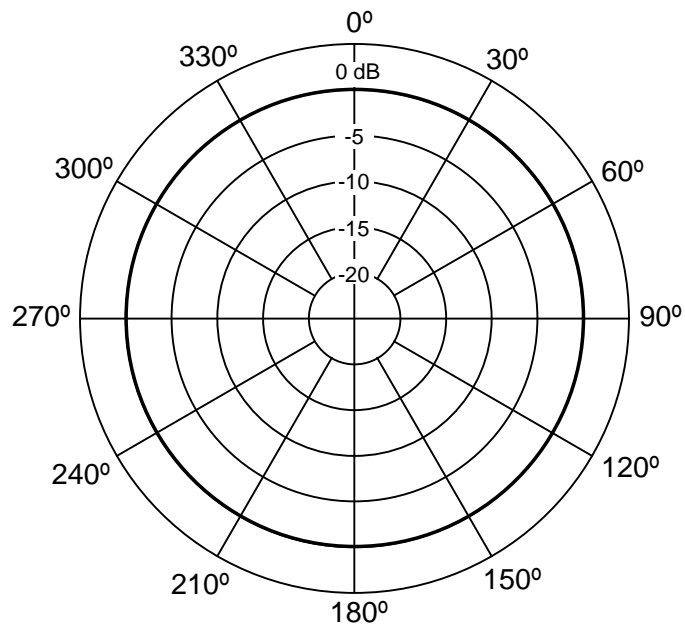


Figura 8.6. Patrón polar omnidireccional

Otro patrón polar difundido es la **figura de ocho**, llamada así por tener la forma de un 8 (**Figura 8.7**). Este tipo de micrófono podría denominarse también **bidireccional**, ya que es fuertemente direccional en las dos direcciones paralelas al eje principal. En la dirección perpendicular a este eje, por el contrario, la sensibilidad es nula, por lo que permite eliminar casi por completo la captación de ruidos provenientes de dichas direcciones.

Como los cardioide, exhiben también el efecto de proximidad, aumentando la sensibilidad a los graves cuando la fuente se acerca mucho al micrófono.

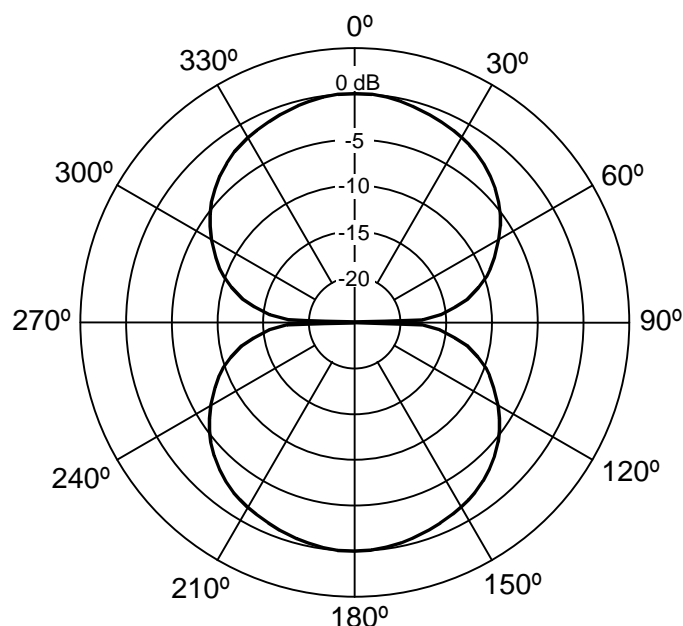


Figura 8.7. Patrón polar **figura de ocho**.

Dado que estos micrófonos se caracterizan por rechazar las señales acústicas provenientes de los lados de una fuente, son útiles para minimizar la captación de señal proveniente de un músico o cantante que se encuentra al lado del que se pretende tomar con el micrófono. También se utilizan para grabaciones estereofónicas (cuando se pretende crear la imagen sonora estéreo directamente desde la grabación y no por mezcla posterior), colocando para ello dos micrófonos a **90°** entre sí. Esta configuración se denomina **X-Y**. De esta forma, la señal captada por cada micrófono será rechazada por el otro, contribuyendo a crear una mayor independencia o separación de los canales.

Además de los tipos principales descritos, existen en el mercado micrófonos con otros patrones polares, como por ejemplo el **subcardioide** (menos direccional que el cardioide), **hipercardioide** (similar al cardioide pero con un ángulo de captación todavía menor, a costa de la existencia de un pequeño lóbulo en la dirección opuesta a la principal), o el **lobular** (muy direccional, con un lóbulo que abarca ángulos de captación tan cerrados como **90°**). La aplicación de estos micrófonos es bastante específica, y conviene en cada caso aplicarlos según las indicaciones del fabricante.

En general, los micrófonos direccionales (cardioides, figura de ocho, hipercardioides, etc.) tienen peor respuesta en frecuencia que los omnidireccionales. Esto se

debe a que según se mostraba en la **Figura 8.5**, el patrón polar de los direccionales varía con la frecuencia, y por lo tanto para direcciones diferentes de la principal la respuesta en frecuencia tiene fluctuaciones más importantes que para la dirección principal. El resultado de esto es que el sonido proveniente de los costados no sólo estará más atenuado que el que proviene del frente (precisamente por la direccionalidad) sino que se verá más afectado en frecuencia, es decir estará “coloreado” (por ejemplo, tendrá tendencia a enfatizar los graves, u otras frecuencias específicas, produciendo respectivamente un sonido más sordo o algo metálico), como se muestra en el ejemplo de la **Figura 8.8**. En los mejores micrófonos, este detalle es tenido en cuenta, de modo que el patrón polar resulte más uniforme con la frecuencia, con lo cual el sonido proveniente de los costados sólo sonará más débil, y no además distorsionado.

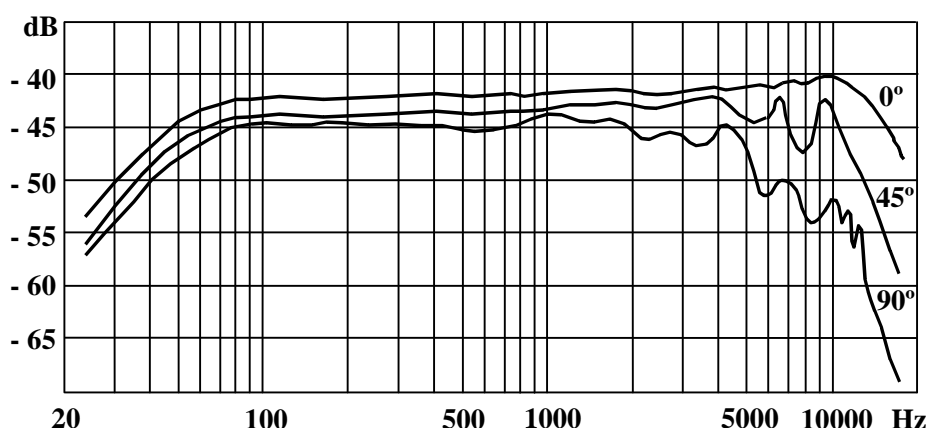


Figura 8.8. Respuesta en frecuencia de un micrófono direccional típico para diferentes ángulos respecto a la dirección principal: **0°**, **45°** y **90°**. Según se puede apreciar, las irregularidades en alta frecuencia se hacen mayores, introduciendo una mayor distorsión de frecuencia en la señal.

8.5. Micrófonos dinámicos

Existen varios mecanismos de conversión de energía sonora en energía eléctrica utilizados en los micrófonos. Los más habituales corresponden a los micrófonos dinámicos y los micrófonos capacitivos.

Los **micrófonos dinámicos**, también denominados **de bobina móvil**, están constituidos por una bobina con varias espiras de alambre de cobre que se desplaza en forma oscilante a lo largo de un núcleo cilíndrico de imán. La bobina es impulsada por un diafragma que vibra en concordancia con las variaciones de presión de una onda sonora (**Figura 8.9**). De la física se sabe que cuando una bobina se mueve dentro de un campo magnético (en este caso el del imán) se genera en sus terminales una tensión eléctrica denominada **fuerza electromotriz**, y éste es precisamente el principio de operación de los micrófonos dinámicos (véase el capítulo 23 para mayores detalles).

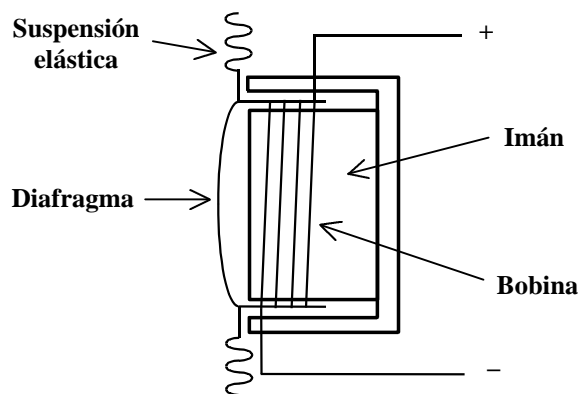


Figura 8.9. Diagrama esquemático constructivo de un micrófono **dinámico** o de **bobina móvil**. Las variaciones de presión causadas por una onda sonora imprimen movimiento al diafragma, el cual arrastra consigo a la bobina. El movimiento de la bobina respecto al imán genera una tensión eléctrica entre los terminales + y - del micrófono.

Los micrófonos dinámicos generan tensiones bastante pequeñas, del orden de **1 a 4 mV/Pa** (milivolt por pascal). Para lograr mayores sensibilidades sería necesario que la bobina tuviera muchas espiras, lo cual implicaría aumentar su masa. Esto repercutiría negativamente en la respuesta en alta frecuencia, dado que a mayor masa, mayor inercia, es decir mayor dificultad para que una onda de alta frecuencia ponga en movimiento al conjunto diafragma - bobina (sería equivalente a intentar sacudir rápidamente un objeto muy pesado). De todas maneras, aún con pocas espiras (y por lo tanto baja sensibilidad) el comportamiento en alta frecuencia está limitado en general a unos **16 kHz**. Actualmente, el uso de potentes imanes de **neodimio** permite reducir la cantidad de espiras, permitiendo en algunos modelos extender la frecuencia a la banda completa de audio.

Otra desventaja de los micrófonos dinámicos es que el denominado **ruido de manipulación** (es decir el ruido ocasionado al mover o tocar el micrófono) es importante, debido a dos factores: la gran inercia del conjunto diafragma - bobina y el agregado de resonancias artificiales para mejorar la respuesta en las altas y bajas frecuencias. El primer factor (inercia de la bobina) implica que al mover el micrófono la bobina tiende a permanecer inmóvil, creándose un movimiento relativo entre la bobina y el imán (ya que éste se ha desplazado junto con el cuerpo del micrófono) equivalente a que el diafragma se moviera y el imán estuviera fijo. Se genera así una tensión similar a la que produciría un ruido acústico. Esta tensión indeseada se denomina **ruido eléctrico**. El segundo factor (agregado de resonancias) implica que el ruido que se produce al tocar el micrófono se vea amplificado, especialmente en baja frecuencia, generando también ruido eléctrico.

La ventaja principal de este tipo de micrófonos es su robustez y tolerancia a condiciones adversas de operación, como variaciones de temperatura o humedad, grandes niveles de presión sonora, golpes y sacudidas, etc., por lo cual son especialmente aptos para el sonido en vivo. Otra ventaja es que no requieren fuentes de alimentación propias para generar señal eléctrica en respuesta a un sonido.

8.6. Micrófonos capacitivos

Los **micrófonos capacitivos** (también denominados **de capacitor, de condensador, o electrostáticos**) se basan en la utilización de un campo eléctrico en lugar de un campo magnético. Están formados por un diafragma muy delgado (típicamente, 5 micrones de espesor) bañado en oro, y una placa posterior metálica que normalmente está perforada o ranurada (**Figura 8.10**). Ambos forman un **condensador** cuya capacidad C varía con la distancia entre sí, y esta distancia varía al vibrar el diafragma impulsado por las variaciones de presión de la onda sonora. La ecuación fundamental de un condensador es

$$V = \frac{q}{C}$$

donde V es la tensión en sus terminales, q es la carga eléctrica en sus terminales, y C es el valor de la capacidad asociada al condensador. Si de alguna manera se consigue cargar las placas del condensador con una carga fija q , al variar la capacidad C variará también la tensión V que se mide entre los terminales. Este es el principio físico de funcionamiento de los micrófonos capacitivos.

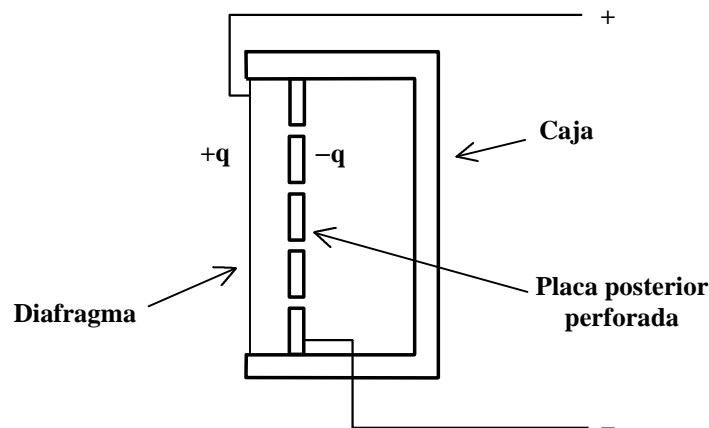


Figura 8.10. Diagrama esquemático constructivo de un **micrófono de condensador**. Las variaciones de presión causadas por una onda sonora imprimen movimiento al diafragma, y al variar consecuentemente la distancia entre éste y la placa posterior, varía también la **capacidad** del condensador formado por ambos. Si previamente se ha aplicado una carga eléctrica a ambas placas, la variación de capacidad implicará una variación de tensión eléctrica v entre los terminales $+$ y $-$ del micrófono.

La manera de cargar las placas del condensador es por medio de una **polarización** externa, lo cual se logra conectando el micrófono a una fuente de tensión constante a través de una resistencia, como se muestra en la **Figura 8.11**. Esta fuente puede ser o

bien una pila o batería incorporada al propio cuerpo del micrófono, o una fuente remota ubicada en la consola o en el preamplificador, denominada **fente fantasma (phantom power)**. Esta fuente puede tener un valor comprendido entre **1,5 V** y **48 V** según el modelo de micrófono.

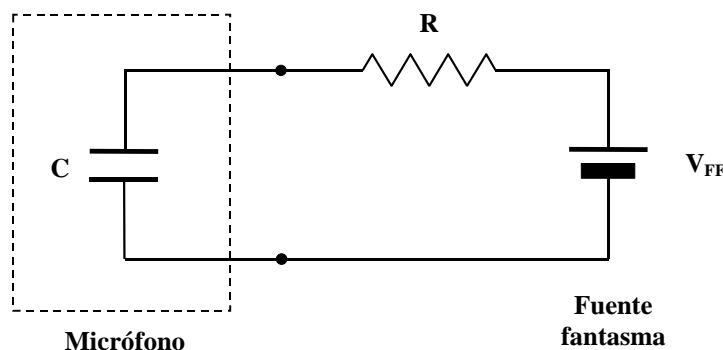


Figura 8.11. Polarización de un micrófono capacitivo mediante una fuente externa o **fente fantasma (phantom power)**. La fuente V_{FF} suministra la carga necesaria para que las variaciones de capacidad permitan obtener variaciones de tensión.

En la actualidad se encuentra muy difundido un tipo de micrófono a condensador **prepolarizado**, es decir con una polarización interna intrínseca, que en principio no requiere la utilización de una fuente fantasma. Son los denominados **electret**, y se caracterizan porque una de las placas contiene una película aislante especial en la cual se han introducido, durante la fabricación, cargas eléctricas que quedan atrapadas en la estructura interna sin posibilidad de escapar.

De todas maneras, todos los micrófonos capacitivos vienen con un amplificador interno que requiere algún tipo de alimentación. Esto se debe a que la impedancia interna (ver próximo párrafo) de un micrófono capacitivo básico es demasiado alta, por lo cual se utiliza un preamplificador sencillo (habitualmente formado por un transistor de efecto de campo) para reducir la impedancia (amplificador de corriente). Esto es necesario para minimizar la captación de ruidos en los cables largos.

8.7. Impedancia

La impedancia interna de un micrófono está vinculada con su modelo circuital o modelo eléctrico, que está constituido por una fuente de tensión y una impedancia, como se muestra en la **Figura 8.12**. Existen micrófonos de alta impedancia (superior a los **10.000 Ω** , es decir **10 k Ω**) y de baja impedancia (menor de **500 Ω**). En sonido profesional se utilizan casi exclusivamente los micrófonos de baja impedancia, porque son menos ruidosos, y ofrecen menos dificultades para el cableado, en especial cuando están involucradas grandes distancias (algunas decenas de metros), como suele suceder en el sonido en vivo. El nivel de la tensión de salida es, en general, muy pequeño, (del orden de algunos **μ V** hasta unos **100 mV**), especialmente en los micrófonos de baja impedan-

cia, razón por la cual se requiere utilizar **preamplificadores** para elevar la tensión hasta el nivel normalmente requerido por las mezcladoras (consolas) de audio. Dichos preamplificadores por lo común están incorporados en las consolas de mezcla, y aparecen en las entradas de micrófono. *No deben confundirse estos preamplificadores con los amplificadores de conversión de impedancia incluidos en los micrófonos capacitivos (tanto los no prepolarizados como los prepolarizados o electret).*

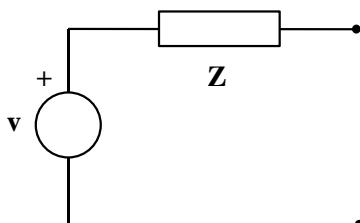


Figura 8.12. Modelo eléctrico de un micrófono, formado por una fuente de tensión v y una impedancia Z .

La impedancia de entrada de los preamplificadores debe ser mucho mayor que la del micrófono, para no ocasionar un efecto de divisor de tensión, lo cual redundaría en una disminución de la tensión efectiva en la entrada del preamplificador. El efecto de divisor de tensión se da siempre en conexiones como la indicada en la **Figura 8.13**. Resulta

$$V_{\text{amp}} = \frac{Z_{\text{entrada}}}{Z + Z_{\text{entrada}}} v ,$$

y por lo tanto cuanto más grande sea Z_{entrada} menor será la disminución de la tensión que recibe el preamplificador. En la práctica la impedancia de los micrófonos suele ser de unos $200 \, \Omega$ y la de las entradas de micrófono de alrededor de $1000 \, \Omega$.

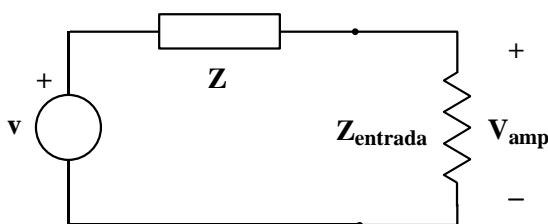


Figura 8.13. Modelo eléctrico de la conexión entre un micrófono y su preamplificador. El micrófono tiene una impedancia Z y el preamplificador tiene una impedancia de entrada Z_{entrada} .

8.8. Ruido

En los micrófonos hay dos mecanismos de producción de ruido. El más evidente es la captación del **ruido ambiental**, y obedece al mismo principio de conversión de energía sonora en energía eléctrica que tiene lugar para los sonidos útiles. La reducción de este ruido está ligada a la reducción del propio ruido ambiente, y al aprovechamiento del patrón direccional para reducir los ruidos que provienen de direcciones distintas de la de la señal útil (una voz o instrumento).

El otro mecanismo es el característico de cualquier componente de un circuito, es decir el **ruido eléctrico**. Es un ruido intrínseco del micrófono, y aparecería aún ubicándolo en una cámara totalmente insonorizada (silenciosa). Este ruido sólo puede reducirse (pero no eliminarse) diseñando el micrófono de modo de que posea muy baja impedancia (por ejemplo **100 Ω**), y además utilizando en su fabricación materiales de gran calidad y procesos de manufactura sumamente refinados. Es interesante saber que un micrófono de **100 Ω** tiene como mínimo un ruido eléctrico de **0,18 μV** , y que este ruido se duplica cada vez que la impedancia se cuadruplica. En la especificación de un micrófono sólo tiene sentido especificar el ruido eléctrico, ya que el otro depende del nivel de ruido acústico del ambiente en donde se usa el micrófono, y por lo tanto no es atribuible del micrófono.

Existen dos formas de especificar el ruido eléctrico. La primera consiste en asociarlo a un nivel de presión sonora equivalente, por ejemplo **17 dB**. En otras palabras, se asimila el ruido eléctrico, que corresponde a un valor pequeño de tensión, a la respuesta hipotética de un micrófono sin ruido propio ante un ruido ambiente del valor indicado. Esta especificación sugiere cuál es el mínimo nivel sonoro para el cual tendrá sentido utilizar este micrófono. Si se intentara captar con ese micrófono un sonido de menor nivel, el ruido propio del micrófono sería más intenso que el sonido a captar, con un serio deterioro de la calidad sonora, o hasta el franco enmascaramiento de la señal por el ruido. (*Obsérvese que el solo hecho de que un sonido sea menor que otro no necesariamente implica que sea enmascarado por aquél, aunque sí severamente degradado. Como regla general, un sonido debe estar en la misma banda de frecuencias y entre 15 y 20 dB por debajo de otro para resultar enmascarado.*)

La segunda forma de especificar el ruido de un micrófono, es a través del concepto de **relación señal/ruido**. Se define la relación señal/ruido como el cociente entre la señal y el ruido, y a menudo se la expresa en **dB**:

$$S/R|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{\text{señal}}{\text{ruido}} .$$

Si, por ejemplo, la señal es de **2 mV** y el ruido de **1 μV (= 0,001 mV)**, resulta

$$S/R|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{2 \text{ mV}}{0,001 \text{ mV}} = 20 \log_{10} 2000 = 66 \text{ dB} .$$

El mismo valor se obtendría si, por ejemplo, el nivel de la señal fuera de **200 mV** y el nivel de ruido de **100 μV (= 0,1 mV)**.

Como puede deducirse, para que esta especificación tenga sentido es muy importante incluir el nivel de la señal que se está utilizando en la especificación. Así, la mis-

ma cifra de **66 dB** representaría una muy buena relación señal/ruido si la señal utilizada fuera muy pequeña, y en cambio sería muy mala si la señal fuera la máxima que puede manejar el micrófono.

Normalmente la especificación de la señal no se da en **mV**, sino en **Pa** (presión) o en **dB** (nivel de presión sonora), y se incluye la frecuencia de la señal. Una posible especificación podría ser:

$$\text{S/R: } 50 \text{ dB a } 1 \text{ kHz; } 0,1 \text{ Pa}$$

o bien

$$\text{S/R: } 50 \text{ dB a } 1 \text{ kHz; } 74 \text{ dB NPS .}$$

(Obsérvese que estas especificaciones son idénticas, ya que una presión de **0,1 Pa** corresponde a un nivel de presión sonora de **74 dB**). En el segundo caso es fácil obtener el nivel de presión sonora equivalente al ruido eléctrico:

$$\text{NPS}_{\text{equivalente}} = 74 \text{ dB} - 50 \text{ dB} = 24 \text{ dB} .$$

Esto significa que el límite inferior de utilidad del micrófono es de **24 dB** de nivel de presión sonora.

8.9. Distorsión

Otra especificación de interés en los micrófonos es la distorsión. La distorsión se diferencia del ruido en que es una deformación de la onda, mientras que el ruido es una señal independiente que se agrega a la señal. Cuando la señal es una onda senoidal, la distorsión se manifiesta como la aparición de cierta cantidad de armónicos. Así, si la señal (en este caso una presión sonora) era de **500 Hz**, por ejemplo, la señal resultante (en este caso la tensión eléctrica generada por el micrófono) contendrá principalmente una onda senoidal de **500 Hz** pero también contendrá armónicos de dicha frecuencia, vale decir, senoides de frecuencia **1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz**, etc. Se define la **distorsión total armónica (THD)** como el cociente entre el valor eficaz de los armónicos generados por la distorsión y el valor eficaz de la fundamental, y se suele expresar en porcentaje. Por ejemplo, supongamos que se expone un micrófono a un sonido senoidal, y que como resultado produce una tensión que tiene **5 mV** de primera armónica y **0,05 mV** de las restantes armónicas, entonces la distorsión total armónica será:

$$\text{THD} = \frac{0,05 \text{ mV}}{5 \text{ mV}} = 0,01 = 1\%$$

Dado que el fenómeno de la distorsión se da normalmente para niveles altos de señal, la especificación se suele dar asociada con el **máximo nivel de presión sonora** que admite el micrófono. Una posible especificación podría ser:

$$\text{THD: } 1 \% \text{ a } 125 \text{ dB NPS .}$$

Otra forma de expresar lo mismo sería:

Máximo NPS: 125 dB a 1% THD .

El valor máximo, salvo que se indique lo contrario, representa un **nivel operativo**, y no un **nivel de seguridad**. La diferencia entre ambos es que el nivel operativo es un nivel para el cual el micrófono todavía está funcionando razonablemente bien, mientras que el nivel de seguridad es aquel superado el cual el micrófono puede deteriorarse. No superar este valor asegura que el dispositivo no se destruye, pero no que funcione satisfactoriamente. Si se reduce la señal hasta el nivel operativo, el funcionamiento volverá a ser correcto.

8.10. Conexión balanceada

A las especificaciones relativas a la performance del micrófono, se agregan otras de carácter más administrativo que operativo. Una de ellas es el tipo de conexión y cableado. Existen dos tipos de conexión clásicas. La más básica es la conexión **simple** o **no balanceada**, que consiste en dos conductores que unen la cápsula del micrófono al amplificador. Por regla general uno de los conductores rodea al otro formando un mallado o blindaje electrostático cuya finalidad es minimizar la captación de ruido eléctrico por **efecto antena**. Dicho conductor se conecta normalmente a la masa de la alimentación del amplificador. La otra conexión es la de tipo **balanceado**. En este caso se utilizan tres conductores. Uno de ellos forma también un mallado y actúa como blindaje para los otros, que van por dentro. La característica más importante es que estos conductores llevan señales de signo opuesto con respecto a la malla. Es decir que si en determinado momento uno tiene una tensión de **1 mV**, el otro tendrá una tensión de **-1 mV**. La finalidad de esto es reducir mucho más la captación de ruido eléctrico por los cables, particularmente el ruido inducido por acoplamiento electromagnético, que no es fácil de controlar debido a las dificultades para implementar un adecuado blindaje magnético. Esta inmunidad se logra utilizando como preamplificador un amplificador diferencial, es decir un amplificador que amplifica la diferencia entre las tensiones de sus dos entradas (**Figura 8.14**).

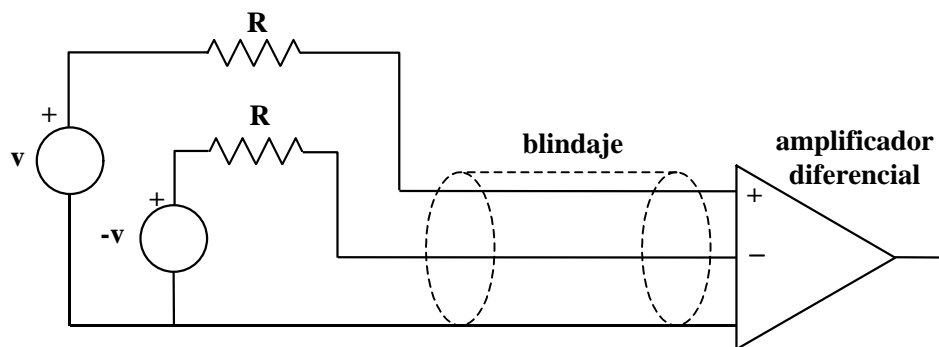


Figura 8.14. Estructura de una conexión balanceada. El cable de conexión tiene tres conductores, uno de los cuales es el blindaje.

Supongamos que $v = 1 \text{ mV}$, y que a causa del efecto antena se genera en cada cable de conexión una tensión de ruido de **10 mV**. Entonces la tensión que llega al ter-

minal **no inversor** (+) es de **11 mV**, mientras que la que llega al terminal **inversor** (–) es de **9 mV**. El amplificador diferencial amplifica la diferencia,

$$11 \text{ mV} - 9 \text{ mV} = 2 \text{ mV} ,$$

que es *la misma tensión* que se obtendría si los cables no captaran ruido:

$$1 \text{ mV} - (-1 \text{ mV}) = 2 \text{ mV} .$$

Debe observarse que el hecho de que se genere en los dos terminales *la misma* tensión (en el ejemplo, **10 mV**) se debe a que los dos conductores se encuentran físicamente muy próximos entre sí, y por lo tanto están prácticamente a la misma distancia del elemento que ocasiona el campo electrostático (un cable de distribución domiciliar de **220 V**, un tubo fluorescente, un motor, etc.). Esta tensión idéntica en ambos conductores balanceados se denomina tensión de **modo común**.

NOTA: Podría preguntarse por qué no sucede lo mismo en el cable de masa (la malla). Ello se debe a que el cable de masa está siempre conectado a circuitos de *muy baja impedancia*, lo cual atenúa mucho la captación de ruido.

El conector para lograr la conexión balanceada se denomina habitualmente **XLR**, aunque también se lo conoce como **Cannon**, que fue la primera marca comercial que lo introdujo.

8.11. Fuente fantasma

Finalmente, en los micrófonos capacitivos (a condensador), se especifica la alimentación, que puede ser con pila o batería ubicada en el mismo cuerpo del micrófono,

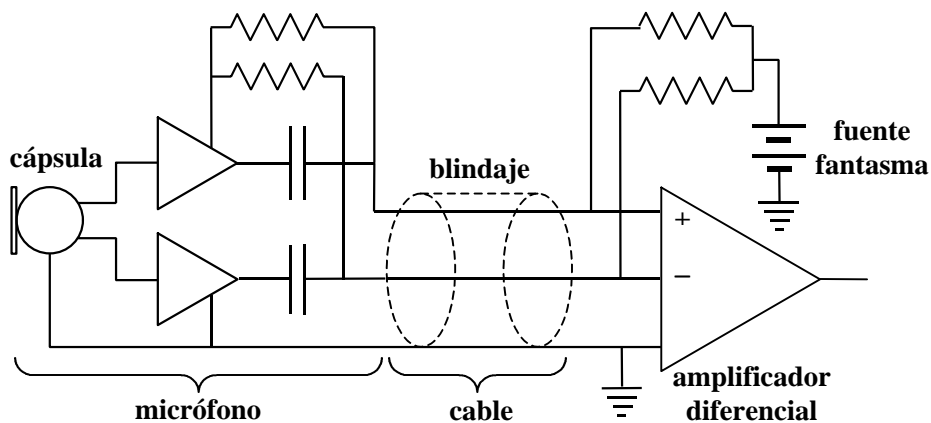


Figura 8.15. Esquema del conexionado de la **fuente fantasma**. La salida de la cápsula (condensador) se conecta a unos amplificadores cuya finalidad es la de reducir la impedancia naturalmente muy alta del condensador. El usuario sólo debe preocuparse por el cableado, ya que la conexión interna del micrófono y del amplificador diferencial de entrada de la consola ya vienen ensambladas de fábrica.

o con **fuelle fantasma** o remota. La fuente fantasma se utiliza en los micrófonos con conexión balanceada, y su estructura circuital se muestra en la **Figura 8.15**. Las salidas de la cápsula (condensador) ingresan a unos amplificadores cuya única finalidad es la de reducir la impedancia excesivamente alta del condensador hasta los niveles requeridos (según vimos, algunos cientos de ohm). Estos amplificadores, así como la propia cápsula, requieren alimentación, la cual llega de la consola por medio de sendas resistencias (como la potencia requerida es pequeña, estas resistencias no implican un inconveniente). Luego siguen dos capacitores cuya finalidad es eliminar las corrientes continuas, y dejar pasar sólo las frecuencias de audio. Estos capacitores son de valor mucho más alto que los de la cápsula, por lo que su impedancia es muchísimo menor, y por lo tanto no destruyen el efecto de los amplificadores mencionados. Los capacitores se conectan (por medio del conector **XLR**) al cable y luego a la consola, donde las dos señales complementarias ingresan al amplificador diferencial. La fuente fantasma, que hoy en día se encuentra habitualmente incorporada a la consola, aplica la misma tensión a las líneas de señal por medio de otro par de resistencias. Dado que el amplificador es diferencial, la tensión agregada no influye por ser igual en ambas entradas (por la misma razón por la cual la conexión balanceada rechaza el ruido de modo común).

Debido que no todos los micrófonos son de condensador, es lógico preguntarse qué sucede cuando se conecta un micrófono dinámico, por ejemplo, a la entrada de micrófono con fuente fantasma. Si el micrófono es balanceado (se supone que todos los de buena calidad profesional lo son), no sucede nada, ya que se aplica la misma tensión a ambas partes de la cápsula, con lo cual la tensión aplicada es nula. Pero si el micrófono fuera no balanceado, la tensión estaría aplicada directamente a la bobina, lo cual sería potencialmente muy perjudicial para el micrófono, pudiendo fácilmente destruirse. Existen algunos micrófonos dinámicos pseudobalanceados, es decir que por compatibilidad de conexión tienen conector **XLR**, pero no son realmente balanceados. Habitualmente, las consolas tienen un interruptor que permite conectar o desconectar la fuente fantasma, por lo cual, ante la duda, siempre convendrá desconectarla si no se están empleando micrófonos de condensador. Lamentablemente, no todas las consolas tienen una fuente fantasma por cada canal, por lo cual este interruptor habilita o deshabilita la fuente fantasma para todos los canales simultáneamente.

Antes de abandonar el tema de los micrófonos, comentemos que existen otros tipos de micrófonos, como los piezoeléctricos, los de cinta y los de carbón. Los de cinta han encontrado algún lugar en el audio profesional, pero en general los más utilizados son los ya estudiados de condensador y dinámicos.

Capítulo 9

Amplificadores

9.1. Introducción

El **amplificador** es el primer bloque procesador de señal *puramente eléctrico*. Su finalidad es aumentar el nivel de las señales provenientes de generadores de bajo nivel, como los micrófonos, hasta alcanzar un nivel apto para determinada aplicación, como podría ser excitar un parlante o caja acústica. La idea de la amplificación es sumamente recurrente en la electrónica, y aunque tal vez no lo parezca a primera vista existen amplificadores en todos los dispositivos o equipos electrónicos, tales como relojes digitales, controles remotos, computadoras, etc. Nosotros estamos interesados en los amplificadores de *señales de audio*.

9.2. Ganancia

La señal pequeña que se quiere **amplificar** se aplica entre dos terminales llamados de **entrada**, y la señal ya amplificada se obtiene entre otros dos terminales denominados de **salida**. Uno de los parámetros más fundamentales de un amplificador es la **ganancia**, o **amplificación**, que se define como el cociente entre la tensión de salida y la de entrada:

$$G = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} .$$

Para esta definición se ha tomado la tensión como variable de entrada y de salida, obteniéndose así la **ganancia de tensión**. En algunos casos (que no analizaremos aquí), la variable de entrada o la de salida, o ambas, son corrientes en lugar de tensiones.

La ganancia muchas veces se expresa también en decibeles (**dB**), y su valor se obtiene mediante la fórmula

$$G|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} G = 20 \log_{10} \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} .$$

Supongamos, por ejemplo, que un amplificador recibe a la entrada una señal de **100 mV** y produce a la salida una señal de **20 V**. Entonces

$$G = \frac{20V}{0,1V} = 200,$$

y en dB,

$$G|_{dB} = 20 \log_{10} 200 = 46 \text{ dB}.$$

Este mismo amplificador, si en lugar de recibir **100 mV** recibiera **7 mV**, por ejemplo, produciría a su salida una tensión

$$v_{salida} = G \cdot v_{entrada} = 200 \cdot 0,007 \text{ V} = 1,4 \text{ V}.$$

En la **Figura 9.1** se muestra la operación del amplificador mediante la composición de dos gráficos. Para obtener la salida correspondiente a una entrada determinada se ingresa en el eje de v_{ent} con ese valor en la denominada **curva de transferencia** (que en este caso es una recta), y en el eje de v_{ent} se obtiene la salida. Vemos que como la curva de transferencia es **lineal** (es decir que su inclinación es constante), la forma de onda se conserva y no hay distorsiones. También se aprecia que, por ser muy empinada, la salida tiene amplitud mayor que la entrada. Cuanto más empinada sea la curva de transferencia, mayor es la ganancia del amplificador.

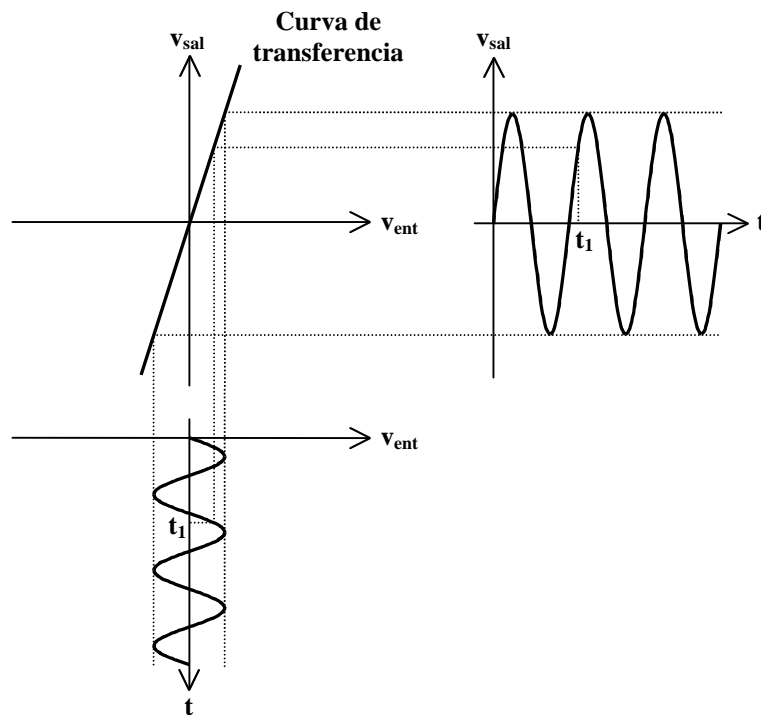


Figura 9.1. Gráfico que ilustra la operación de un amplificador. Para obtener la salida correspondiente a un instante determinado se lleva el valor de la entrada en ese instante al eje horizontal de la curva de transferencia, se prolonga hasta dicha curva, y del eje vertical se obtiene el valor de la salida.

9.3. Niveles de señal

La otra propiedad fundamental de los amplificadores es el *nivel de señal* que son capaces de manejar. Existen tres niveles de señal característicos: **bajo nivel**, **nivel de línea**, y **nivel de potencia**. Las señales de *bajo nivel* corresponden a la señal producida directamente por los transductores, como los micrófonos, los fonocaptadores para discos de vinilo, y los cabezales de reproducción de cinta magnetofónica. Las señales *de nivel de línea* son el resultado de aplicar **preamplificación** a las señales de bajo nivel, pero también son las señales que producen diversos equipos como las cassetteras, los reproductores de compact disc, los sintonizadores, los sintetizadores y otros instrumentos musicales electrónicos, etc. Finalmente, el *nivel de potencia* es el requerido para excitar los altavoces (parlantes) o cajas acústicas.

Antes de definir estos niveles es conveniente introducir algunos otros conceptos relativos a decibels. Genéricamente hablando, existen dos tipos de decibels:

- a) los que representan niveles absolutos de alguna variable física, lo cual implica la adopción de un valor de referencia (**decibels referenciados**),
- b) los que representan una relación entre dos valores cualesquiera de la variable (**decibels relativos**).

Ejemplo del primer tipo es el nivel de presión sonora **NPS**, cuyo valor de referencia era una presión de **20 μPa** . Un ejemplo del segundo tipo es la ganancia de un amplificador, que acabamos de introducir. En audio se utilizan otros tres decibels absolutos, que poseen sendos valores de referencia. Ellos son el **dBm**, el **dBu**, y el **dBV**.

El **dBm** permite expresar el nivel de **potencia eléctrica**, que se define como

$$N|_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \frac{\text{Pot}}{\text{Pot}_{\text{ref}}},$$

donde la potencia de referencia vale **Pot_{ref} = 1 mW = 0,001 W**. Observemos que el multiplicador del logaritmo es en este caso **10** y no **20** porque se trata de un nivel de *potencia*. Por ejemplo, una potencia de **1 W** corresponde a un nivel

$$N|_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \frac{1 \text{ W}}{0,001 \text{ W}} = 30 \text{ dBm}.$$

El **dBu** es una unidad para representar el nivel de tensión, definido como

$$N|_{\text{dBu}} = 20 \log_{10} \frac{V}{V_{\text{ref}}}.$$

donde la referencia es, ahora, de tensión, y vale **V_{ref} = 0,775 V**. Tal vez parezca extraño adoptar una referencia como ésta, pero ello obedece a una razón bien definida, y es que cuando se aplica a una resistencia de **600 Ω** una tensión correspondiente a **0 dBu**, es decir **0,775 V**, la potencia entregada es **0 dBm**, es decir **1 mW**. Esto puede verse aplicando la expresión de la potencia eléctrica entregada a una resistencia:

$$\text{Pot} = \frac{V^2}{R} = \frac{(0,775 \text{ V})^2}{600 \Omega} = 0,001 \text{ W} = 1 \text{ mW}.$$

La elección de la resistencia de **600 Ω** se debe a que éste es un valor en cierta medida normalizado, ya que es el valor de la impedancia de la línea telefónica clásica, donde primero se aplicaron estos conceptos. Las consolas actuales suelen tener impedancias de salida del orden de **100 Ω** , a pesar de lo cual estas unidades se siguen utilizando.

Debe destacarse que una tensión en **dBu** es numéricamente igual a la potencia en **dBm** que dicha tensión entrega a una resistencia *solamente cuando la resistencia es de 600 W*. Salvo esta situación muy particular, un valor expresado en **dBm** no tiene nada que ver con el mismo valor numérico expresado en **dBu**. El primero representa un valor de potencia y el segundo un valor de tensión.

Finalmente, el **dBV** expresa, también, niveles de tensión, según la expresión:

$$N|_{\text{dBV}} = 20 \log_{10} \frac{V}{V_{\text{ref}}} ,$$

donde la referencia es $V_{\text{ref}} = 1 \text{ V}$. En este caso la referencia parece más lógica que la anterior. A diferencia de lo que sucede entre un nivel de potencia y un nivel de tensión, existe una relación sencilla entre los niveles de tensión en **dBV** y en **dBu** (siempre que se refieran a una misma tensión):

$$N|_{\text{dBu}} = N|_{\text{dBV}} + 2,2 \text{ dB} .$$

Un hecho común a todos los decibeles referenciados es que un valor de **0 dB** *no* significa ausencia de señal sino que ésta coincide con el valor de referencia. En la **Ta-bla 9.1** se resumen las unidades que hemos introducido, junto con algunas de sus propiedades más básicas.

Una vez introducidas estas escalas, podemos dar mayor precisión a los tres niveles de señal ya comentados. Así, las señales de **bajo nivel** son las que tienen un nivel de tensión inferior a **-40 dBu**, es decir valores de tensión menores de **7,75 mV**; las señales de **nivel de línea** están comprendidas entre **-10 dBu** y **30 dBu**, es decir tensiones entre **245 mV** y **24,5 V**; y las señales de **nivel de potencia** son las que superan los **30 dBu**, es decir los **24,5 V**.

Tabla 9.1. Características de las principales escalas con referencia para expresar niveles de señal.

| Unidades | Magnitud | Referencia | Propiedades |
|-------------------------|----------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dB_{NPS} | Presión sonora | 20 μPa | 0 dB _{NPS} coincide con el umbral de audición a 1 kHz |
| dBm | Potencia | 1 mW | Es útil cuando es importante la potencia que entrega una fuente, más que su tensión |
| dBu | Tensión | 0,775 V | Cuando la tensión se conecta a una resistencia de 600 Ω coincide numéricamente con el nivel de potencia en dBm |
| dBV | Tensión | 1 V | Una tensión expresada en dBV es 2,2 dB menor que expresada en dBu |

Debe aclararse que los valores anteriores son valores promedio, ya que las señales, por su propia naturaleza, experimentan grandes fluctuaciones de nivel. Así, un micrófono de **10 mV/Pa** de sensibilidad ubicado justo al lado de un instrumento de parche, ante un pico de nivel de presión sonora de **134 dB** generará entre sus terminales una tensión cercana a **1 V**, que es ciertamente mucho mayor que los **7,75 mV** que limitan el rango de señales de bajo nivel, lo cual *no implica que el micrófono pase a ser un generador de señales de línea*.

Al mismo tiempo, cuando cierto altavoz está produciendo a **1 m** de distancia un pianísimo (sonido muy suave) de **40 dB** de nivel de presión sonora, la tensión que se le está aplicando se encuentra cercana a los **-40 dBu** y *no por ello el amplificador que lo excita es un dispositivo de bajo nivel*.

En la **Tabla 9.2** se resumen los tres niveles de señal de audio comúnmente utilizados en los equipos y componentes de audio profesional.

Tabla 9.2. Niveles de señal de audio utilizados en sonido profesional.

| Nivel | Ejemplos | Rango de tensión | Nivel en dBu |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Bajo | Micrófonos Fonocaptors Cabezales de reproducción magnética | $V_s < 7,75 \text{ mV}$ | $N < -40 \text{ dBu}$ |
| Línea | Preamplificadores Cassetteras Reproductor de CD Reproductor de DAT Sintonizadores Sintetizadores Entrada o salida de consola | $245 \text{ mV} < V_s < 24,5 \text{ V}$ | $-10 \text{ dBu} < N < 30 \text{ dBu}$ |
| Potencia | Amplificadores de audio de potencia | $24,5 \text{ V} < V_s$ | $30 \text{ dBu} < N$ |

9.4. Clasificación de los amplificadores

Los amplificadores se pueden clasificar según la señal que manejan, y así existen los amplificadores de *bajo nivel*, o **preamplificadores**, y los de *alto nivel* o **amplificadores de potencia**. Los preamplificadores tienen como finalidad llevar las señales de bajo nivel al nivel de línea, que es el nivel estándar que manejan las entradas y salidas de las consolas de mezcla. Los amplificadores de potencia reciben señal de nivel de línea a su entrada y la amplifican hasta el nivel de potencia. En la **Figura 9.2** se muestra la configuración requerida para llevar una señal de bajo nivel (como la de un micrófono) hasta el nivel de potencia necesario para excitar un parlante.

En realidad los preamplificadores normalmente vienen incorporados en las consolas o equipos generadores de señal como las cassetteras, por lo cual sus especificaciones no están bajo el control del usuario. No sucede lo mismo con los amplificadores de potencia, para los cuales se especifican diversas características técnicas a las que es necesario prestar debida atención.

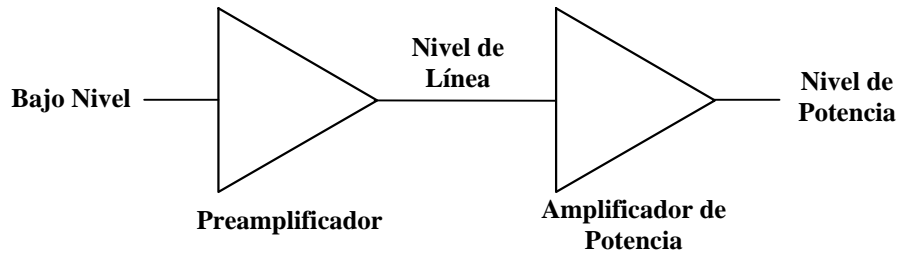


Figura 9.2. Diagrama de bloques de una interconexión amplificadora básica, en la cual se muestran la etapa preamplificadora y la etapa de potencia.

9.5. Potencia máxima de salida

En primer lugar se especifica la **potencia máxima de salida (power output)**, la cual se indica para uno o más valores de **impedancia de carga**, que normalmente son $8\ \Omega$ ó $4\ \Omega$ (pues éstos son los valores típicos de impedancia de los parlantes y cajas acústicas). Dado que la potencia es inversamente proporcional a la impedancia,

$$\text{Pot} = \frac{V^2}{Z} ,$$

podría parecer que la potencia para $4\ \Omega$ debería ser siempre el doble que la potencia para $8\ \Omega$. Sin embargo, el hecho de que los amplificadores incorporan protecciones contra sobrecargas puede hacer que la potencia para $4\ \Omega$ sea menor que el doble de la correspondiente a $8\ \Omega$. La potencia que entrega el amplificador, según veremos, nos permitirá calcular, en función de los datos técnicos de las cajas acústicas, el nivel de presión sonora producido por el sistema completo.

9.6. Sensibilidad

La segunda especificación de los amplificadores de potencia está relacionada con la ganancia. Se trata de la **sensibilidad (sensitivity)**, definida como *el valor de la tensión de entrada necesaria para producir la máxima potencia*. Puede especificarse en **V** o en **dBV**. Por ejemplo, supongamos un amplificador de **200 W** sobre una carga de $4\ \Omega$ y con una sensibilidad de **1,5 V**. Podemos determinar la ganancia de este amplificador del siguiente modo. A partir de la potencia, podemos obtener la tensión de salida. Para ello, en la expresión anterior de la potencia multiplicamos los dos lados por **Z**:

$$V_{\text{salida}}^2 = Z \cdot \text{Pot}$$

de donde

$$V_{\text{salida}} = \sqrt{Z \cdot \text{Pot}} = 28,3\ \text{V} .$$

Luego calculamos la ganancia dividiendo este valor por la tensión de entrada:

$$G = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{28,3 \text{ V}}{1,5 \text{ V}} = 18,9 ,$$

y, en dB:

$$G|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} G \cong 26 \text{ dB} .$$

9.7. Relación señal/ruido

Una tercera especificación de los amplificadores es su **relación señal/ruido**, **S/R** (**signal to noise ratio**) definida de la misma manera que para los micrófonos, es decir como *el cociente entre determinado valor de la señal y el valor de ruido residual propio del amplificador, o su expresión logarítmica en dB*:

$$S/R = \frac{V_{\text{señal}}}{V_{\text{ruido}}} ,$$

$$S/R|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} S/R .$$

Igual que en los micrófonos, debe explicitarse cuál es el valor o el nivel de señal utilizada (recordemos que el *valor* se expresa en **V** mientras que el *nivel* se expresa en alguno de los **dB** referenciados, por ejemplo **dBu** o **dBV**). Así, si se afirma solamente que la relación **S/R** es de **60 dB**, no se está diciendo nada, ya que podría tratarse tanto de un amplificador bastante ruidoso como de uno muy poco ruidoso. Normalmente se supone que la señal respecto a la cual se especifica **S/R** es la *máxima señal*, es decir la que proporciona la máxima potencia. Esto es así porque es cuando se obtiene el máximo valor, lo cual es conveniente como estrategia de comercialización del equipo.

A modo de ejemplo, supongamos que el amplificador anterior (**200 W**) tiene una relación **S/R** de **95 dB** a máxima potencia. Nos preguntamos cuál será la relación **S/R** cuando el amplificador sólo está entregando **10 W**, es decir una potencia **20** veces menor que la máxima. Recordando la expresión

$$V_{\text{salida}} = \sqrt{Z \cdot \text{Pot}} ,$$

vemos que si la potencia se reduce **20** veces, entonces la tensión se reducirá $\sqrt{20}$ veces, es decir alrededor de **4,5** veces. Entonces la relación **S/R** experimentará la misma reducción, que en **dB** significa una reducción de $20 \log_{10} 4,5$ **dB**, es decir **13 dB**. Entonces

$$S/R|_{10 \text{ W}} = 95 \text{ dB} - 13 \text{ dB} = 82 \text{ dB} .$$

Esto confirma que un mismo amplificador, según la potencia que esté circunstancialmente entregando puede tener distintos valores de relación **S/R**.

Esta especificación es importante cuando está en consideración el **rango dinámico** de la señal. Éste se define como *la diferencia en **dB** entre el máximo y el mínimo nivel de salida*. El mínimo nivel es, muchas veces, el nivel de ruido propio del generador de señal (por ejemplo el ruido de cinta en una cassetteera, o el ruido eléctrico de un micrófono), o bien el ruido ambiente captado por un micrófono y/o registrado en cualquier soporte. Para una adecuada selección de un amplificador, habría que contemplar que su relación **S/R**, para al nivel de salida al que va a funcionar realmente, sea mayor que el rango dinámico de la señal a amplificar. De no ser así, puede suceder una de dos cosas: o bien se preserva el nivel inferior de la señal (es decir se eleva el nivel desde la consola), a costa de exponerse a que los picos máximos de señal sean recortados, con la consecuente distorsión (que es muy audible), o bien se evita que se lleguen a producir recortes en los máximos niveles (reduciendo el nivel de salida de la consola), al precio de perder los fragmentos en que la señal esté en su nivel mínimo. Esta situación se puede apreciar en la **Figura 9.3**, en la cual se han esquematizado ambos casos. De las dos alternativas,

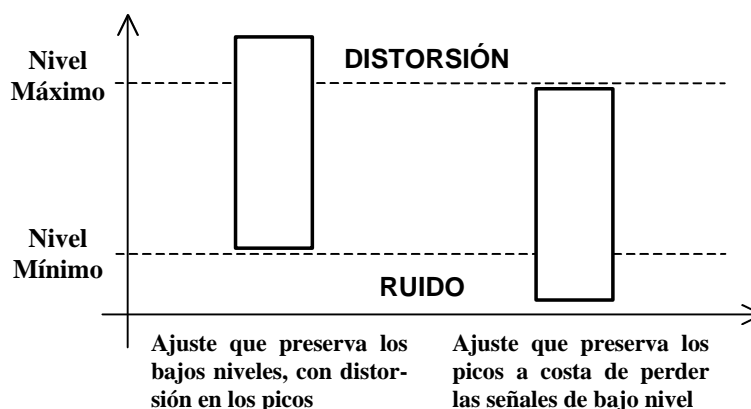


Figura 9.3. Alternativas extremas para señales cuyo rango dinámico excede la relación señal/ruido del amplificador.

aceptable es la segunda, ya que es preferible perder algo de material que exponerse a una severa distorsión que además de ser muy audible (creando un efecto sumamente desagradable) somete a riesgo de destrucción a los drivers de las vías acústicas de alta frecuencia (los tweeters), según veremos, ya que la distorsión genera armónicos de alta frecuencia cuya potencia puede ser superior a la originalmente supuesta en condiciones normales.

La tecnología permite resolver este problema por medio de un dispositivo que veremos más adelante: el limitador - compresor de audio, que se encarga de reducir la ganancia del sistema cuando la amplitud se acerca al límite superior. Técnicamente, es un control automático de ganancia, y actúa en forma similar (sólo que mucho más rápido y confiablemente) a un operador humano que al escuchar que sube el volumen, acciona la perilla correspondiente para evitar que suba tanto.

9.8. Respuesta en frecuencia

La siguiente especificación de los amplificadores es la **respuesta en frecuencia** (**frequency response**). Indica la variación de la ganancia (normalmente en **dB**) con la frecuencia. Se suministra de dos maneras diferentes. La primera, ilustrada en la **Figura 9.4**, se presenta en forma de gráfica de la ganancia en función de la frecuencia. Se observa que la respuesta es razonablemente plana, sin las desviaciones características de los micrófonos, hasta las frecuencias inferior y superior de corte, donde empieza a caer. La otra forma es dar los límites inferior y superior con una tolerancia, por ejemplo:

20 Hz a 20 kHz, $\pm 0,5$ dB .

Esto significa que la respuesta entre **20 Hz** y **20 kHz** se mantiene casi constante, con una tolerancia a lo sumo de **0,5 dB** hacia arriba y **0,5 dB** hacia abajo de su valor nominal (el valor nominal es el valor especificado, o que se deduce de otras especificaciones). Aunque esta especificación no brinda información tan completa como la gráfica, en la generalidad de los casos es suficiente para seleccionar un amplificador para determinada aplicación. En ambos casos debería indicarse a qué nivel de potencia se ha realizado el ensayo, ya que a grandes niveles la respuesta en frecuencia empeora. Normalmente se utiliza la potencia máxima.

En realidad, hoy en día los amplificadores cubren ampliamente el rango de frecuencias de audio, y algunos inclusive lo superan. No es raro encontrar amplificadores que son “planos” hasta los **100 kHz**, lo cual es dudoso que provea un beneficio real, por cuanto las frecuencias superiores a los **20 kHz** son inaudibles para el oído humano. Se dice que estos amplificadores son capaces de reproducir mejor los transitorios muy bruscos (por ejemplo un golpe de percusión muy incisivo), pero esto puede objetarse desde dos puntos de vista: el oído tampoco percibe la diferencia entre un transitorio brusco y su reproducción con la respuesta limitada a **20 kHz**, y además las cajas acústicas disponibles comercialmente tampoco reproducen acústicamente tan bien los transitorios bruscos como el amplificador lo hace eléctricamente.

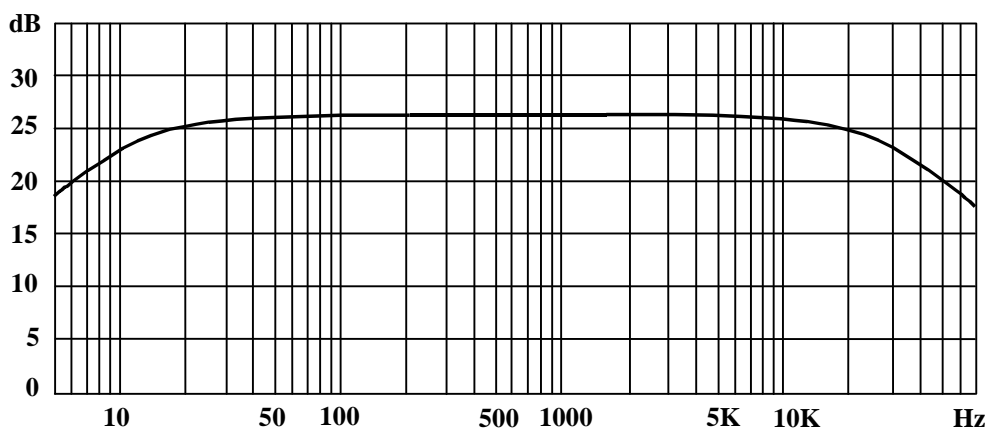


Figura 9.4. Respuesta en frecuencia de un amplificador.

9.9. Slew rate

Otra especificación relativa al comportamiento en alta frecuencia es el **slew rate** (no hay una traducción al castellano que resulte elegante; podría traducirse como **velocidad máxima de crecimiento**). Se define como la máxima variación de tensión que puede experimentar la salida en un tiempo de **1 μseg** . Se expresa en **V/ μseg** . Esta especificación no es de aplicación sencilla, y normalmente no hace falta tenerla en cuenta si la respuesta en frecuencia se ha especificado a la potencia nominal (máxima).

9.10. Distorsión

La siguiente característica que se debe especificar en los amplificadores es la **distorsión**. La distorsión consiste en la deformación de una señal a causa de una transferencia no lineal (ver **Figura 9.5**), y tiene efectos claramente audibles. Algunas distorsiones son favorables al oído, e inclusive son agregadas a propósito, como en los efectos denominados **aural exciter, enhancers**, etc. En el caso de los amplificadores, siempre hay algo de distorsión. Un hecho interesante es que la distorsión que introducen las válvulas es más favorable a la audición que la que producen los transistores, razón

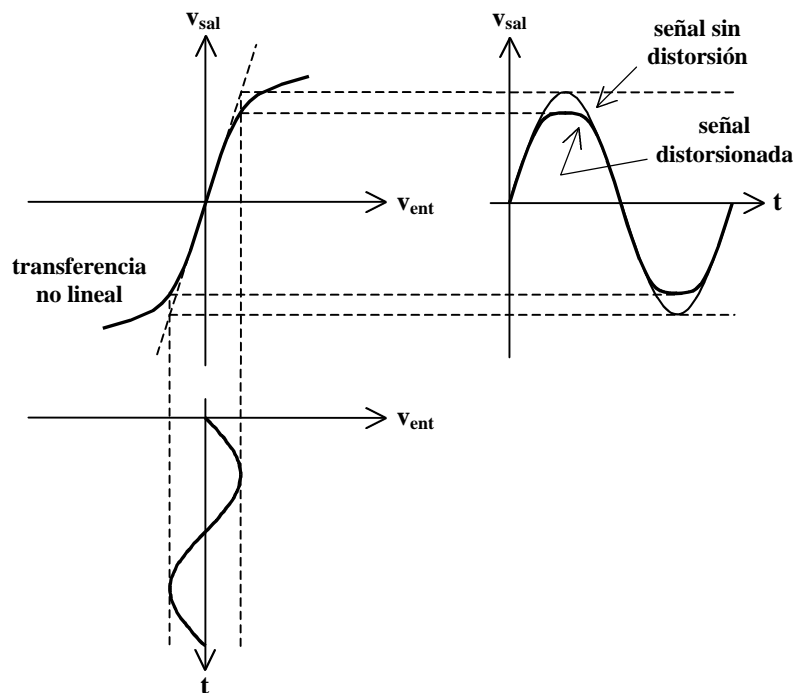


Figura 9.5. Origen de la distorsión en un amplificador. La curva de transferencia *no lineal* hace que una entrada senoidal se deforme, causando distorsión a la salida. En la gráfica de salida se comparan la señal distorsionada con la señal no distorsionada.

por la cual desde hace algunos años han ido reapareciendo en el mercado los amplificadores a válvulas, que parecían totalmente superados por los de estado sólido. Estos amplificadores son en general mucho más costosos, debido a que la válvula es un dispositivo de poca difusión en otras áreas.

Existen dos tipos de distorsión: la **distorsión total armónica (total harmonic distortion)**, THD y la **distorsión por intermodulación (intermodulation distortion)**, IMD.

La distorsión total armónica se refiere a la deformación que experimenta una senoide perfecta (pura) al atravesar un amplificador. El resultado de dicha deformación es la aparición de armónicos de la frecuencia original de la senoide, es decir que además de la senoide original amplificada, aparece un residuo formado por sus armónicos sucesivos. La distorsión total armónica se define, entonces, como la proporción de armónicos relativa a la fundamental:

$$\text{THD} = \frac{V_{\text{ef armónicos}}}{V_{\text{ef fundamental}}} ,$$

donde $V_{\text{ef armónicos}}$ es la tensión eficaz de los armónicos, y $V_{\text{ef fundamental}}$ la tensión eficaz de la frecuencia fundamental, es decir la originalmente aplicada al amplificador. Normalmente se expresa en %, es decir

$$\text{THD \%} = 100 \cdot \text{THD} .$$

Por ejemplo, si la salida tiene **25 V** de fundamental y **0,1 V** de armónicos, entonces

$$\text{THD \%} = 100 \cdot \frac{0,1 \text{ V}}{25 \text{ V}} \% = 0,4 \% .$$

Hoy en día se admite que una buena distorsión debe estar por debajo del **0,5 %**, existiendo en el mercado amplificadores con distorsiones tan bajas como **0,007 %** .

La distorsión por intermodulación se origina en la interferencia mutua que se produce entre dos tonos senoidales de *diferente frecuencia* sumados en un mismo canal (no debe confundirse con lo que sería separación de canales). Cuando se introducen dos tonos de frecuencias f_1 y f_2 , si el amplificador fuera ideal, sólo aparecerían en la salida las mismas frecuencias f_1 y f_2 , pero en un amplificador real también aparecen las frecuencias $n \cdot f_1 \pm m \cdot f_2$, donde $n \cdot f_1$ son los armónicos de f_1 y $m \cdot f_2$ los de f_2 , aclarándose que si alguna de estas frecuencias resulta negativa, se interpreta como su valor positivo correspondiente. Así, si tenemos dos tonos de **100 Hz** y **175 Hz**, algunas de las frecuencias que pueden aparecer son:

$$\begin{aligned} 2 \cdot 100 - 175 &= 25 \text{ Hz} \\ 2 \cdot 175 - 3 \cdot 100 &= 50 \text{ Hz} \\ 175 - 100 &= 75 \text{ Hz} \\ 3 \cdot 100 - 175 &= 125 \text{ Hz} \\ 2 \cdot 175 - 2 \cdot 100 &= 150 \text{ Hz} \\ 4 \cdot 100 - 175 &= 225 \text{ Hz} \\ 175 + 100 &= 275 \text{ Hz} \end{aligned}$$

La amplitud de cada una de estas frecuencias o el mismo hecho de que una en particular esté o no presente, dependen en realidad de cada amplificador.

Existe un procedimiento normalizado para medir y especificar la distorsión por intermodulación, que fue introducido por la **SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers)** - Sociedad de Ingenieros de Cine y Televisión). Consiste en aplicar simultáneamente (a través de un sumador) un tono senoidal de **60 Hz** y otro de **7 kHz**, teniendo el de **60 Hz** una amplitud **4** veces mayor que el de **7 kHz** (es decir un nivel **12 dB** mayor). Luego se eliminan los dos tonos de la salida por medio de filtros adecuados y se mide el valor eficaz de lo que queda, el cual es expresado como porcentaje del valor eficaz de los tonos originales.

Aunque muchas veces no se le presta debida atención, es mucho más nociva para la señal sonora la distorsión por intermodulación que la distorsión armónica. Efectivamente, la distorsión armónica de un sonido musical aislado, tiende a reforzar algunos armónicos dando mayor brillo al sonido. Cuando se presentan dos o más sonidos, en cambio, la distorsión por intermodulación produce tonos que no están armónicamente relacionados con ninguno de los sonidos originales, produciendo un efecto notorio y desagradable.

La mayoría de los amplificadores actuales tiene valores de **IMD** menores al **0,1%**, y algunos registran valores mucho más bajos aún.

9.11. Impedancia de entrada

Otra especificación es la **impedancia de entrada**, que es la impedancia que se mide externamente en los terminales de entrada. Para ver la importancia de esta especificación, observemos primero en la **Figura 9.6** que entre la fuente de señal y la

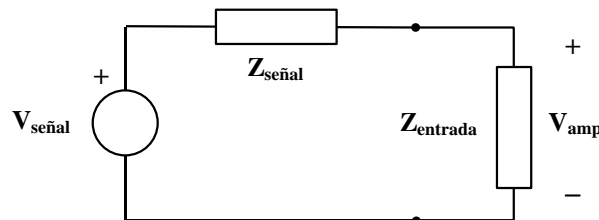


Figura 9.6. Modelo eléctrico de la conexión entre un generador de señal y un amplificador.

impedancia de entrada se forma un divisor de tensión. Podemos plantear la ecuación del divisor de tensión para obtener la tensión *efectiva* aplicada al amplificador:

$$V_{amp} = \frac{Z_{entrada}}{Z_{señal} + Z_{entrada}} V_{señal} .$$

Vemos que la tensión real a la entrada del amplificador se reduce tanto más cuanto más pequeña sea su impedancia de entrada con respecto a la impedancia interna de la fuente

de señal. Por ello conviene que la impedancia de entrada sea alta comparada con las impedancias usuales en las salidas de línea (por ejemplo la de la consola de mezcla). Típicamente la impedancia de entrada de los amplificadores está en el rango entre **10 kΩ** y **50 kΩ**, y la de las consolas es de algunos cientos de **Ω**, de modo que la reducción de la señal vista por la entrada del amplificador es normalmente menor que un **5%**, que en **dB** corresponde a una reducción menor que **0,5 dB**, y por lo tanto poco significativa auditivamente. En los amplificadores con entrada balanceada, se especifican dos valores de impedancia de entrada, uno para entradas balanceadas y otro para entradas no balanceadas, siendo el valor balanceado el doble del no balanceado.

9.12. Factor de amortiguación

En los amplificadores no se especifica en general la *impedancia de salida*, aunque es común proporcionar un dato equivalente, que es el **factor de amortiguación (damping factor)**. Es la relación entre la impedancia nominal de carga y la impedancia real de salida. Por ejemplo, un amplificador que entrega cierta potencia a una carga de **4 Ω** y cuya impedancia de salida es de **0,02 Ω** posee un factor de amortiguación de

$$\text{F.A.} = \frac{4 \Omega}{0,02 \Omega} = 200 .$$

Si bien se consideran satisfactorios valores superiores a **4**, los amplificadores actuales alcanzan factores de amortiguación de varios cientos. Esto es importante para lograr que la impedancia del parlante no modifique significativamente la tensión real sobre el parlante, por un razonamiento similar al de la impedancia de la fuente de señal y de la entrada del amplificador.

9.13. Separación de canales

Otra especificación que se suele dar en el caso de los amplificadores estereofónicos es la **separación de canales (crosstalk)**, también denominada **diafonía**. Esta especificación describe en qué medida aparece señal a la salida de un canal no excitado como consecuencia de una señal aplicada a la entrada del otro canal. La forma de determinarla consiste en aplicar señal en un canal y nada en el otro. Entonces se mide el nivel obtenido en ambos canales (en **dBu** o **dBV**), y se resta al nivel del canal no excitado el nivel del excitado. Por ejemplo, supongamos que se aplica una señal que produce a la salida un nivel de **24 dBV** en el canal excitado y **-40 dBV** en el no excitado. Entonces la separación de canales resulta:

$$\text{Separación de canales} = -40 \text{ dBV} - 24 \text{ dBV} = -64 \text{ dB} .$$

La separación de canales es siempre un número negativo, pues es la representación logarítmica de un número menor que **1** (ya que la respuesta del canal no excitado debe ser, por lógica, siempre menor que la del excitado). Una correcta especificación de la

separación de canales requiere que se indique a qué frecuencia se hizo la medición. En general se utiliza la frecuencia de **1 kHz**.

9.14. Otras características

Finalmente, existe una serie de especificaciones accesorias que no hacen directamente a las prestaciones del amplificador, pero que pueden incidir en cómo se lo aplica. Entre ellas están los conectores de entrada y salida. Típicamente, las entradas para equipos profesionales son de tipo **XLR**, que pueden ser balanceadas, no balanceadas o conmutables entre ambas disposiciones. También se utilizan, en algunos casos, conectores tipo **Jack** de **1/4" (6,35 mm)** para el caso balanceado de tres vías, también llamados **TRS (tip - ring - sleeve, es decir punta - anillo - manga)** y para el caso no balanceado de dos vías denominados **TS (tip - sleeve: punta - manga)**. Otro conector que se utiliza es el de tipo **RCA**, que no es balanceado. En general los amplificadores brindan más de una posibilidad para mayor flexibilidad de uso, aunque se prefiere la conexión **XLR**. A pesar de que el nivel de señal a la entrada de los amplificadores (el nivel de línea) el peligro de la captación de ruido en los cables no es tan severo como en señales de micrófono, en sistemas en los que se pretende una gran relación señal/ruido es preferible reducir al máximo toda interferencia. La conexión de salida no se efectúa por conectores sino a través de una bornera en la cual se ajustan directamente las puntas de los cables, del tipo denominado **binding post** (no existe traducción elegante al castellano; podría traducirse como **poste de unión**). Otra especificación accesorias que tiene importancia en los amplificadores de gran potencia es el consumo de energía eléctrica. Además de indicar la tensión y la frecuencia (para la Argentina, **220 V** y **50 Hz**, aunque los equipos importados podrían requerir tensiones como **120 V** y frecuencia de **60 Hz**), se especifica la corriente máxima en **amperes**. Este dato se utiliza para dimensionar correctamente los cables y fichas de conexión requeridos, aunque el detalle de este dimensionamiento es demasiado técnico, siendo preferible delegarlo en personal capacitado para ello. Las dimensiones y el peso constituyen otra especificación a tener en cuenta muy especialmente, ya que amplificadores con características similares (especialmente similar potencia) pueden variar notablemente en su tamaño y peso. Es conveniente saber que los amplificadores más livianos, si bien ofrecen ventajas a la hora del traslado y la instalación, por lo general utilizan para los transistores o circuitos integrados de potencia ventilación forzada mediante ventiladores eléctricos, los cuales generan ruido que, en determinadas aplicaciones (música con intervalos de silencio o con pasajes muy suaves), resulta notorio y molesto. En este caso no es posible simplemente cubrir las aberturas de salida de aire porque el amplificador puede producir fallas de funcionamiento transitorias o permanentes, o directamente destruirse por exceso de temperatura. La solución consiste en ubicar el amplificador en una sala separada con adecuada aislación acústica.

Capítulo 10

Altavoces y Cajas Acústicas

10.1. Introducción

Para completar un mínimo sistema acústico que sea funcionalmente completo, a los micrófonos y amplificadores ya descritos se les debe agregar algún *transductor* que transforme nuevamente la energía eléctrica en energía acústica. Ejemplos de ello son los altavoces, audífonos y auriculares. Nos ocuparemos aquí de los **altavoces** (también denominados **altoparlantes** o simplemente **parlantes**). Los altavoces más difundidos son los de **bobina móvil**, tanto para baja como para alta frecuencia. En alta frecuencia (por encima de los **5 kHz**) se utilizan también los **piezoeléctricos**.

10.2. Clasificación por rangos de frecuencia

Tanto en sonido de *alta fidelidad* (sonido de buena calidad para consumo familiar) como en *sonido profesional* (sonido de calidad superior para grabaciones o espectáculos) es habitual utilizar cajas acústicas que incluyen dos o más altavoces que cubren diferentes rangos de frecuencia. Así, para *bajas frecuencias*, es decir las frecuencias menores de **500 Hz**, se utilizan los denominados **woofers** (cuya traducción directa sería “ladradores”), altavoces cuyo diámetro varía entre **8” (20,3 cm)** y **18” (45,7 cm)** (aunque lo más común es entre **12”** y **18”**). Algunos woofers llegan hasta frecuencias de **1,5 kHz**, particularmente los que se usan en sistemas de sólo dos altavoces (sistemas de dos vías). Para *frecuencias medias*, entre **500 Hz** y unos **6 kHz**, se utilizan los antiguamente llamados **squawkers** (“graznadores”), cuyo diámetro típico está entre **5” (12,7 cm)** y **12” (30,5 cm)**. Finalmente, para las altas frecuencias, es decir por encima de los **1,5 kHz**, y a veces por encima de los **6 kHz**, se utilizan los denominados **tweeters** (“piadores”).

En sonido profesional de gran potencia, las cajas acústicas poseen un único altavoz, y se coloca una caja o más por cada rango de frecuencia, con características optimizadas para dicho rango.

10.3. Altavoces de bobina móvil

En la **Figura 10.1** se ha representado un altavoz de bobina móvil típico. Está constituido por un *circuito magnético*, formado a su vez por una base o placa posterior con un núcleo o polo central cilíndrico montado sobre su centro, un imán permanente con forma de una gran arandela, y una placa anterior con forma de arandela más pequeña. Entre el polo central y la placa anterior queda un espacio de aire denominado *entrehierro*, sobre el cual existe un poderoso campo magnético. En dicho entrehierro se aloja la bobina, la cual se halla montada sobre un tubo de papel que la comunica con el cono.

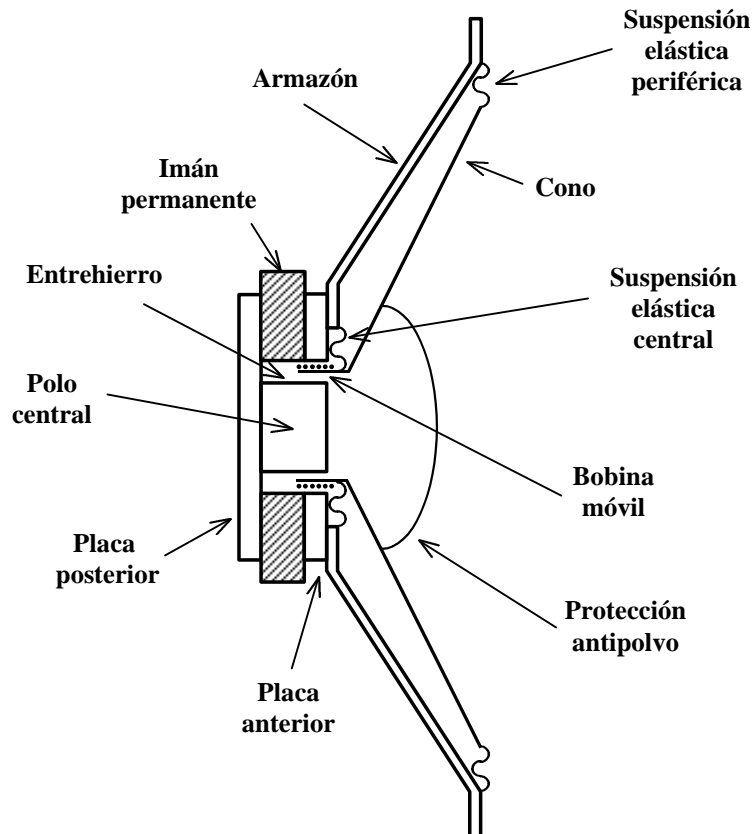


Figura 10.1. Corte transversal de un altavoz de bobina móvil típico, en donde se indican sus partes funcionalmente más importantes.

Como la bobina está inmersa en un campo magnético, al circular por ella corriente eléctrica se genera una fuerza que le imprime movimiento (en el capítulo 23 se encontrarán más detalles sobre la interacción eléctrica y magnética). Dicho movimiento se transmite al cono o *diafragma*, y éste actúa entonces como una especie de pistón, impulsando el aire hacia afuera o hacia adentro según la polaridad de la tensión aplicada a la bobina. Este proceso genera sucesivas ondas de compresión y rarefacción del aire que, tal como se explicó en el capítulo 1, se propagan como sonido. La forma cónica del

diafragma es sólo para darle mayor rigidez sin aumentar la masa. Si se le diera forma de disco o plato, sería muy difícil evitar que se deformara, y el resultado sería deficitario.

El funcionamiento es, esencialmente, el de un *motor lineal*, es decir un motor cuyo desplazamiento es a lo largo de una línea recta y no en forma rotativa. Como se puede apreciar, estructuralmente es bastante similar a un micrófono. De hecho algunos altavoces pequeños pueden invertir su operación y en lugar de transformar energía eléctrica en acústica, pasan a transformar energía acústica en eléctrica, comportándose como micrófonos. Es el caso de los intercomunicadores o los porteros eléctricos, cuyo altavoz cumple también la función de micrófono.

La estructura anterior se conoce como **altavoz de radiación directa**, y resulta satisfactoria sólo para baja frecuencia, particularmente cuando la longitud de onda es mayor que el diámetro del altavoz (recordemos que la longitud de onda disminuye con la frecuencia). Así, para un altavoz de **15"** (**38,1 cm**), el límite superior está en el orden de unos **900 Hz**.

En alta frecuencia aparecen varios problemas. En primer lugar la inercia del cono dificulta los movimientos rápidos requeridos para crear sonidos de alta frecuencia. En segundo lugar el cono deja de vibrar como un todo y pasa a ondularse, existiendo zonas del mismo que sobresalen mientras otras se hunden. Las que sobresalen crean una presión sonora positiva mientras que las que se hunden crean una presión negativa. Estas presiones tienden a cancelarse mutuamente, provocando por lo tanto una reducción de la energía sonora irradiada. El grado en que se produce esta cancelación depende mucho de la dirección en la cual se mida el campo sonoro, lo cual crea a su vez un patrón direccional muy irregular. En términos prácticos, esto implica que al desplazar el oído lentamente frente al altavoz, las altas frecuencias aumentarán y disminuirán su intensidad, provocando a su vez sonoridades más metálicas o más opacas, lo cual constituye un defecto acústico que atenta contra la calidad de reproducción de la música.

10.4. Excitadores de compresión

En vista de los inconvenientes anteriores, para los altavoces de alta frecuencia se utiliza una variante de la estructura anterior, denominada **excitador de compresión**, (**compression driver**) que se muestra en la **Figura 10.2**. El nombre se debe a que el excitador genera presiones sonoras muy elevadas, que luego son llevadas a los valores normales mediante una **bocina (Figura 10.3)**, que opera como *adaptador de impedancia acústica*. En efecto, por el pequeño tamaño requerido para un altavoz de alta frecuencia, que es del orden de algunos **cm**, las vibraciones del excitador son pequeñas, y sin embargo la presión generada (por funcionar en compresión) es muy alta. Esto es característico de una *alta impedancia acústica*. En cambio en el aire ambiental, la presión es mucho menor pero las vibraciones son grandes, lo cual es sinónimo de *baja impedancia acústica*. Si no se utilizara un adaptador de impedancia, la potencia acústica radiada sería mucho menor y el sistema perdería rendimiento. La adaptación se logra por medio de un crecimiento gradual de la sección de la bocina.

En la **Figura 10.2**, vemos que, al igual que en los altavoces de radiación directa, existe un diafragma impulsado por una bobina inmersa en el campo magnético de un imán, pero dicho diafragma tiene forma de cúpula en lugar de ser cónico. Inmediatamente debajo del diafragma, existe un elemento **corrector de fase**, también con forma

de cúpula, pero con perforaciones internas que comunican con la **garganta** del excitador (driver). Este elemento permite compensar las diferentes distancias que debe recorrer el sonido desde los distintos puntos del diafragma hasta la garganta, evitando cancelaciones del sonido similares a las ya mencionadas.

Como se indicó anteriormente, para mejorar el rendimiento de este tipo de altavoces se debe utilizar un acoplamiento entre el excitador y el aire ambiental que se materializa mediante una bocina atornillada sobre la cubierta del excitador (driver), como se muestra en la **Figura 10.3**. La forma más típica de estas bocinas es la exponencial, y la vista frontal (desde adelante) suele ser rectangular. Una característica asociada a las bocinas es, según veremos, que son mucho más direccionales que los altavoces de radiación directa.

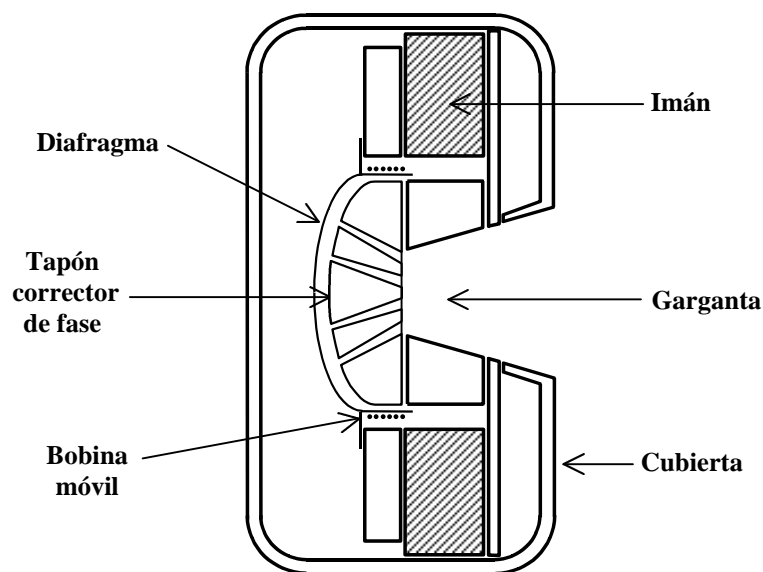


Figura 10.2. Un excitador de compresión (compression driver) que es el elemento motor de un tweeter.

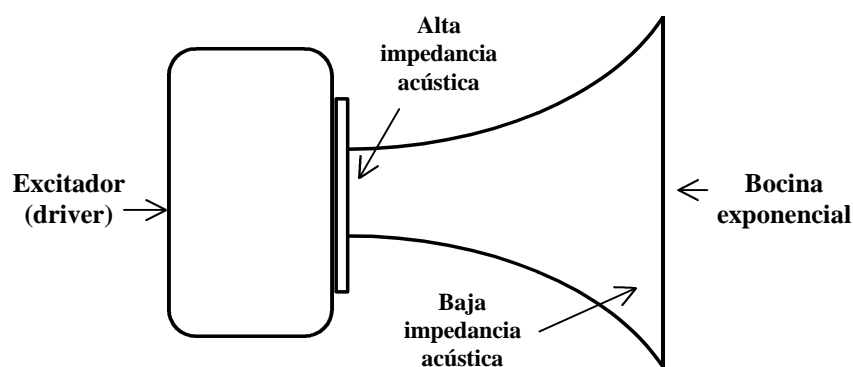


Figura 10.3. Un excitador de compresión acoplado al ambiente por medio de una bocina exponencial.

10.5. Cajas acústicas

Tal como dijimos anteriormente los altavoces se montan en cajas acústicas, cuyo objeto es mejorar las características de la radiación sonora, así como facilitar la maniobrabilidad y proteger a los excitadores. Refiriéndonos a los altavoces de radiación directa, vemos que si en un instante determinado el cono se desplaza *hacia afuera*, se producirá una *compresión del aire que se encuentra delante* del altavoz y en cambio se producirá una *descompresión del aire que se encuentra detrás* (**Figura 10.4**). Esto crea lo que se denomina un **dipolo acústico**, y conduce a un *patrón direccional irregular*, además de un menor rendimiento sonoro. El agregado de una **caja acústica**, o **sonodeflector**, o **baffle**, permite corregir este problema.

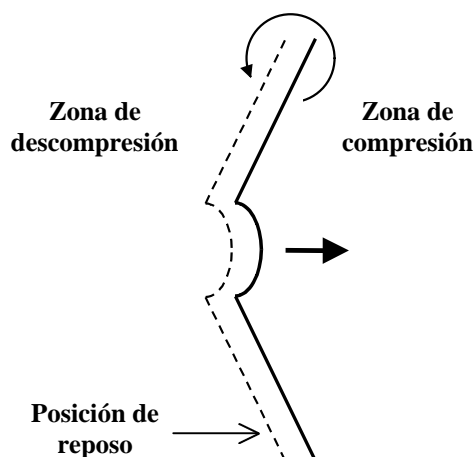


Figura 10.4. Un altavoz de radiación directa sin caja acústica provoca al mismo tiempo zonas de compresión y de descompresión que producen cancelaciones de sonido.

Existen varios tipos de baffles. El baffle conceptualmente más simple consiste en montar el altavoz al ras de una pared sobre un agujero perforado en ésta, de tal manera que las ondas de compresión y descompresión no puedan mezclarse. Este tipo de baffle se denomina **baffle infinito** (o **sonodeflector infinito**), y permite aprovechar la totalidad de la onda radiada por el altavoz. Si bien teóricamente es uno de los mejores sistemas, por cuestiones de orden práctico su aplicación en general no es factible, ya que se requeriría un espacio inutilizado inconvenientemente grande detrás de la pared.

El segundo tipo de baffle es el **baffle cerrado** (**Figura 10.5a**). Este baffle utiliza una caja recubierta interiormente con material absorbente, de modo que su interior se comporta como un espacio abierto. El resultado es similar al de un baffle infinito. Estos baffles sólo se utilizan en sistemas de pequeña potencia, y frecuencia relativamente alta, dado que en la práctica los materiales absorbentes tienen bajo rendimiento para los graves.

El tercer tipo es el **baffle abierto** o **baffle ventilado**, que es el más ampliamente utilizado para las cajas de bajos. Hay a su vez varios tipos de baffles ventilados. En el

más sencillo, el denominado **reflector de bajos**, se ilustra en la **Figura 10.5b**. En este baffle se irradian dos ondas. La primera es la creada por la onda de compresión de la cara externa o delantera del cono, que es radiada en forma directa. La segunda es la creada por la onda de descompresión de la cara interna o posterior del cono, que sale por la abertura o **boca** del baffle. Si esta onda saliera en forma inmediata al exterior, por estar en *contrafase* respecto a la onda de compresión (es decir por ser opuesta) se cancelaría con aquélla, dando un sonido resultante muy débil. Pero se la hace recorrer cierta distancia antes de salir, de manera que cuando sale, la otra onda ya pasó a ser de descompresión, y entonces las dos están en fase, reforzándose el sonido resultante debido a la contribución de ambas ondas. La distancia que debe recorrer la onda interna para que esto ocurra es la que recorre la onda en la mitad de un ciclo, es decir, media longitud de onda ($\lambda/2$).

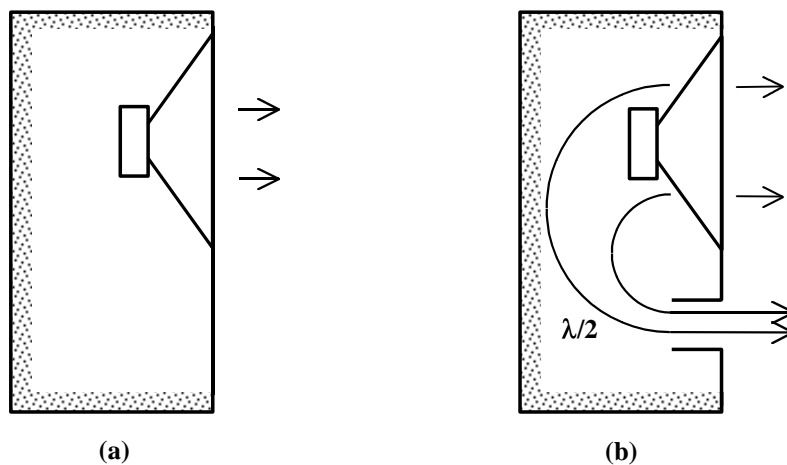


Figura 10.5. (a) Un **baffle cerrado**. La onda generada por la parte posterior del cono es absorbida por el recubrimiento absorbente. (b) Un **baffle reflector de bajos**. La onda creada por la parte posterior del cono recorre una distancia igual a media longitud de onda antes de salir por la abertura del baffle, lo que hace que llegue en fase con la onda radiada directamente por la parte delantera del cono. La abertura incluye un *tubo de sintonía*.

Este principio tiene una limitación, y es que en realidad la longitud de onda depende de la frecuencia, por lo tanto el cambio de fase será el óptimo sólo para *una frecuencia determinada*, ya que la distancia entre el altavoz y la abertura es constante. Para otras frecuencias, puede suceder que el refuerzo sea menos pronunciado, o inclusive que, por el contrario, ambas ondas estén en *contrafase*, produciéndose la ya comentada cancelación con la correspondiente reducción del sonido radiado.

Para solucionar este problema se recubre interiormente el baffle con un material absorbente acústico (generalmente lana de vidrio) que se encarga de eliminar la onda creada por la parte posterior del parlante cuando ésta es de alta frecuencia. Cuando, por el contrario, la frecuencia es demasiado baja (y por lo tanto la longitud de onda dema-

siado grande), la cancelación es inevitable. Se procura que las dimensiones de la caja sean suficientemente grandes como para que las frecuencias en las que esto ocurre estén por debajo de la propia respuesta del altavoz.

Dentro de los reflectores de bajos, existe una variante para mejorar la respuesta en muy baja frecuencia que consiste en hacer que el sonido recorra un camino más largo dentro de la caja por medio de un **laberinto**. Otra variante muy usada consiste en agregar un tubo hacia adentro de la abertura, denominado **tubo de sintonía**, el cual agrega una resonancia a la caja, permitiendo enfatizar sólo aquellas frecuencias para las que el recorrido de la onda sea aproximadamente $\lambda/2$. La frecuencia se elige de modo de extender la respuesta en baja frecuencia.

Finalmente, en cajas de gran potencia se suele utilizar un sistema inspirado en el acoplamiento a bocina que vimos en relación con los tweeters. El inconveniente es que para que una bocina sea efectiva, sus dimensiones deben ser comparables a la longitud de onda del sonido a reproducir. Así, la boca de la bocina debe ser al menos de un cuarto de longitud de onda, lo cual para una frecuencia de **100 Hz**, por ejemplo, corresponde a unos **86 cm** de diámetro. Esto significa que la longitud debería ser de algunos metros. Por esa razón se recurre a doblar sobre sí misma la bocina, obteniéndose unas cajas denominadas **folded horn (bocina plegada)**, que se muestra en la **Figura 10.6**.

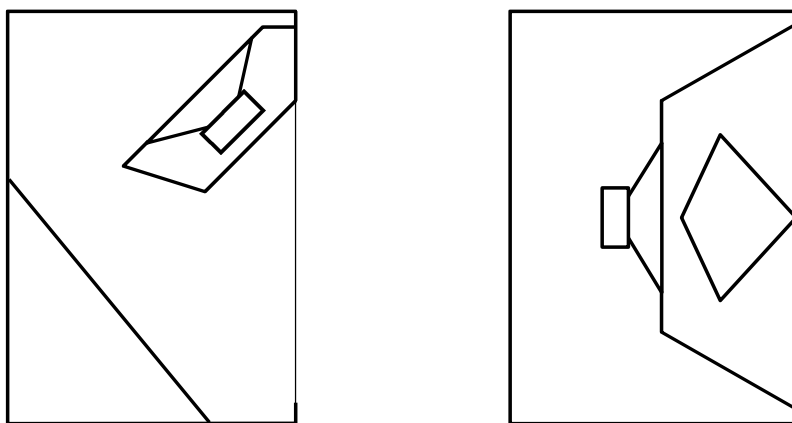


Figura 10.6. Dos tipos de baffle de bocina para baja frecuencia. La bocina se encuentra plegada sobre sí misma de modo de reducir el espacio requerido. Por esa razón se suele denominar **folded horn**.

Este tipo de cajas en general tiene mayor rendimiento que los reflectores de bajos, y por ello suelen emplearse en sistemas de gran potencia, donde el consumo general de energía es una consideración importante.

En lo que sigue, abordaremos las especificaciones que se proporcionan habitualmente para los altavoces y cajas acústicas, que resultan necesarias tanto en la selección de un sistema para una determinada aplicación como para el dimensionamiento y análisis del resultado que puede obtenerse en casos concretos, particularmente en la interconexión con un amplificador dado.

10.6. Especificaciones de potencia

Enfocaremos nuestra atención ahora sobre las especificaciones de **potencia** de los gabinetes acústicos. Existen varias formas diferentes de especificarla, cada una con distintas interpretaciones. La primera es la **potencia media máxima**, que está relacionada con el hecho de que una gran parte de la potencia que recibe un altavoz se disipa en forma de calor en la bobina, aumentando su temperatura. El máximo establecido es un valor que *asegura que la bobina no se queme por exceso de temperatura*. Esta especificación se suele denominar a veces **potencia RMS**, pero esta denominación es incorrecta, ya que la indicación **RMS (root mean square)**, equivalente a **valor eficaz**, se aplica a tensiones (o corrientes) y **no** a potencias (recordar que el valor eficaz de una tensión que varía en el tiempo es un valor constante de tensión capaz de entregar a una carga dada la misma potencia media que la tensión variable).

La segunda especificación de potencia es la **potencia de programa máxima**. Este valor, que no siempre se especifica, representa una especie de máximo para un *programa musical típico*, y tiene en cuenta dos cosas: primero, que dicho máximo es de duración relativamente corta, y segundo, que la mayor parte del tiempo los valores de potencia son considerablemente menores que dicho máximo. Lamentablemente, no se encuentra normalizado lo que se entiende por “programa musical típico”, razón por la cual el valor es sólo indicativo y no demasiado útil. En general es mucho mayor que la potencia media máxima, pudiendo ser del orden del doble. Así, un altavoz de **100 W** de potencia media máxima puede ser que admita **200 W** de potencia de programa máxima (pero debido a la falta de normalización comentada, esto no puede garantizarse).

La tercera especificación de potencia es la **potencia de pico máxima**, que corresponde al *máximo valor instantáneo de potencia que puede aplicarse durante un tiempo muy corto*. Este valor está relacionado con otra limitación de los altavoces, que es el máximo recorrido, o excursión, de la bobina sin que se destruya el diafragma o cono (lo que habitualmente se denomina **desconado** del altavoz). La razón para aplicar la potencia durante un tiempo *muy corto* es evitar que la bobina se caliente excesivamente, destruyéndose por sobrecalentamiento antes de que se pueda destruir por ruptura del diafragma.

Por último, existe un procedimiento de medición normalizado por la **EIA** (Electronic Industries Association: Asociación de Industrias Electrónicas) que tiene en cuenta tanto la potencia media (limitaciones térmicas) como la potencia de pico (limitación de excursión), mediante la aplicación de una señal creada para ese fin y que se encuentra estandarizada. El valor de **potencia máxima EIA** indica valores promedio, y aumentándola en un factor de **4** se obtiene el pico máximo.

Como advertencia final, cabe mencionar que para equipos de consumo, como radiograbadores o minicomponentes, se suele indicar un valor de **potencia PMPO**, que representa una especie de valor de pico durante un tiempo extremadamente corto, y que da valores muchísimo mayores que lo que realmente admite el correspondiente altavoz. Dicha especificación es, en realidad, poco honesta, porque aprovecha como estrategia de venta el atractivo que ejercen los equipos de gran potencia en los aficionados, inflando exageradamente los valores y proporcionando cifras engañosas (además es una especificación del parlante y no del amplificador que lo alimenta).

Los valores anteriores permiten dimensionar el amplificador necesario para un determinado altavoz o caja acústica. A fin de establecer un criterio para tal dimensio-

namiento, tengamos en cuenta que cualquier amplificador puede ser llevado a la saturación con una señal de entrada suficientemente alta. La saturación es sinónimo de *recorte* (clipping), lo que significa que la señal de salida, al no poder seguir aumentando, será recortada, tal como se muestra en la **Figura 10.7**. Por otra parte, el peor caso de recorte se tiene cuando la amplitud ideal de salida (es decir si no existiera el recorte) es mucho mayor que el nivel de recorte, como se muestra en la **Figura 10.8**. En ese caso la onda de salida se parece mucho a una onda cuadrada. Si comparamos una señal senoidal y una onda cuadrada de igual amplitud, resulta que *la potencia de la onda cuadrada es el doble que la potencia de la onda senoidal*. Esto significa que si se aplica una señal senoidal

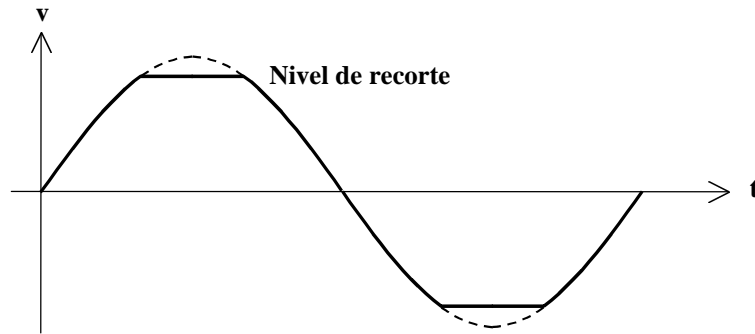


Figura 10.7. Una onda senoidal recortada por saturación del amplificador de potencia. En línea de trazos se ve la parte recortada.

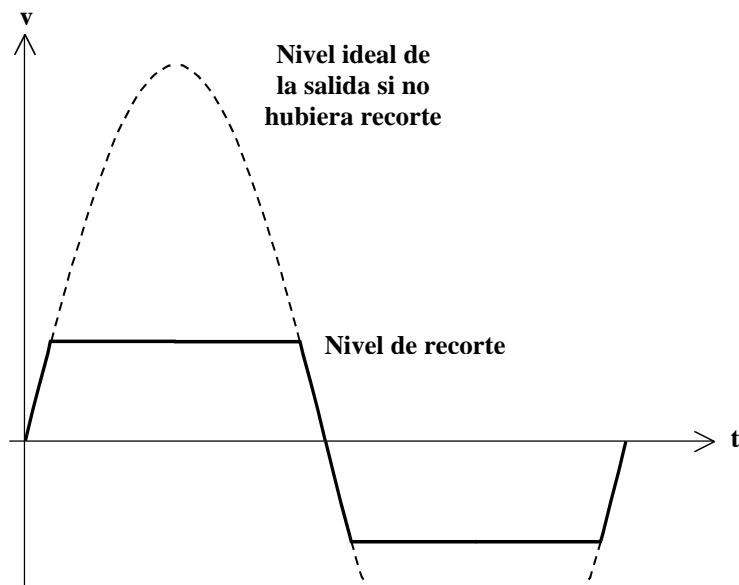


Figura 10.8. Una onda senoidal recortada fuertemente por la saturación del amplificador de potencia. En línea de trazos, la onda senoidal ideal. Se puede observar cómo la onda resultante se parece más a una onda cuadrada.

de entrada de tal modo que la salida esté a punto de recortar (pero no recorta), proporcionando **100 W** a la carga, una señal de entrada mucho más grande hará que la salida sea casi una onda cuadrada, entregando a la carga **200 W** y no **100 W**.

La consecuencia de lo anterior es que al distorsionar el amplificador entrega a la carga *más potencia* que la prevista, y ello implica que la carga, es decir el altavoz, puede destruirse. En consecuencia, *hay que asegurarse de que la potencia del amplificador no sea mayor que la mitad de la potencia de pico máxima del altavoz o caja acústica*. El valor resultante de este criterio normalmente resulta *mayor* que la **potencia media máxima**. Si con este sistema fueran a reproducirse señales artificiales, como una onda senoidal de gran duración y gran amplitud, ciertamente se pondría en peligro el altavoz. Normalmente, por el contrario, lo que se utiliza son señales musicales, para las cuales el límite es la **potencia de programa máxima**, por lo cual ese inconveniente no se producirá. El segundo criterio a aplicar (junto al anterior) es que el amplificador debería ser capaz de entregar una potencia similar a la **potencia de programa máxima**, para evitar distorsiones al utilizar las cajas cerca de sus prestaciones máximas.

Por ejemplo, una caja de **4 Ω** que admita **250 W** de potencia media máxima **400 W** de potencia de programa máxima y **900 W** de potencia de pico máxima, podrá ser utilizada con un amplificador de **400 W** de potencia máxima sobre **4 Ω** , ya que no se supera en ningún caso la potencia de pico, y tampoco producirá recortes con señales musicales típicas.

10.7. Impedancia nominal

Pasemos ahora a otra especificación fundamental de los altavoces o cajas acústicas: la **impedancia nominal**. Para comprender el alcance preciso de este dato, tengamos en cuenta que un altavoz sin montar en una caja acústica posee cierta frecuencia de resonancia para la cual la impedancia es máxima. Por encima de dicha frecuencia la impedancia decrece, llega a un mínimo, y luego aumenta nuevamente, según se muestra en la **Figura 10.9**. Dicho mínimo sería la impedancia nominal. El máximo puede ser

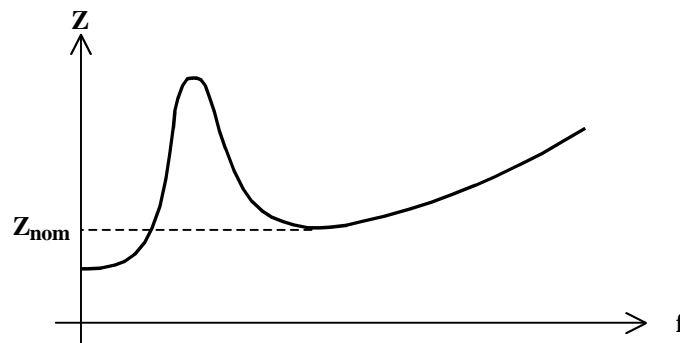


Figura 10.9. Curva de la impedancia de un altavoz sin montar, en función de la frecuencia de la señal que se le aplica. La **impedancia nominal** es la impedancia mínima después de la resonancia.

unas **4 ó 5** veces mayor que la impedancia nominal. En realidad, la curva anterior se modifica cuando el altavoz se monta en un gabinete o caja acústica, debido a la influencia del gabinete sobre las características mecánicas del altavoz. A esto se agrega el hecho de que muchas veces en un mismo gabinete se incluyen dos o más altavoces de diferentes rangos, por lo que las curvas de impedancia se combinan para dar una curva compuesta que puede incluir varias resonancias, como se muestra en la **Figura 10.10**.

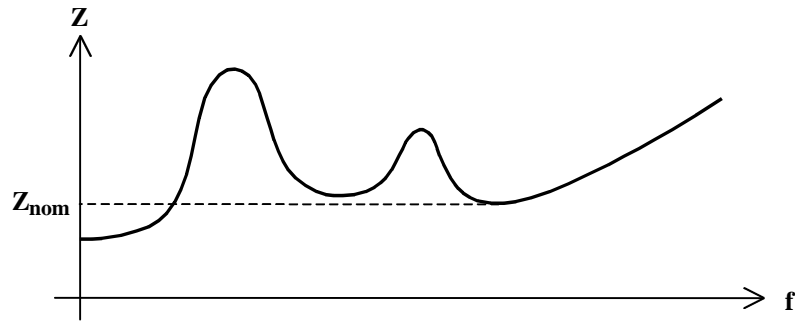


Figura 10.10. Curva de la impedancia de una caja acústica de dos vías, en función de la frecuencia de la señal que se le aplica. La **impedancia nominal** es la impedancia mínima después de las resonancias.

En la mayoría de los casos se puede esperar razonablemente que la impedancia nominal sea la impedancia medida a una frecuencia de **1 kHz**, aunque ello no es una definición sino una observación empírica de diversas cajas acústicas.

La impedancia nominal puede ser utilizada para hacer cálculos de potencia, ya que donde se da el mínimo la impedancia equivalente es de tipo resistivo, es decir que no hay defasaje entre la tensión y la corriente, y entonces valen las expresiones de la potencia vistas oportunamente.

10.8. Sensibilidad

La siguiente especificación es la **sensibilidad (sensitivity)**, y está relacionada con el nivel de presión sonora que se puede obtener de la caja acústica con una dada potencia. Se define como el nivel de presión sonora a **1 m** de distancia (sobre el eje) cuando se aplica una potencia eléctrica de **1 W**. A veces se especifica directamente como nivel de presión sonora (**SPL**) a **1 m** y **1 W**, sin utilizar la palabra “sensibilidad”.

A partir de este valor se puede determinar el nivel de presión sonora a la misma distancia con cualquier potencia. Consideremos, por ejemplo, una caja de **200 W** cuya sensibilidad es de **95 dB**, y supongamos que queremos saber el nivel de presión sonora a una potencia de las tres cuartas partes de la nominal, es decir, **150 W**. Entonces el incremento del nivel de presión sonora en **dB** será

$$\Delta NPS = 10 \log_{10} \frac{150 \text{ W}}{1 \text{ W}} \cong 22 \text{ dB} ,$$

de donde el nuevo nivel de presión sonora (a **1 m** de distancia) será

$$\text{NPS} = 95 \text{ dB} + 22 \text{ dB} = 117 \text{ dB} .$$

No es tan sencillo determinar el nivel de presión sonora a una distancia diferente de **1 m**, ya que no depende sólo del baffle sino de las características acústicas del ambiente en donde se lo utiliza. En realidad, la medición de la sensibilidad debe realizarse en una **cámara anecoica**, es decir en una sala en la cual por medio del recubrimiento de todas sus superficies con materiales de gran absorción acústica se han eliminado casi totalmente los *ecos* o *reflexiones* del sonido. A falta de una cámara anecoica (que es un ambiente muy costoso y por consiguiente pocos laboratorios la poseen), la medición se efectúa al aire libre, lejos de toda superficie y procurando que el ruido ambiente sea bajo. Cuando se hace funcionar el baffle en un ambiente acústico *con reflexiones*, tal como cualquier habitación o sala normal, la presión sonora es el resultado del **campo directo** (*sonido proveniente del baffle*) y del **campo reverberante** (*sonido proveniente de las múltiples reflexiones*). A una distancia de **1 m** podemos aceptar que predomina el campo directo, por eso es que el verdadero nivel de presión sonora prácticamente coincide con la sensibilidad, pero no sucede lo mismo a distancias mucho mayores.

Es posible estimar la variación del nivel de presión sonora al pasar de una distancia de **1 m** a una distancia cualquiera **d** mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta \text{NPS} = 10 \log_{10} \frac{\frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S}}{\frac{Q}{4\pi (1 \text{ m})^2} + \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S}} ,$$

donde $\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción promedio, **S** es la superficie de la sala, y **Q** es el factor de directividad del altavoz, que para bajas frecuencias es **1** y para altas frecuencias depende del ángulo de cobertura de la bocina, y es en general mucho mayor que **1**.

A modo de ejemplo, supongamos un salón de **15 m × 12 m × 6 m** con un coeficiente de absorción promedio de **0,2** y un baffle de graves (baja frecuencia) con una sensibilidad de **98 dB** (a **1 m** y **1W**), excitado con una potencia de **100 W**. Queremos saber qué nivel de presión sonora habrá a **6 m** de distancia. Para resolverlo, teniendo en cuenta que por ser baja frecuencia tendremos **Q = 1**, y además

$$S = 2 \times 15 \times 12 + 2 \times 15 \times 6 + 2 \times 12 \times 6 = 630 \text{ m}^2 ,$$

sustituimos en la fórmula

$$\Delta \text{NPS} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{4\pi (6 \text{ m})^2} + \frac{4 \times (1 - 0,2)}{0,2 \times 630 \text{ m}^2}}{\frac{1}{4\pi (1 \text{ m})^2} + \frac{4 \times (1 - 0,2)}{0,2 \times 630 \text{ m}^2}} = -6 \text{ dB} ,$$

y entonces el nivel de presión sonora será

$$\text{NPS} = 98 \text{ dB} + 10 \log_{10} \frac{100 \text{ W}}{1 \text{ W}} - 6 \text{ dB} = 112 \text{ dB}$$

Si no hubiera reflexiones ($\alpha = 1$), es decir si ubicáramos el altavoz al aire libre o en una cámara anecoica, el resultado sería

$$\Delta \text{NPS} = 10 \log_{10} \frac{(1 \text{ m})^2}{(6 \text{ m})^2} = -16 \text{ dB} ,$$

y entonces

$$\text{NPS} = 98 \text{ dB} + 10 \log_{10} \frac{100 \text{ W}}{1 \text{ W}} - 16 \text{ dB} = 102 \text{ dB} .$$

Vemos que la existencia de reflexiones en este caso aumentó el nivel sonoro en **10 dB**. Hay que aclarar que en el caso de altas frecuencias, el aumento es menor, ya que en primer lugar el factor de directividad **Q** es mucho más alto que **1**, y en segundo lugar la absorción sonora para alta frecuencia es mayor, de modo que la diferencia no es tan grande, y hasta puede ser insignificante.

10.9. Respuesta en frecuencia

La siguiente especificación es la **respuesta en frecuencia**. Nuevamente, cabría aquí distinguir la respuesta en frecuencia de los altavoces individuales de la respuesta en frecuencia de una caja acústica, ya sea que conste de un solo altavoz o de varios de ellos cubriendo diversos rangos. La respuesta en frecuencia es una gráfica que indica cómo varía la sensibilidad del altavoz o baffle con la frecuencia (**Figura 10.11**). De todos los componentes de audio, probablemente sea el altavoz el más imperfecto, y por ello comúnmente la respuesta en frecuencia resulta más irregular que la del micrófono y mucho más que la del amplificador. Así, no son raras fluctuaciones de hasta **10 dB**

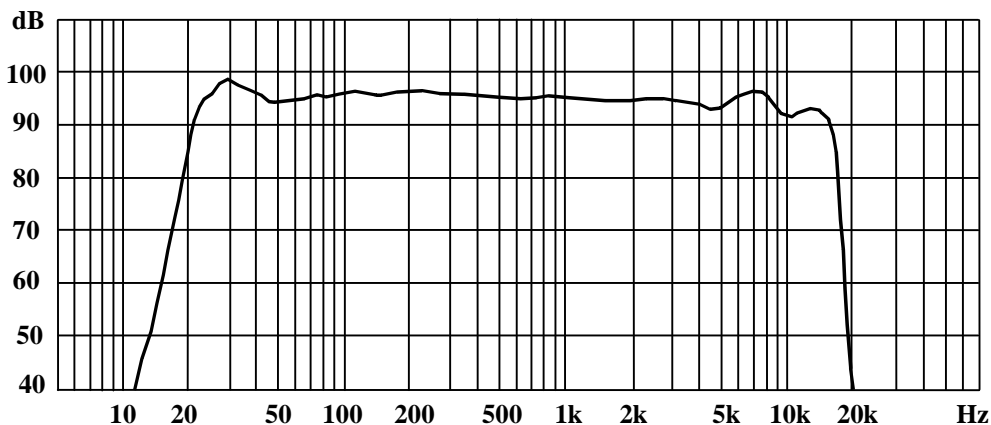


Figura 10.11. Respuesta en frecuencia de una caja acústica .

dentro de la banda de paso (es decir la región de frecuencias donde el altavoz es efectivo). El uso de adecuados diseños en la caja acústica puede atenuar dichas fluctuaciones, pero las mismas siempre existirán en menor o mayor grado. Otra manera de especificar la respuesta en frecuencia es como rango de frecuencias, por ejemplo:

40 Hz a 18 kHz, ± 3 dB .

Esta especificación brinda menos información, pero a menudo es suficiente para seleccionar un componente.

10.10. Direccionalidad

La sensibilidad de un baffle también fluctúa con la dirección, debido a fenómenos de interferencia o cancelación entre las ondas provenientes de distintos puntos del diafragma, en el caso de los altavoces de radiación directa, o debido al patrón direccional de la bocina en los otros casos. A esto se agrega la propia interferencia del gabinete, especialmente notoria en altas frecuencias, para las cuales la longitud de onda entra en competencia con su tamaño. Todo esto da origen a un determinado patrón direccional, según se aprecia en el ejemplo de la **Figura 10.12**. En realidad hay un diagrama direccional horizontal (**Figura 10.12**) y otro vertical (**Figura 10.13**), ya que los baffles no son simétricos. En ambos casos los diagramas respectivos corresponden a mediciones efectuadas en una **cámara** o **sala anecoica** (sin eco).

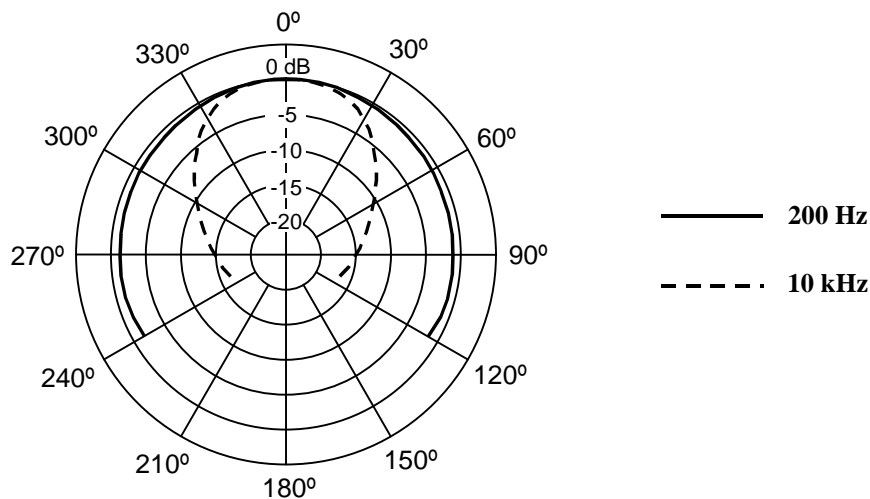


Figura 10.12. Diagrama direccional de un baffle en el plano horizontal. El patrón polar resulta simétrico por la simetría horizontal del baffle, y en alta frecuencia es muy unidireccional.

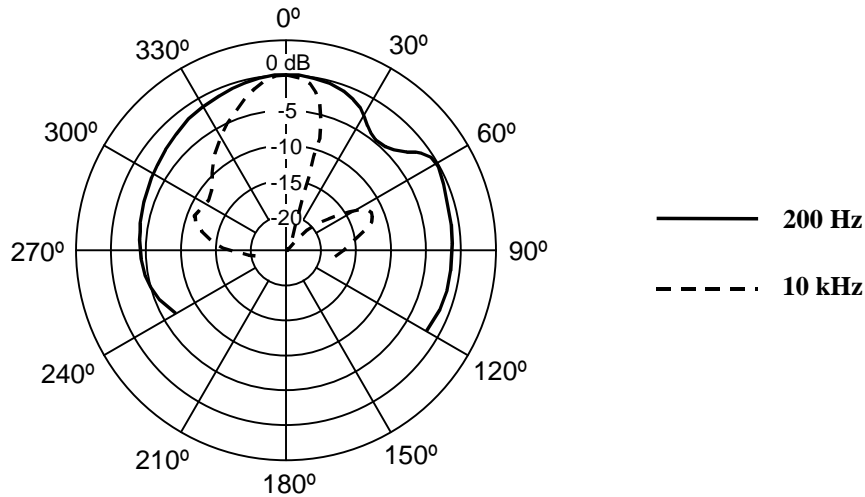


Figura 10.13. Diagrama direccional de un baffle en el plano vertical. El patrón polar es muy asimétrico y la asimetría se profundiza en alta frecuencia.

Es interesante puntualizar que las cajas acústicas de alta frecuencia, debido a sus bocinas, son muy direccionales. Suele especificarse el ángulo de cobertura o *ancho de haz*, es decir el ángulo que pueden cubrir con una caída de su sensibilidad no mayor de 6 dB. Por ese motivo se recomienda que las mismas se enfoquen directamente al público y sin obstáculos, como podrían ser columnas, elementos de decorado, etc. En aquellos casos en que el público ocupa un ángulo mayor que el de cobertura se utilizan *clusters*, es decir grupos de altavoces orientados de tal manera que cada uno cubra una parte del público. Un ejemplo son los teatros con plateas altas, balcones o tertulias. En ese caso un par de altavoces cubrirá la platea baja, otro la platea alta, y así sucesivamente. Desde luego, debe preverse el montaje adecuado para lograr esta orientación no horizontal.

Otra consideración importante es la de procurar que las cajas de baja frecuencia y de alta frecuencia de cada canal se encuentren concentradas en un mismo lugar. Esto es para evitar modificar la sensación de direccionalidad de procedencia del sonido. De estar muy separadas podría crearse una sensación de que la fuente es difusa, lo cual perjudica la inteligibilidad de la palabra y de la música.

Capítulo 11

Filtros y ecualizadores

11.1. Introducción

Hasta ahora hemos estudiado dos tipos de procesadores de señal: los *transductores*, que transforman señales de un tipo de energía en otro (micrófonos y altavoces) y los *amplificadores*, que modifican (aumentan) la amplitud o nivel de la señal. Ahora estudiaremos los **filtros**, procesadores que actúan modificando el *espectro* de la señal.

La utilización de filtros en el equipamiento electrónico es muy amplia y abarcativa, ya que son muchas las situaciones en que se requiere acentuar o atenuar determinadas frecuencias. Internamente, por ejemplo, aparecen filtros a la entrada de los diversos procesadores para evitar la presencia de señales de muy baja o muy alta frecuencia que sin ser útiles implican el agregado de ruido al sistema. También es necesario filtrar la señal que se envía a un cabezal de grabación magnética para *preenfatizar* las bajas frecuencias, que por la naturaleza propia del sistema de grabación se graban más débilmente. Técnicas parecidas se utilizaban en los discos de vinilo tradicionales. También se emplean filtros para separar la señal en sus componentes espectrales de baja, media y alta frecuencia dentro de los gabinetes acústicos de múltiples vías. Finalmente, podemos mencionar los filtros “antialias” y de “suavizado” que se utilizan en audio digital (desarrollados más adelante).

Desde el punto de vista del usuario, existen varios ejemplos de aplicación de filtros: los **filtros pasaaltos** o **pasabajos** que opcionalmente pueden intercalarse en las entradas de algunas consolas para evitar el ingreso de ruidos de muy baja o muy alta frecuencia, las **redes divisoras de frecuencia (crossover)** utilizadas en los sistemas de bi- o triamplificación, y los **ecualizadores**, que permiten corregir deficiencias en la respuesta en frecuencia de un sistema.

11.2. Filtros pasabajos y pasaaltos

Los **filtros pasabajos (PB)** son dispositivos que, intercalados en el camino de la señal, permiten pasar todas las frecuencias que están por debajo de cierta frecuencia llamada **frecuencia superior de corte**, bloqueando en cambio las frecuencias superiores a la misma. En la práctica, los filtros pasabajos reales *no bloquean totalmente* las altas frecuencias, sino que las atenúan a razón de una cierta cantidad de **dB** por octava.

Los valores típicos de atenuaciones son -6 dB/oct , -12 dB/oct y -18 dB/oct (ver **Figura 11.1**).

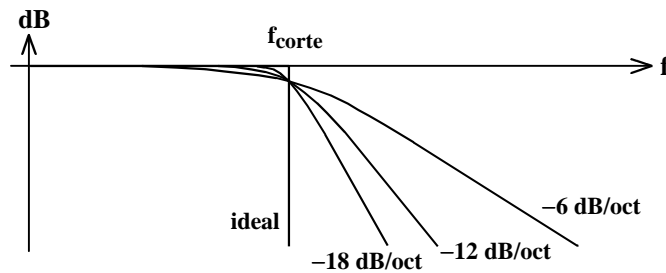


Figura 11.1. Respuesta en frecuencia de un filtro pasabajos ideal y de tres pasabajos reales con diferentes pendientes de corte.

Los filtros pasabajos se utilizan con frecuencias de corte que varían entre **3 kHz** y **20 kHz**. Se aplican para eliminar ruido de alta frecuencia en señales de banda limitada. Por ejemplo, una señal grabada con un micrófono con respuesta en frecuencia hasta **12 kHz** podría contener ruido de cinta de frecuencias mayores de **12 kHz**, que sería deseable eliminar. Un caso típico puede ser cuando se graba una voz o una percusión grave. Si bien la señal original no contiene frecuencias más allá de **8 kHz**, en el proceso de grabación se agrega ruido que de no eliminarse, incrementará el ruido de alta frecuencia innecesariamente.

Los **filtros pasaaltos (PA)** cumplen la función opuesta a la de los pasabajos: intercalados en el camino de la señal bloquean las frecuencias menores que la **frecuencia inferior de corte**, dejando inalterada la señal por encima de dicha frecuencia. Igual que los pasabajos, los pasaaltos reales permiten hasta cierto punto el paso de las bajas frecuencias atenuadas. En la ver **Figura 11.2** se ilustra esta situación. Los filtros pasaaltos

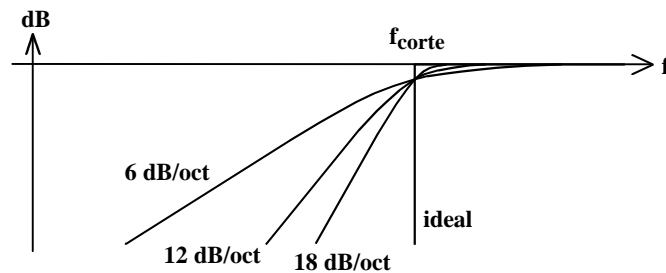


Figura 11.2. Respuesta en frecuencia de un filtro pasaaltos ideal y de tres pasaaltos reales con diferentes pendientes de corte.

se utilizan esencialmente con la misma finalidad que los pasabajos: la eliminación de bandas de frecuencia que únicamente aportan ruido. En este caso se trata de ruido de baja frecuencia que podría provenir de vibraciones estructurales del edificio en general, de sistemas de ventilación insuficientemente insonorizados, de pasos, de la manipula-

ción del micrófono, etc. Es bastante común que las consolas de mezcla provean un filtro opcional de este tipo que puede intercalarse a la entrada reduciendo el ruido sin alterar el material de programa. La frecuencia de corte suele estar entre **20 Hz** y **100 Hz**.

11.3. Redes divisoras de frecuencia

Cuando estudiamos los altavoces, vimos que existían unidades fabricadas para cubrir rangos limitados de frecuencia, debido a las dificultades contrapuestas inherentes al comportamiento de un altavoz en alta y baja frecuencia. Por este motivo era necesario cubrir con un sistema de dos o más altavoces el rango de frecuencias completo de la señal de audio.

Cada altavoz del sistema responde, acústicamente, a la porción de la señal comprendida en su rango de frecuencias específico, pero *eléctricamente* responde a todo lo que recibe. Por consiguiente, si enviáramos toda la señal a cada altavoz, no sólo se estaría desperdiciando potencia eléctrica, sino que a demás se estaría sometiendo a los altavoces a una gran sobrecarga. Por esta razón es necesario efectuar una separación de la señal en rangos de frecuencia según los altavoces a utilizar. Esta separación se realiza mediante **redes divisoras de frecuencia**, o **redes crossover**.

En el caso de sistemas de pequeña o mediana potencia, los gabinetes acústicos contienen dos o tres altavoces juntos, cubriendo los diferentes rangos de frecuencia, y la red crossover correspondiente es pasiva (es decir, construida utilizando capacitores y bobinas). En este caso el gabinete recibe una única señal de potencia, proveniente de un solo amplificador, y la división se efectúa, a nivel de potencia, en el propio gabinete (ver **Figura 11.3**). En el caso de grandes potencias (típicamente mayores de **100 W**), este enfoque tiene serias dificultades. Las bobinas deberían ser de grandes dimensiones para poder administrar tanta potencia, el rendimiento de las cajas se reduciría, y deberían hacerse provisiones para desprenderse del calor generado por el recalentamiento de los componentes pasivos. Por estas razones se utiliza otro enfoque, consistente en realizar la división de frecuencias *antes* de la amplificación, y luego amplificar

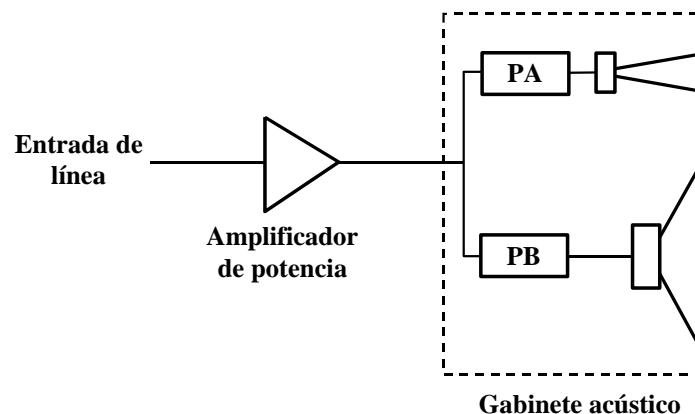


Figura 11.3. Sistema de amplificación tradicional con divisor de frecuencias pasivo en el propio gabinete. **PA** y **PB** denotan los filtros pasabajas y pasabajos del divisor pasivo.

por separado cada una de las señales así obtenidas. Este esquema se denomina genéricamente **multiamplificación** (**bi**amplificación en el caso de dos vías, **tri**amplificación en el caso de tres, etc.), y se ilustra en la **Figura 11.4**.

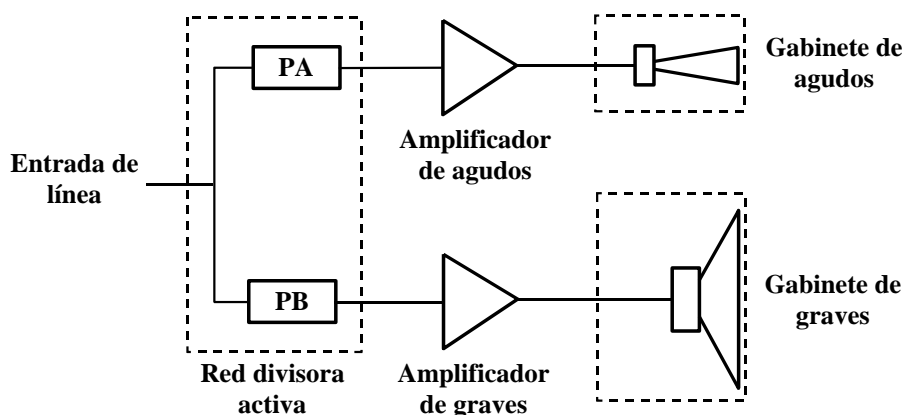


Figura 11.4. Sistema de biamplificación con divisor de frecuencias activo antes de la amplificación. **PA** y **PB** denotan los filtros pasaaltos y pasabajos del divisor activo.

Los filtros utilizados en el caso de la multiamplificación son activos, es decir que contienen amplificadores, resistencias y capacitores, evitándose así el uso de las bobinas, (que en el caso anterior era imprescindible ya que un filtro activo de potencia sería de hecho más complejo y tendría menor rendimiento que la propia multiamplificación).

Los sistemas multiamplificados presentan varias ventajas frente a los tradicionales. En primer lugar, dado que la potencia se reparte en dos o más amplificadores, cada uno de ellos resulta de menor potencia que si se usara un solo amplificador. En segundo lugar, la distorsión se reduce, debido a que la distorsión en una de las vías no tiene ninguna repercusión en la otra u otras. Esto es especialmente cierto con la distorsión en los graves. En un sistema tradicional, la sobrecarga en los graves implica la generación de armónicos de alta frecuencia que pasan sin inconvenientes por el filtro pasaaltos del divisor, apareciendo en los altavoces de alta frecuencia. En un sistema multiamplificado, como la división de frecuencias se realiza a bajo nivel de señal, donde no hay posibilidad de tener distorsiones severas, dichos armónicos se circunscriben al altavoz de baja frecuencia, donde tienen muy poca influencia debido a que la respuesta en alta frecuencia de dichos altavoces cae rápidamente. Se aprovecha así favorablemente una limitación del altavoz para combatir la distorsión. En tercer lugar, aunque normalmente no se echa mano de este recurso, podrían utilizarse amplificadores de respuesta en frecuencia más restringida, con lo cual se podría optimizar el comportamiento en lo que respecta a ruido y reducir el costo del equipo, ya que no se requeriría de un amplificador de excelentes prestaciones en toda la banda de audio sino en regiones más restringidas.

Se encuentran disponibles en el mercado redes crossover activas de diversos tipos, en las cuales es posible seleccionar la o las frecuencias de cruce, es decir las frecuencias que limitan las bandas en las que se divide el espectro de audio, así como controlar in-

dependientemente las ganancias en cada banda, de modo de acomodarse a diferencias de sensibilidad de los diversos altavoces utilizados.

Las especificaciones técnicas incluyen los parámetros habituales, relativos a respuesta en frecuencia, distorsión, impedancias de entrada y salida, relación señal a ruido, etc., para los cuales caben los mismos comentarios que para el caso de los amplificadores.

11.4. Ecualizadores

Un ecualizador permite aumentar o reducir la ganancia selectivamente en tres o más frecuencias. De este modo es posible resaltar frecuencias que estaban originalmente debilitadas, o atenuar otras de nivel excesivo. El ecualizador más sencillo es el clásico **control de tono**, que permite controlar según convenga tres grandes bandas fijas de frecuencia, denominadas genéricamente **graves**, **medios** y **agudos**.

Existen dos tipos de ecualizadores: los **ecualizadores gráficos** o **de bandas** (por ejemplo los ecualizadores de octava, o de tercio de octava), que poseen varias bandas fijas (normalmente entre **5** y **31** bandas), y los **ecualizadores paramétricos**, que poseen una o más frecuencias ajustables, además de otras fijas. Los más difundidos son los ecualizadores gráficos, aunque en general las consolas suelen incluir en cada canal de entrada un sencillo ecualizador paramétrico o semiparamétrico.

11.5. Ecualizadores gráficos

Analicemos primero los ecualizadores gráficos. Como ya se señaló, están divididos en bandas de frecuencia. Cada banda está centrada en una frecuencia determinada, perteneciente a una lista estándar de frecuencias seleccionadas para que la relación entre dos frecuencias consecutivas sea aproximadamente constante. Así, en los ecualizadores de **bandas de octava**, las frecuencias están elegidas de modo que cada frecuencia sea el doble de la anterior (ya que subir una octava equivale a multiplicar por **2**). En los ecualizadores por bandas de **tercio de octava**, por otra parte, cada frecuencia es aproximadamente un **25 %** mayor que la anterior. En la **Tabla 11.1** se resumen las frecuencias estándar para ecualizadores de distintas resoluciones.

Es interesante observar que para un ecualizador de resolución dada, por ejemplo de bandas de octava, el ancho de cada banda en **Hz** aumenta con la frecuencia, de modo que en un gráfico con escala lineal de frecuencia, las primeras bandas están muy comprimidas (ver **Figura 11.5**). En un gráfico con escala de frecuencia logarítmica (el típico gráfico que se utiliza en la especificación de las respuestas en frecuencia), en cambio, el espaciado es uniforme (ver **Figura 11.6**).

Para el ajuste de la ganancia o atenuación, los ecualizadores gráficos cuentan con un potenciómetro deslizable vertical en cada banda graduado en **dB**, cuya posición central o neutra corresponde a **0 dB**, es decir una ganancia **1** (salida igual a la entrada). En la posición más alta se tiene una ganancia máxima típicamente de **12 dB**, es decir una ganancia **4** (aunque en algunos equipos puede conmutarse entre **6 dB** y **12 dB**, y en otros se llega hasta **18 dB**), y en la posición más baja una atenuación de **-12 dB** (ó **-6 dB**, ó **-18 dB**), correspondiente a una *reducción* de la señal en un factor **4**.

Tabla 1. Frecuencias estándar que se utilizan en los ecualizadores de bandas de octava, $2/3$ de octava, $1/2$ octava y $1/3$ octava.

| f [Hz] | 1 | 2/3 | 1/2 | 1/3 | f [Hz] | 1 | 2/3 | 1/2 | 1/3 | f [Hz] | 1 | 2/3 | 1/2 | 1/3 |
|--------|---|-----|-----|-----|--------|---|-----|-----|-----|--------|---|-----|-----|-----|
| 20 | | | | * | 200 | | | | * | 2.000 | * | | * | * |
| 22,4 | | | * | | 224 | | | | | 2.240 | | | | |
| 25 | | * | | * | 250 | * | * | * | * | 2.500 | | * | | * |
| 28 | | | | | 280 | | | | | 2.800 | | | * | |
| 31,5 | * | | * | * | 315 | | | | * | 3.150 | | | | * |
| 35,5 | | | | | 355 | | | * | | 3.550 | | | | |
| 40 | | * | | * | 400 | | * | | * | 4.000 | * | * | * | * |
| 45 | | | * | | 450 | | | | | 4.500 | | | | |
| 50 | | | | * | 500 | * | | * | * | 5.000 | | | | * |
| 56 | | | | | 560 | | | | | 5.600 | | | * | |
| 63 | * | * | * | * | 630 | | * | | * | 6.300 | | * | | * |
| 71 | | | | | 710 | | | * | | 7.100 | | | | |
| 80 | | | | * | 800 | | | | * | 8.000 | * | | * | * |
| 90 | | | * | | 900 | | | | | 9.000 | | | | |
| 100 | | * | | * | 1.000 | * | * | * | * | 10.000 | | * | | * |
| 112 | | | | | 1.120 | | | | | 11.200 | | | * | |
| 125 | * | | * | * | 1.250 | | | | * | 12.500 | | | | * |
| 140 | | | | | 1.400 | | | * | | 14.000 | | | | |
| 160 | | * | | * | 1.600 | | * | | * | 16.000 | * | * | * | * |
| 180 | | | * | | 1.800 | | | | | 18.000 | | | | |
| | | | | | | | | | | 20.000 | | | | * |

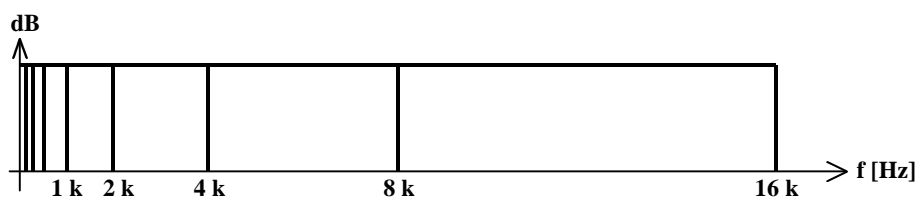


Figura 11.5. Frecuencias centrales de las bandas de octava representadas en un diagrama con eje de frecuencias lineal. Las frecuencias menores de 1 kHz no han sido rotuladas y las inferiores a 125 Hz directamente se han omitido.

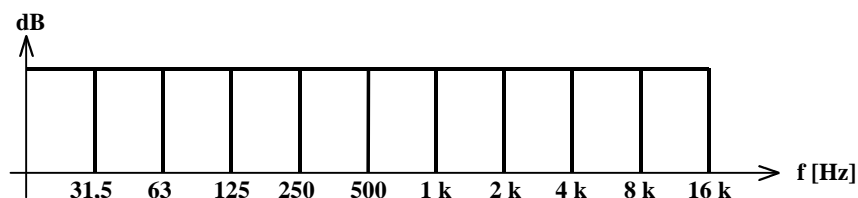


Figura 11.6. Frecuencias centrales de las bandas de octava representadas en un diagrama con eje de frecuencias logarítmico.

En la ver **Figura 11.7** se muestra el aspecto que presentan los controles de un ecualizador de bandas de octava cuando están todos en la posición central. La respuesta en frecuencia resulta en ese caso plana en toda la banda de audiofrecuencias, como se indica en la **Figura 11.8**. Las caídas a uno y otro lado de dicha banda son las normales en todo equipo de audio, colocadas ex profeso para reducir el ruido fuera de la banda de interés (ya que si bien se trata de un ruido inaudible, consume potencia y resta rango dinámico a la señal útil).

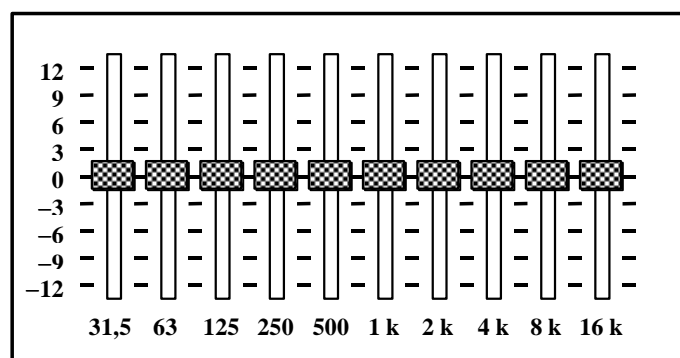


Figura 11.7. Ecualizador de bandas de octava con todos los controles en su posición central (neutra). La respuesta en frecuencia resulta plana en toda la banda de audiofrecuencia.

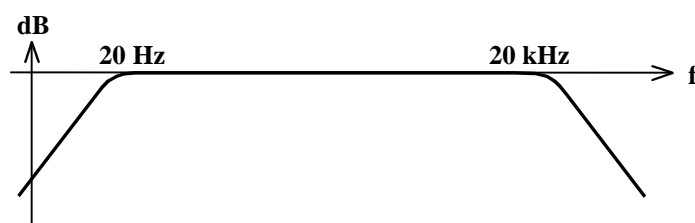


Figura 11.8. Respuesta en frecuencia de un ecualizador de bandas de octava con los controles como en la **Figura 11.7**.

Si se eleva una de las bandas hasta el valor máximo de **12 dB** (**Figura 11.9**), el punto central de dicha banda se enfatizará en **12 dB**, pero el resto de la banda lo hará en menor cuantía. Debido a que los filtros no son ideales, fuera de la banda habrá cierta ganancia residual que se atenúa rápidamente al alejarse de la banda (**Figura 11.10**).

Si, en cambio, se lleva una banda al valor mínimo de **-12 dB** (**Figura 11.11**), el punto central de dicha banda quedará atenuado en **12 dB**. El resto de la banda se atenuará menos, y debido a la no idealidad habrá cierta atenuación residual aún fuera de la banda (**Figura 11.12**).

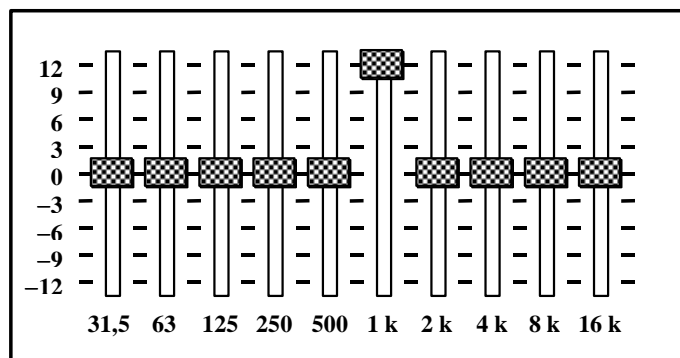


Figura 11.9. Posición de los controles después de acentuar al máximo la frecuencia de **1 kHz**.

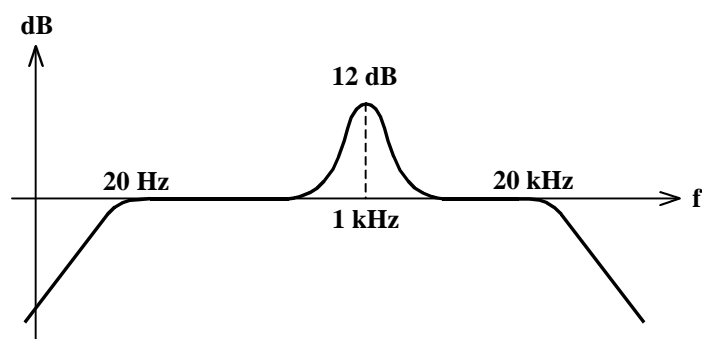


Figura 11.10. Respuesta en frecuencia de un ecualizador de bandas de octava con los controles como en la **Figura 11.9** (la frecuencia de **1 kHz** acentuada al máximo).

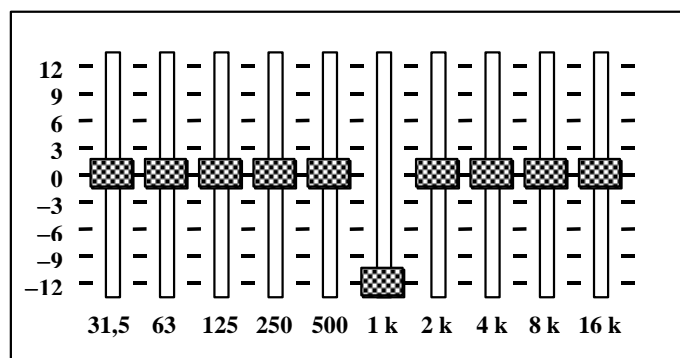


Figura 11.11. Posición de los controles después de atenuar al máximo la frecuencia de **1 kHz**.

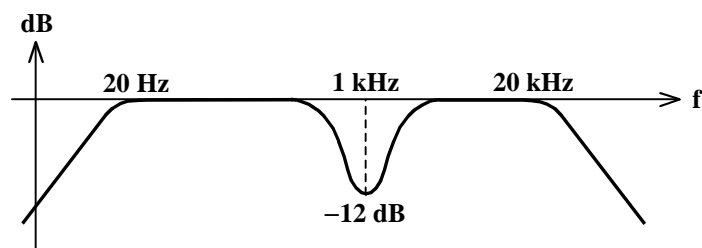


Figura 11.12. Respuesta en frecuencia de un ecualizador de bandas de octava con los controles como en la **Figura 11.11** (la frecuencia de 1 kHz atenuada al máximo).

En la **Figura 11.13** se muestra una ecualización más general, y en la **Figura 11.14** se muestra la correspondiente respuesta en frecuencia. Se observa que la disposición de los potenciómetros deslizantes es una analogía gráfica bastante representativa de dicha respuesta en frecuencia (salvo las frecuencias muy altas y muy bajas, en donde actúan los filtros pasabajos y pasaaltos incluidos dentro del ecualizador). Esa es la razón por la que estos ecualizadores se denominan *ecualizadores gráficos*.

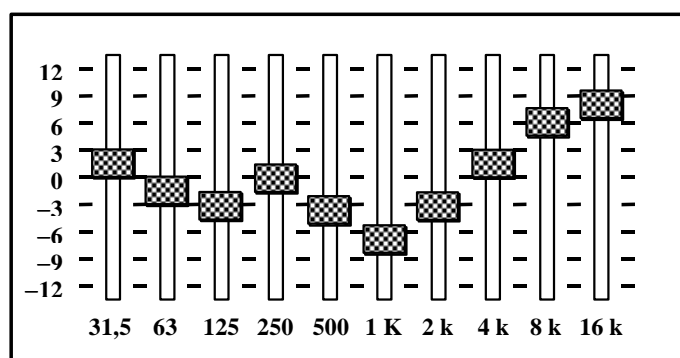


Figura 11.13. Posición de los controles después de una ecualización determinada.

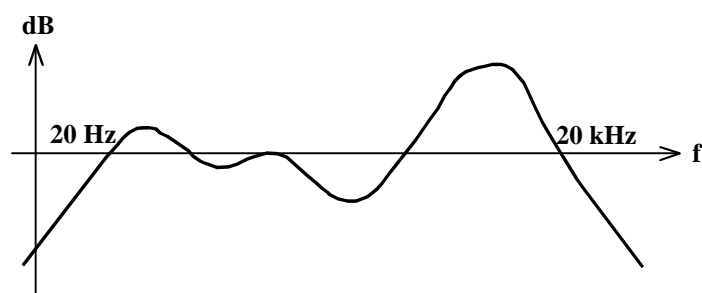


Figura 11.14. Respuesta en frecuencia de un ecualizador de bandas de octava con los controles como en la **Figura 11.13**.

Es importante tener en cuenta lo siguiente. Si todos los controles se elevan al máximo, idealmente se obtendría una respuesta plana entre **20 Hz** y **20 kHz**, con una ganancia de **12 dB**, es decir **4**. En la práctica se obtiene la respuesta indicada en la **Figura 11.15**, en la cual se aprecia la existencia de una ondulación en la curva de respuesta en frecuencia que puede alcanzar o aún superar los **2 dB**. Si bien desde el punto de vista de una señal de régimen permanente (por ejemplo una senoide o una onda cuadrada de gran duración) es difícil apreciar la diferencia entre esta respuesta y la ideal, la palabra y la música (señales mucho más probables en la práctica) distan de constituir un régimen permanente, siendo más bien el resultado de una sucesión de transitorios (sonidos de corta duración). El efecto más notorio en la respuesta transitoria es la presencia de pequeños campanilleos de frecuencias cercanas a las frecuencias centrales de las bandas, que se superponen creando un ruido audible, especialmente en los sonidos cortos de tipo percusivo.

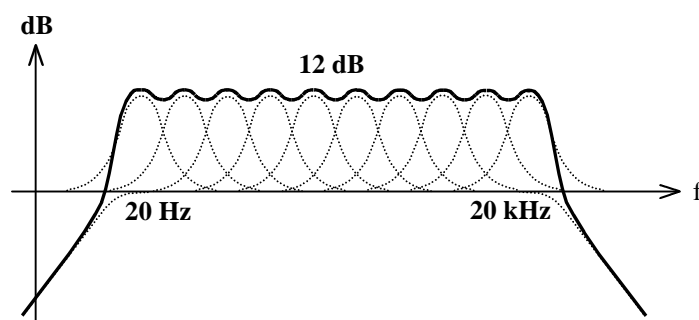


Figura 11.15. Respuesta en frecuencia de un ecualizador de bandas de octava con todos los controles en su extremo superior. En líneas de puntos se han indicado la respuesta “plana” del ecualizador y las respuestas individuales de cada banda.

Por este motivo *no es recomendable asignar al ecualizador una función que no le es propia* como es contribuir a dar ganancia a la señal. Es preferible encomendar esa función a alguno o algunos de los varios controles dispuestos para ajuste de nivel tanto en las consolas como en los procesadores. En realidad algunos ecualizadores de hecho poseen controles a tal fin, y es preferible utilizarlos en lugar de dar ganancia subiendo todas las bandas. Los mismos comentarios son válidos para la atenuación. Un criterio saludable para una ecualización satisfactoria es verificar que haya aproximadamente el mismo número de controles por encima y por debajo de la línea de **0 dB**. De esta manera se reduce tanto el ruido de campanilleo (dependiente de la señal) como el ruido propio del ecualizador (ruido intrínseco).

En cuanto a las especificaciones de los ecualizadores gráficos, se encuentran las que son comunes a los diversos componentes de un sistema de audio: impedancias de entrada y salida, máxima salida, distorsión total armónica (con salida máxima), respuesta en frecuencia (con todos los controles en **0 dB**, es decir planos), y ruido. En este caso es común especificar los valores de ruido (o de la relación señal/ruido) para varias posiciones de los controles, como ser todos en **0 dB**, todos en **-12 dB**, y todos en **12 dB**. Como puede suponerse, en general el ruido es menor con los controles en **0 dB**.

Existen varias aplicaciones de los ecualizadores gráficos, entre las cuales pueden citarse el retoque tonal de diversos instrumentos musicales, la utilización como complemento de diversos efectos y procesadores, y la compensación de deficiencias en un sistema de audio. De todas ellas, la última es la aplicación más representativa. Para comprender la naturaleza del problema, debe observarse primero que un sistema de audio comprende no sólo los diversos micrófonos, altavoces y equipos electrónicos utilizados, sino también el ambiente acústico en el cual los mismos habrán de funcionar. Cualquiera de las partes involucradas puede contribuir con defectos en cuanto a la respuesta en frecuencia. Así, un amplificador puede tener algunas irregularidades leves en la respuesta en frecuencia; un micrófono tiene irregularidades importantes por encima de los **8 ó 10 kHz**; una caja acústica presenta no sólo irregularidades en el patrón direccional, sino que además exhibe altibajos en su respuesta en frecuencia debido entre otras cosas a sus propias resonancias, a la imperfección de las redes divisoras de frecuencia para las distintas vías, etc. Por último, el ambiente donde se instala el equipo puede tener absorciones a diversas frecuencias que atenúan algunas frecuencias más que otras, o puede contener resonancias a determinadas frecuencias (originadas en ondas estacionarias), que podrían acentuar las señales de dichas frecuencias.

Los ecualizadores proporcionan una solución a este género de problemas, permitiendo atenuar las frecuencias que resuenan o resaltar aquellas que son absorbidas. Para ello se intercala antes del amplificador de potencia (o de la red crossover en caso de multiplificación) el ecualizador, que luego debe quedar instalado como parte integral del sistema.

11.6. Ecualización

Para realizar un *ajuste objetivo* del sistema es necesario utilizar **un analizador de espectro en tiempo real** (real-time analyzer, **RTA**), instrumento de medición que muestra en forma gráfica (por pantalla) el espectro de un sonido en cada instante. Más precisamente, proporciona en forma de un gráfico de barras el nivel de presión sonora en cada banda de octava o en cada banda de tercio de octava, según el tipo de analizador. En la **Figura 11.16** se muestra la pantalla de un analizador de bandas de octava.

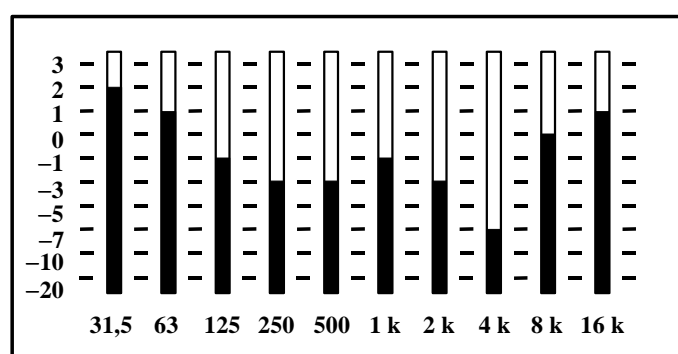


Figura 11.16. Pantalla de un analizador de espectro en tiempo real por bandas de octava. El valor **0 dB** es relativo a la escala seleccionada mediante un selector.

Antes de comenzar con el proceso de ecualización se debe llevar todos los controles de la consola a su posición central. Esto significa que los controles de ganancia o atenuación deben estar en la posición en que la ganancia sea unitaria, y los controles de tono o “ecualizadores” en posición plana. Esto último es muy importante, ya que la ecualización del sistema debe considerarse como un *ajuste de referencia*, lo cual significa que se establece un punto de operación en el cual *se sabe* que la respuesta del sistema es plana. Si posteriormente, por necesidad, gusto, estética o cualquier otra razón se requiere modificar la respuesta en frecuencia parcial de uno o más canales, desde luego podrá hacérselo.

El ajuste se lleva a cabo según el diagrama de bloques de la **Figura 11.17**. Se conecta a una entrada de la consola un **generador de ruido rosa**. Se utiliza este tipo de señal porque contiene la misma cantidad de energía en cada banda de tercio de octava, de manera que si se conectara dicha señal directamente a un analizador de espectro, se obtendría la misma indicación en todas las bandas. Luego se ubica el micrófono del analizador de espectro en la posición en la que se quiere lograr la ecualización. Esto es importante porque la ecualización puede no ser la misma en todos los puntos de una sala, especialmente si ésta tiene defectos acústicos notorios. Por último, se ajustan los controles del ecualizador de manera de tener una indicación pareja en todas las bandas del analizador de espectro.

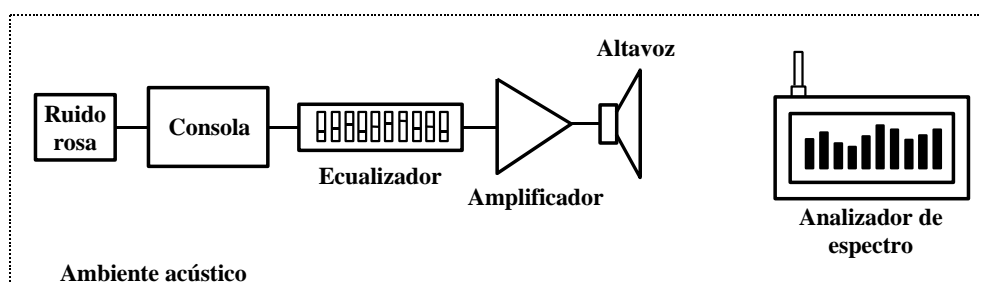


Figura 11.17. Disposición para llevar a cabo la ecualización de un sistema de sonido, incluido el ambiente acústico.

Debe advertirse que el ruido rosa es un ruido de carácter aleatorio, por lo cual varía dinámicamente. Esto implica que la imagen obtenida en la pantalla del analizador no es en realidad estática. En general los analizadores proveen varias velocidades de respuesta. En la velocidad lenta la imagen es más estable que en la rápida. De todas maneras, será necesario efectuar una promediación visual, procurando observar alrededor de qué nivel oscila la indicación en determinada banda.

Si se debe ecualizar una sala de monitoreo de un estudio, será conveniente que la ecualización se realice en el punto en el cual se encontrará el operador, con éste presente, a fin de asegurar que las condiciones de ajuste sean lo más parecidas que sea posible a las condiciones de operación reales del sistema. Si, en cambio, se va a ecualizar una sala de concierto, deberá seleccionarse varias ubicaciones representativas, y realizar un ajuste del ecualizador que sea aproximadamente el promedio de los ajustes en dichas ubicaciones.

Finalmente, hay que advertir que el método de ecualización propuesto es un método *objetivo*, vale decir que su resultado es *una respuesta en frecuencia general plana para el sistema*. Aún cuando esto sería aparentemente lo deseable en todos los casos, ya que provee un punto de partida conocido, una referencia, muchas personas pueden no conformarse con dichos ajustes. Ello puede deberse a diversos factores: el gusto personal, la postura estética, la costumbre de haber operado durante mucho tiempo con un sistema mal ajustado, y las deficiencias auditivas que sufre toda persona que vive en una sociedad ruidosa. Estos motivos pueden llevar a que distintas personas exijan más graves, más medios o más agudos de un sistema de sonido, según el caso. Por ejemplo, podría suceder que un músico afamado requiera siempre de sus sonidistas, tanto para sus grabaciones como para sus espectáculos en vivo, una ecualización con predominancia de agudos. Sus seguidores, aún cuando sus preferencias individuales espontáneas pudieran ser diferentes, estarán acostumbrados a *ése* sonido, y no aceptarán de buen grado ecualizaciones que lo alteren, aún cuando *objetivamente* proporcionen una respuesta más plana y natural. Este ejemplo muestra el tipo de dificultades que se encuentran al intentar definir el “sonido perfecto”, dificultades inherentes a cualquier definición que involucra directa o indirectamente el arte.

11.7. Ecualizadores paramétricos

Pasemos ahora a los ecualizadores paramétricos. Estos ecualizadores se diferencian de los anteriores en que en general tienen menos bandas, pero de frecuencia ajustable. Esto implica la posibilidad de ubicar en forma precisa un defecto acústico (por ejemplo una resonancia) y corregirlo. Para lograr mayor versatilidad también es posible ajustar el ancho de banda, y, por supuesto, la ganancia (como en los ecualizadores gráficos). En la **Figura 11.18** se ilustra el efecto que tiene el ajuste del ancho de banda. En los filtros de

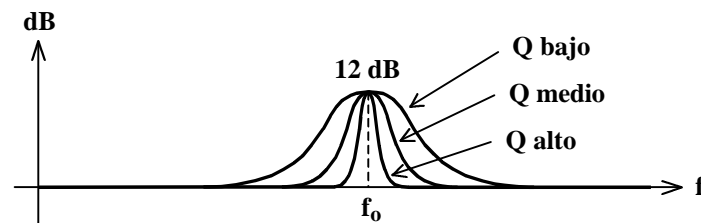


Figura 11.18. Efecto del ajuste del ancho de banda de una sección de un ecualizador paramétrico. Se muestra una única frecuencia y el control de ganancia está al máximo en todos los casos.

banda ajustable es común hablar del **factor de calidad, Q**, del filtro, el cual se define como

$$Q = \frac{f_0}{AB},$$

donde f_0 es la frecuencia central del filtro y AB su ancho de banda. Así, cuanto más grande sea el ancho de banda, menor será Q y viceversa. Obsérvese que el factor de calidad no tiene ninguna relación con la *calidad del producto*.

Una de las aplicaciones más interesantes de los ecualizadores paramétricos es la eliminación de acoples (ver capítulo 12). Otras aplicaciones pueden ser eliminar zumbidos de línea cuyo origen es difícil de detectar, o resaltar frecuencias específicas que son excesivamente absorbidas.

Los ecualizadores paramétricos no están tan difundidos en forma de componentes separados como los ecualizadores gráficos. En cambio casi siempre se encuentra un ecualizador paramétrico o semiparamétrico (un ecualizador que permite ajustar la frecuencia pero no el Q) en cada canal de entrada de las consolas de cierta importancia. Entre los ecualizadores paramétricos externos a las consolas se encuentran dispositivos denominados **filtros notch** (o filtros muesca), en los cuales sólo es posible lograr atenuación, en lugar de atenuación y ganancia como en un ecualizador propiamente dicho. Por lo general tienen un Q bastante alto y fijo.

Las especificaciones de los ecualizadores paramétricos son similares a las de los ecualizadores gráficos, con el agregado de los rangos de ajuste de las frecuencias y del Q de cada sección.

Capítulo 12

Acoples

12.1. Introducción

Los comúnmente denominados **acoples**, es decir zumbidos o silbidos que suelen aparecer en los sistemas de sonido en vivo o de monitoreo, son el resultado de una **realimentación positiva electroacústica**. Intuitivamente, son consecuencia del retardo que existe entre el instante en que el sonido abandona el altavoz y el instante en que llega al micrófono (**Figura 12.1**). El proceso es así: el parlante emite un sonido que demora un tiempo **T** en llegar al micrófono, que depende de la distancia entre el parlante y el micrófono. Al ingresar en el micrófono, es amplificado y vuelto a enviar al parlante, como un *eco* del anterior. Si la **ganancia** del amplificador no es demasiado alta, el sonido emitido por el parlante será de menor nivel que el original. Nuevamente, después de otro tiempo **T**, el sonido llega al micrófono y vuelve a ser amplificado y enviado al parlante, esta vez con un nivel menor todavía. El proceso se repite y el eco se atenúa cada vez más, hasta que finalmente desaparece.

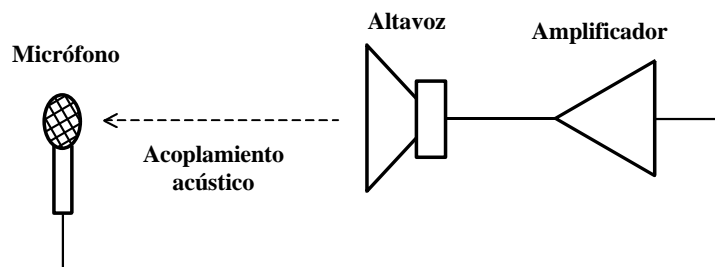


Figura 12.1. Diagrama de bloques del acoplamiento entre micrófono y parlante, causante de zumbidos o silbidos indeseados en el sistema de sonido.

Pero si la ganancia es alta, el eco será igual o mayor que el sonido original, tendiendo a repetirse cada vez igual o más fuerte que el sonido original. Esto produce una **oscilación autosostenida** que se escucha como un sonido de frecuencia $f = 1/T$.

El retardo T entre la emisión del sonido y su reingreso al micrófono depende de la distancia recorrida por el sonido. Si el micrófono apunta directamente al parlante, resulta

$$T = \frac{2d}{c},$$

donde d es la distancia entre el micrófono y el parlante, y c es la velocidad del sonido. Entonces la frecuencia del acople será

$$f = \frac{c}{2d},$$

Además de esta frecuencia también son posibles las frecuencias de los armónicos, es decir $2f$, $3f$, $4f$, etc. Por ejemplo, si la distancia es de **4 m**, las frecuencias posibles resultan ser **43,25 Hz**, **86,5 Hz**, **129,75 Hz**, **173 Hz**, etc.

La ganancia del sistema puede variar con la frecuencia debido a la respuesta de sus componentes: el micrófono, el amplificador, o el parlante, de modo que es posible que a la frecuencia fundamental no haya ganancia suficiente para una oscilación sostenida. En ese caso, puede ocurrir que para alguno de los armónicos sí la haya, y entonces la frecuencia sea mayor que la de la fundamental.

A esto se agrega la directividad del parlante y del micrófono y la orientación relativa entre ambos, así como la presencia de superficies reflectoras cerca de cualquiera de ellos. Por ejemplo, si el micrófono es unidireccional, y su eje de máxima sensibilidad está ubicado perpendicular a la línea que lo une al parlante, la ganancia en esa dirección será muy baja, y por consiguiente no habrá acople. Pero en otra dirección, puede haber acople a través de alguna superficie reflectora (**Figura 12.2**), de manera que la distancia efectiva puede ser mayor. Esto puede ocurrir por ejemplo con micrófonos cercanos al suelo, o aquellos que toman una guitarra en las proximidades de la caja. Si la superficie reflectora es ligeramente cóncava, también es posible que ésta concentre las ondas sonoras sobre el micrófono, aumentando la ganancia efectiva.

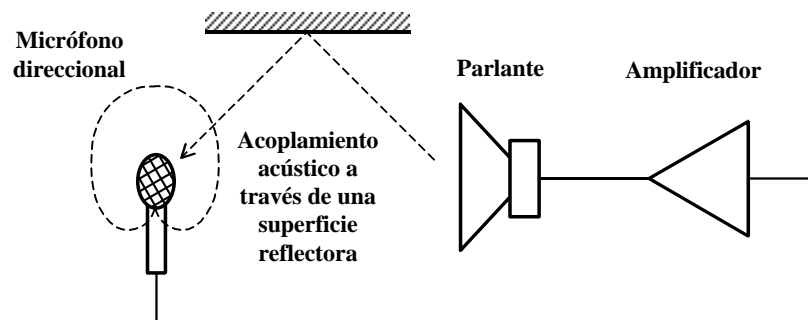


Figura 12.2. Ejemplo de un acoplamiento entre micrófono y parlante a través de una superficie reflectora cuando el micrófono es direccional (en el ejemplo, de tipo cardioide).

Por todo lo anterior, es casi imposible predecir la frecuencia de un acople antes de poner en marcha el sistema. Los enfoques más habituales para intentar resolver este problema son:

- a) Reducir la ganancia del amplificador
- b) Alejar los micrófonos de las cajas acústicas
- c) Cambiar la posición u orientación de los micrófonos en relación con el instrumento
- d) Cambiar la posición u orientación de las cajas de monitoreo
- e) Reducir la ganancia en la frecuencia específica donde aparece el problema por medio de un ecualizador, preferentemente de tipo paramétrico (sección 11.7)
- f) Cambiar el diagrama direccional del micrófono de manera de reducir la ganancia efectiva por efecto de la direccionalidad, por ejemplo mediante micrófonos cardioides o figura de ocho.

De todas maneras, ninguna de estas pautas garantiza la solución del problema, requiriéndose habitualmente cierta dosis de experimentación hasta eliminar por completo el tono espurio.

Con respecto a la utilización de ecualizadores paramétricos o filtros notch para reducir la ganancia en la frecuencia del acople, el procedimiento usual es comenzar con la máxima atenuación en el filtro, e ir ajustando la frecuencia hasta eliminar el silbido. Luego, sin modificar la frecuencia, se debe reducir la atenuación hasta **3 a 6 dB** antes de que reaparezca el problema.

Podría parecer que la reducción de la ganancia que se logra con un filtro notch elimina también *otras señales de la misma frecuencia* pertenecientes al programa. En realidad sucede que el sistema pasa a tener una *realimentación positiva* o *regenerativa* lo cual implica un aumento excesivo de la ganancia a la frecuencia del acople, aumento que tiene lugar para *toda* señal de esa frecuencia, sea ésta el acople o la señal útil. De modo que aún si no se alcanzara a producir una oscilación autosostenida, el sistema adolecería de una ganancia muy alta a esa frecuencia. Al utilizar el ecualizador, estamos en realidad bajando esa excesiva ganancia, y lo hacemos tanto para el acople como para la señal. En una palabra, restituimos la planicidad de la respuesta que había sido perturbada por la realimentación acústica.

Comentemos, finalmente, que aunque el acoplamiento acústico no alcance a ser suficientemente intenso para provocar oscilaciones autosostenidas, puede tener otra consecuencia perniciosa para la señal, y es una tendencia a producir un sonido sibilante, una especie de campanilleo, especialmente en señales que fluctúan rápidamente en el tiempo como la palabra. El ecualizador paramétrico puede ayudar a corregir este problema de la misma manera que en el caso del acople autosostenido.

Capítulo 13

Compresores y limitadores

13.1. Introducción

Nos referiremos ahora a un tipo de procesadores de señal que actúan modificando el rango dinámico de la señal. Recordemos que el rango dinámico es la diferencia en **dB** entre el máximo nivel y el mínimo nivel de una señal. Hay varias situaciones en las que es necesario reducir el rango dinámico, siendo probablemente la más representativa aquella en que la señal debe atravesar otro procesador cuya relación señal/ruido es menor que el rango dinámico original (recordemos los comentarios hechos al introducir el concepto de relación señal/ruido en un amplificador, sección 9.7).

Enfoquemos más de cerca las vinculaciones entre los niveles de la señal, del ruido, y el rango dinámico. Supongamos un amplificador cuya tensión de entrada máxima (tensión después de la cual comienza a saturar) es de **2 V**, y cuya tensión de ruido (referida a la entrada) es de **0,1 mV**. Esto implica unos niveles de tensión en **dBV** dados por

$$N_{\text{máximo}} = 20 \log_{10} \frac{2 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 6 \text{ dBV} ,$$

$$N_{\text{ruido}} = 20 \log_{10} \frac{0,0001 \text{ V}}{1 \text{ V}} = -80 \text{ dBV} ,$$

de modo que

$$S/N = N_{\text{señal}} - N_{\text{ruido}} = 6 - (-80) = 86 \text{ dB} .$$

Supongamos ahora que disponemos de una señal cuyos valores máximo y mínimo son, respectivamente, **22 V** y **0,2 mV**. Los niveles de tensión en **dBV** son

$$N_{\text{señal máx}} = 20 \log_{10} \frac{22 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 27 \text{ dBV} ,$$

$$N_{\text{señal mín}} = 20 \log_{10} \frac{0,0002 \text{ V}}{1 \text{ V}} = -74 \text{ dBV} ,$$

lo cual implica un rango dinámico de $27 - (-74) = 101 \text{ dB}$.

Por un lado observamos que el nivel máximo de la señal (**27 dBV**) supera al nivel máximo del amplificador (**6 dBV**). Por otro lado, el nivel mínimo de señal (**-74 dBV**) es algo mayor que el nivel de ruido del amplificador (**-80 dBV**). Sin recurrir a procesadores dinámicos, la única manera medianamente aceptable de atacar el problema sería atenuar la señal en **21 dB**, con lo cual el nivel máximo se acomodaría al nivel máximo del amplificador (**6 dBV**), y el nivel mínimo pasaría a ser **-95 dBV**, es decir **15 dB** por debajo del nivel de ruido del amplificador. Esto implica, lisa y llanamente, que se perderían los **15 dB** más débiles de la señal.

13.2. Compresores de audio

Esta situación puede manejarse mucho mejor con un **compresor de audio**, procesador capaz de reducir el rango dinámico de la señal cuyo diagrama de bloques simplificado se muestra en la **Figura 13.1**. La clave del funcionamiento del compresor está en un dispositivo denominado **amplificador controlado (VCA)**, que posee una entrada auxiliar por medio de la cual se le puede variar la ganancia.

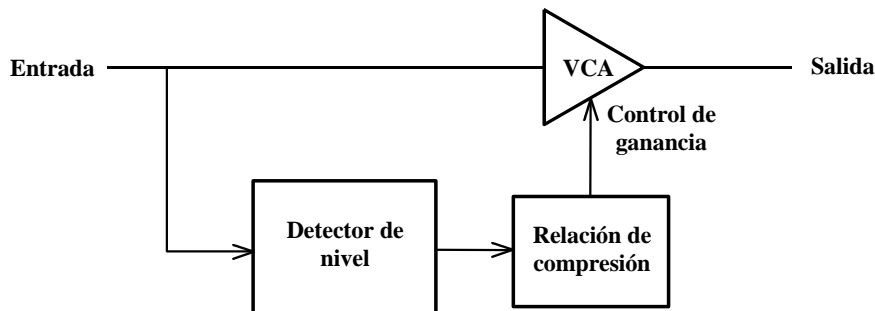


Figura 13.1. Diagrama de bloques simplificado de un compresor de audio.

El compresor opera de la siguiente forma. En primer lugar, un detector de nivel está continuamente verificando si la señal de entrada supera o no cierto nivel denominado **umbral**. Si el umbral no se supera, el **VCA** tiene ganancia **1**, por lo tanto la señal no experimenta alteraciones. Si, en cambio, se supera el umbral, el **VCA** reducirá su ganancia de tal modo que el excedente de nivel de entrada se reduzca a la salida en una proporción llamada **relación de compresión**. Así, si la relación de compresión es **2:1**, un exceso de **10 dB** respecto al umbral se transformará en un exceso de sólo **5 dB**. El funcionamiento es equivalente al de un operador humano que acciona el control de volumen cuando el nivel sonoro sube demasiado.

El nivel de **umbral** y la **relación de compresión** son parámetros ajustables por el usuario, y definen la forma en que actuará el compresor de acuerdo con lo indicado en la **Figura 13.2**.

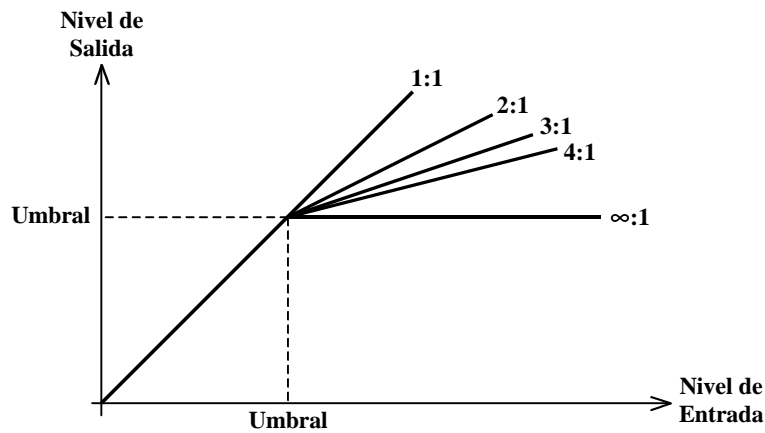


Figura 13.2. Efecto de las diversas relaciones de compresión sobre la operación del compresor.

Vamos a ilustrar la operación del compresor utilizando los datos del ejemplo anterior. Para ello supondremos primero que adoptamos un umbral de **-6 dBV** (es decir, **0,5 V**) y una relación de compresión de **3:1**. Dado que el umbral es **-6 dBV** y el nivel máximo de la señal de entrada era **27 dBV**, el exceso de nivel a la entrada resulta ser

$$27 - (-6) = 33 \text{ dB} .$$

Este exceso quedará dividido por la relación de compresión, en este caso **3:1**, por lo cual el exceso de nivel a la salida (respecto al umbral) será de sólo

$$33/3 = 11 \text{ dB} .$$

El nivel máximo a la salida será, entonces

$$N_{\text{máx}} = -6 + 11 = 5 \text{ dBV} .$$

Este valor es menor que el máximo que tolera el amplificador a la entrada sin saturar (**6 dBV**), por lo cual el problema ha quedado resuelto (ver **Figura 13.3**).

Analicemos ahora el resultado obtenido. Las señales de nivel menor que **-6 dBV** (el umbral) no sufren alteración ninguna, ya que la ganancia del **VCA** es **0 dB** (es decir, **1**, ya que **20 log 1 = 0**). Las señales que superan dicho valor comienzan a ser atenuadas. Por ejemplo, una señal de entrada de **3 dBV**, producirá a la salida una señal de

$$-6 + \frac{3 - (-6)}{3} = -3 \text{ dBV} ,$$

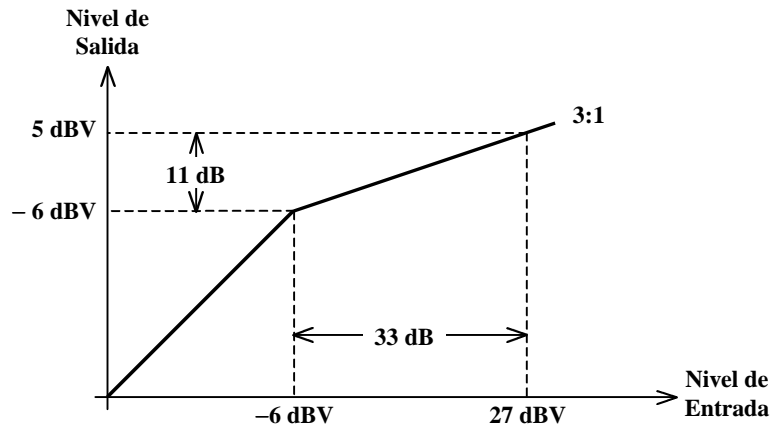


Figura 13.3. Efecto de una compresión **3:1** realizada sobre una señal de entrada que llega como máximo a **27 dBV**.

y por lo tanto la ganancia en **dB** será

$$N_{\text{salida}} - N_{\text{entrada}} = -3 - 3 = -6 \text{ dB},$$

que corresponde a una ganancia de **0,5** (es decir, una atenuación). Similarmente, una señal de máximo nivel de entrada (es decir de **27 dBV**) producirá, como ya vimos, una salida de **5 dBV**, por lo cual su ganancia en **dB** será $5 - 27 = -22 \text{ dB}$, correspondiente a **0,08**. Esto muestra cómo actúa el compresor: una vez superado el umbral, la ganancia se va reduciendo paulatinamente conforme aumenta la señal.

Ahora bien ¿cuál es el efecto *auditivo* de la compresión? Evidentemente, tiende a aplanar los planos dinámicos. Así, si la señal musical original cambiaba de un *mezzo-forte* a un *triple fortissimo*, luego de la compresión el aumento de intensidad será menor, por ejemplo de un *mezzoforte* a apenas un *forte*. Esto restará interés a la interpretación de determinados tipos de música en la cual los contrastes dinámicos tienen gran importancia expresiva, como la música clásica y la música contemporánea, y en cambio tendrá un efecto menos perjudicial en aquellos tipos de música que, como el rock, no dependen esencialmente de los contrastes para la expresión.

Veamos ahora un segundo ejemplo sobre la misma señal y el mismo amplificador. Supondremos ahora que por el tipo de música una compresión **3:1** no ha resultado satisfactoria. Nos preguntamos entonces cuál debe ser el nuevo umbral para resolver el problema utilizando una relación de compresión de sólo **2:1**. Para determinarlo, llamémoslo **U**. Entonces **U** debe satisfacer la relación siguiente:

$$\frac{27 - U}{2} + U \leq 6 \text{ dBV}$$

(ya que el máximo nivel admisible a la entrada es **6 dBV**). que se resuelve como

$$U \leq 6 \cdot 2 - 27 = -15 \text{ dBV}.$$

Efectivamente, la máxima señal de entrada excede en $27 - (-15) = 42 \text{ dB}$ al umbral, por lo que la señal de salida lo excederá en $42/2 = 21 \text{ dB}$, que sumado al um-

bral propuesto da $21 + (-15) = 6 \text{ dBV}$, por lo cual la máxima entrada del amplificador no es superada.

El cálculo anterior puede generalizarse. Si se conoce el nivel máximo de entrada $N_{\text{máx, ent}}$, la relación de compresión RC , y el nivel máximo de salida del compresor $N_{\text{máx, sal}}$, entonces el umbral U puede obtenerse como

$$U = \frac{N_{\text{máx, sal}} \cdot RC - N_{\text{máx, ent}}}{RC - 1}.$$

En el análisis previo habíamos supuesto que el compresor recibía diversos niveles aislados de señal de entrada, sin preocuparnos acerca de la transición entre dichos niveles. Nos preguntamos ahora qué sucede si una señal comienza con un nivel N_1 menor que el umbral y en determinado instante pasa a tener un nivel N_2 mayor que el umbral. En principio podríamos pensar que el compresor reacciona instantáneamente, bajando la ganancia al nuevo valor requerido. Hay, sin embargo, dos razones por las cuales esto no sucede. En primer lugar, el detector de nivel del compresor (ver **Figura 13.1**) requiere al menos un ciclo para reconocer cuál es el nivel de la señal, de lo contrario la operación del **VCA** provocará una distorsión de la onda. En efecto, si la ganancia varía demasiado rápido, es decir si varía dentro de un mismo ciclo, el resultado es una señal en la cual, por ejemplo, los valores más grandes son amplificados menos que los pequeños, lo cual deforma la onda (**Figura 13.4**) introduciendo distorsión. En segundo lugar, una variación de ganancia demasiado rápida produce un efecto auditivo claramente perceptible, debido a la brusca variación del nivel de ruido de fondo. En condiciones normales

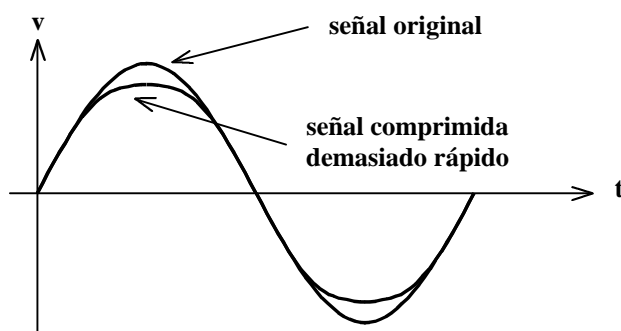


Figura 13.4. Una compresión demasiado rápida provoca una deformación que distorsiona la onda.

dicho ruido pasa desapercibido, pero cuando su nivel cambia bruscamente se vuelve más notorio. La variación de la reverberación asociada al ambiente acústico en que se grabó el material también delata el cambio brusco de ganancia.

Por estas razones los compresores incorporan cambios graduales de la ganancia, mediante el agregado de una envolvente con dos intervalos de transición: uno inicial, denominado **ataque (attack)**, y uno final denominado **relevo (release)**, como se indica en la **Figura 13.5**. En la **Figura 13.6** se muestra un diagrama de bloques más completo

de un compresor, incorporando la generación de envolvente y los parámetros normalmente ajustables por el usuario.

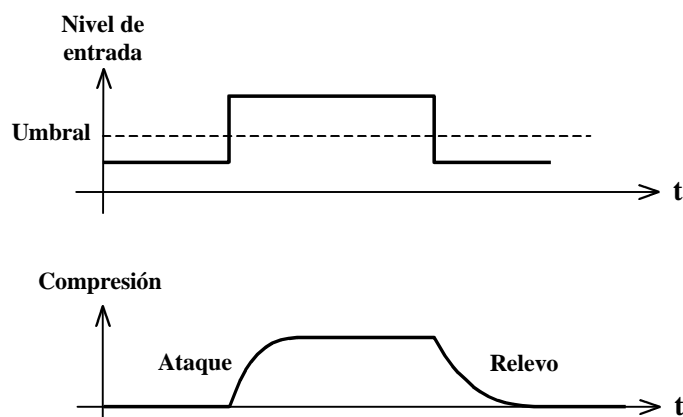


Figura 13.5. Efecto de la envolvente en un compresor de audio. La compresión correspondiente al exceso de nivel de entrada se alcanza luego de un tiempo de ataque. Análogamente, la descompresión se alcanza después de un tiempo de relevo.

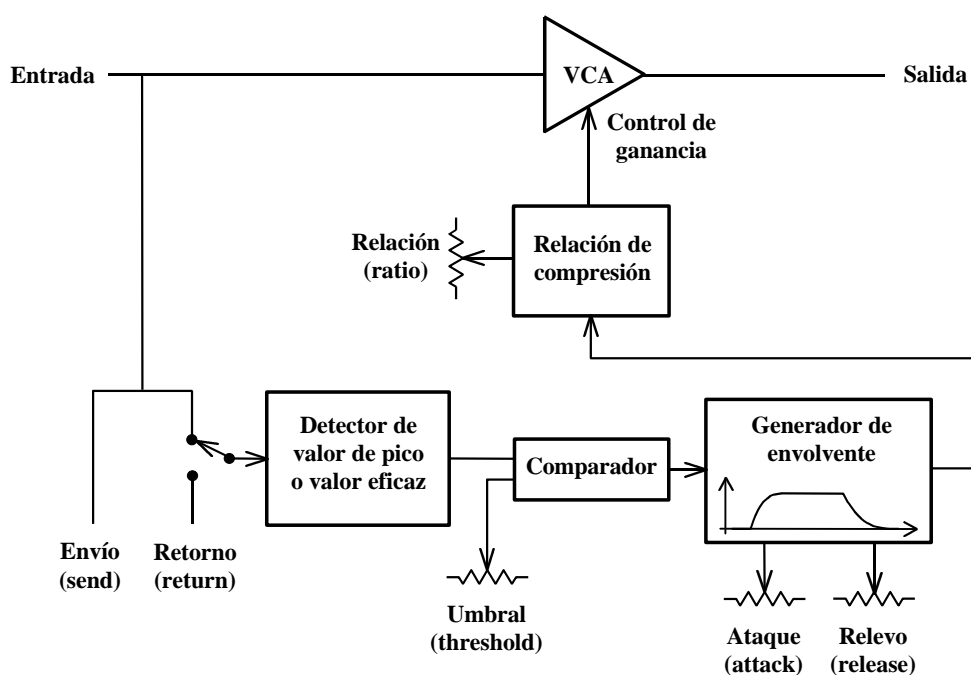


Figura 13.6. Diagrama de bloques más detallado de un compresor de audio, en el cual se observan algunos de los controles accesibles al usuario.

En la **Figura 13.7** se presenta un ejemplo en el cual se pone en evidencia el efecto a nivel de la forma de onda de una compresión. Cuando la señal de entrada sube por

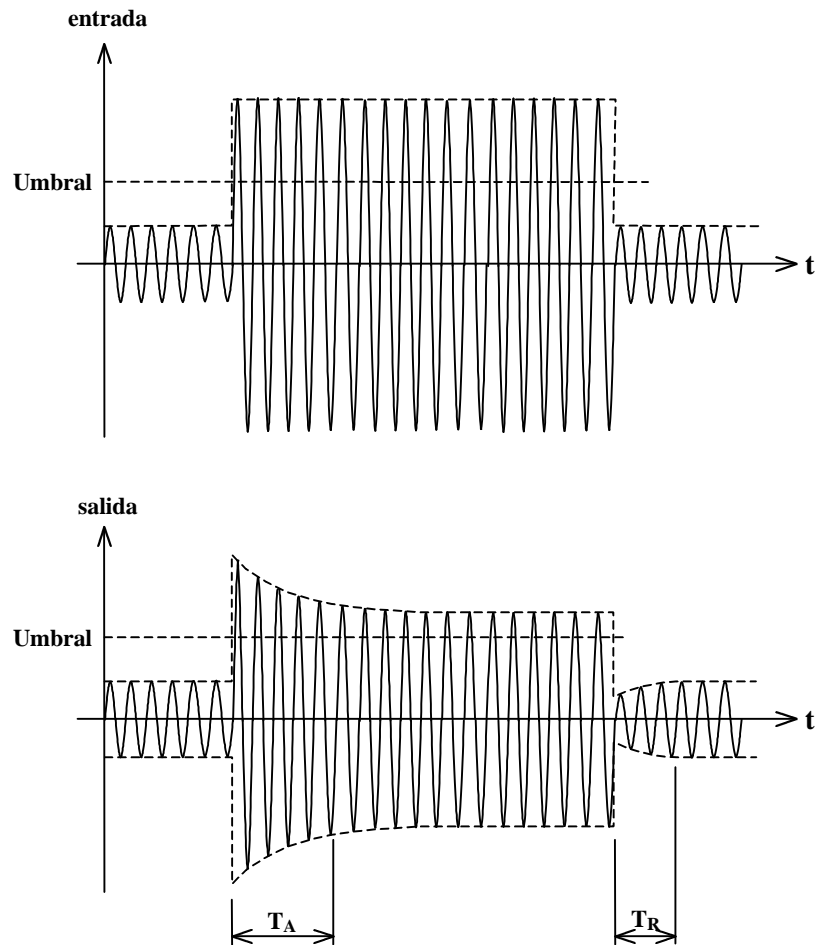


Figura 13.7. Efecto de la compresión a nivel de la forma de onda temporal.

encima del umbral se desencadena la envolvente de ataque. Inicialmente la señal sube bruscamente porque la ganancia todavía no cambió. Luego la ganancia decae hasta el valor correspondiente ya estudiado (definido por el umbral y la relación de compresión). Este proceso demora un tiempo denominado **tiempo de ataque**, T_A . Cuando la señal de entrada vuelve a su nivel original, inicialmente la ganancia sigue baja por efecto de la compresión. Luego vuelve a aumentar hasta el valor **1** correspondiente a una señal por debajo del umbral, demorando para ello un tiempo denominado **tiempo de relevo**, T_R .

Podría objetarse que el aumento inicial de la señal atenta contra el objeto de la compresión, ya que durante parte del tiempo de ataque el nivel de salida supera el requerido, provocando una posible distorsión. Sucede que una distorsión durante un tiempo muy corto es menos perjudicial como efecto auditivo que una compresión demasiado brusca. Tanto el tiempo de ataque como el de relevo deben ajustarse al tipo de señal.

Por ejemplo, una señal con un ataque muy corto, deberá ser comprimida rápidamente, de lo contrario la distorsión por exceso de nivel comenzaría a notarse. Sin embargo, cuando aparecen un instrumento grave y otro agudo simultáneamente de tal modo que el grave tiene un nivel importante, una compresión con tiempo de ataque demasiado corto puede hacer desaparecer virtualmente el instrumento agudo, por lo cual será conveniente aumentar algo el tiempo de ataque. El tiempo de relevo o recuperación es normalmente mayor que el de ataque, debido a que en general los sonidos se extinguen más lentamente que lo que se inician, y además existe una prolongación natural debida a la reverberación. El rango normal de tiempo de ataque va de **0,1 ms** a **200 ms**, y el de tiempo de relevo de **50 ms** a **2 ó 3 s**. En algunos compresores existe también un **tiempo de sostén (hold)**, que consiste en un retardo entre el instante en que el nivel deja de superar al umbral y el instante en que comienza el relevo (**Figura 13.8**). El objetivo de

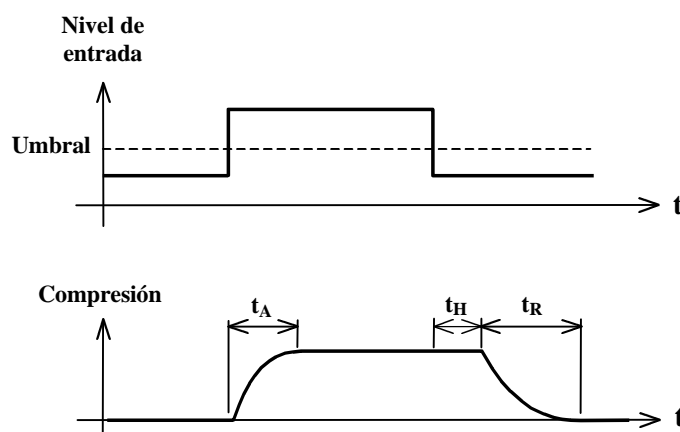


Figura 13.8. Envolvente de compresión que incluye un tiempo de sostén (T_H) entre el descenso de la señal de entrada por debajo del umbral y el comienzo del periodo de relevo.

este retardo es evitar distorsiones en las señales de baja frecuencia. Tomemos como ejemplo una señal de **20 Hz** (cuyo periodo es de **50 ms**). Si su nivel es mayor que el umbral, actuará el compresor, pero cuando el valor instantáneo de la señal baje por debajo del umbral, comenzará el periodo de relevo, en el cual la ganancia aumenta. Para señales de frecuencias más altas (periodo muy corto), el aumento de ganancia demorará muchos ciclos, y por lo tanto la variación de ganancia dentro de cada ciclo será imperceptible. Pero siendo en este caso el periodo tan largo, dentro de un mismo ciclo habrá una variación apreciable de ganancia, lo cual implica una distorsión. El tiempo de sostén impide que comience la recuperación de ganancia antes de que termine el ciclo. De esta manera se asegura que el proceso de recuperación comience cuando el *nivel* de la señal (y no su *valor instantáneo*) vuelve a estar por debajo del umbral.

En este sentido, es importante reconocer la diferencia entre *nivel* y *valor instantáneo* de una señal. El valor instantáneo es el valor que va tomando la señal en instantes sucesivos. El nivel, en cambio, es una propiedad global de la señal, no asociable a un instante sino a todo un ciclo. En realidad hay varias formas de interpretar el nivel, de las cuales dos son las más utilizadas: el **valor de pico (peak)** y el **valor eficaz (RMS)**. En muchos compresores están disponibles ambas formas (seleccionables mediante una lla-

ve). El valor de pico es el máximo valor que alcanza la señal dentro de un periodo de la señal, mientras que el valor eficaz está relacionado con la potencia que tiene la señal. No son lo mismo porque una señal que tiene un gran valor de pico pero durante un tiempo muy pequeño, tiene muy poca potencia. y por lo tanto un valor eficaz pequeño. Por ejemplo, en una onda cuadrada, el valor eficaz es igual al valor de pico, pero en una onda senoidal el valor eficaz es sólo **0,707** veces el valor de pico. En la **Tabla 13.1** se da la relación entre el valor eficaz y el valor de pico para algunas formas de onda.

Tabla 13.1. Relación entre el valor eficaz y el valor de pico de varias ondas.

| Onda | Valor eficaz |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Cuadrada | Valor de pico |
| Senoidal | $0,707 \times \text{Valor de pico}$ |
| Triangular | $0,557 \times \text{Valor de pico}$ |
| Pulsos de 1 ms cada 10 ms | $0,316 \times \text{Valor de pico}$ |
| Pulsos de 0,1 ms cada 10 ms | $0,100 \times \text{Valor de pico}$ |

Esto es importante para determinar qué tipo de nivel (**RMS** o **pico**) conviene seleccionar en cada caso. En abstracto, es preferible controlar la compresión con el valor eficaz, ya que da resultados más naturales. Sin embargo, para algunas ondas (como las dos últimas de la **Tabla 13.1**) el valor de pico resulta ser mucho mayor que el valor eficaz, por lo tanto comprimir basándose en el valor eficaz puede significar una de dos cosas: que la compresión no alcance para evitar la saturación o recorte de los picos (y sea por lo tanto inefectiva), o bien que el umbral deba ubicarse demasiado abajo, aplanando severamente la dinámica de *toda* la señal (y no sólo de las porciones con picos altos y estrechos). En estos casos es preferible apelar a la compresión basada en el nivel de pico. En la práctica, dado que obviamente es muy difícil disponer de un osciloscopio o de un medidor de valor eficaz y otro de pico para determinar teóricamente qué es lo que más conviene, los pasos a seguir serían realizar primero varias pruebas comprimiendo sobre la base del valor eficaz, y si los resultados acusan niveles de distorsión apreciables, comprimir sobre la base del valor de pico.

Los compresores permiten acceder exteriormente a la entrada de control, denominada **cadena lateral** (traducción directa de la versión inglesa **side chain**) mediante un conector de inserción (ver conector de envío y de retorno en el diagrama de la **Figura 13.6**). Esto permite varias aplicaciones interesantes. Por ejemplo, puede controlarse la compresión de una señal por medio de otra. Por ejemplo, podría comprimirse una banda u orquesta en el momento en que aparece un instrumento o voz solista, controlando la cadena lateral con la señal procedente del solista. Esta técnica, denominada en inglés **ducking**, tendría como efecto una reducción de la sonoridad del conjunto acompañante cuando interviene el solista. También es posible intercalar otros procesadores en el camino de la señal a comprimir, comprimiendo a partir de la señal procesada en lugar de la original. Un ejemplo bastante común es utilizar un ecualizador. Supongamos por ejemplo que bajamos todos los controles por debajo de **2 kHz**. Entonces ante una baja frecuencia de nivel alto no habrá compresión, pero sí ante una alta frecuencia. Esta disposición se usa como dispositivo **antisibilante (de-esser)**, para reducir el exceso de eses frente al micrófono, dado que éstas contienen frecuencias superiores a los **2 kHz**.

Un efecto de la misma familia se logra comprimiendo a partir del exceso de baja frecuencia, obteniéndose un **antipop** (dispositivo que elimina los soplos contra el micrófono).

Además de los controles ya comentados, los compresores poseen un control de ganancia de entrada o de salida (o ambos). Esto es necesario a efectos de acomodar el nivel de señal a valores estándar y mejorar por lo tanto la relación señal/ruido. Para verlo, consideremos el caso del ejemplo anterior, en el cual el nivel máximo de la entrada era de **27 dBV**, un valor que resulta demasiado alto para un compresor típico. Esto es el resultado de una ganancia excesiva a lo largo del trayecto de la señal entre la fuente y la salida de la consola. Si reducimos dicha ganancia de manera de tener, por ejemplo, una señal máxima de **4 dBV** (es decir una reducción de ganancia de $27 - 4 = 23$ dB), la señal mínima resulta de $-74 - 23 = -97$ dBV, que está **17 dB** por debajo de los **-80 dBV** del ruido del amplificador. Al aplicar el compresor con el umbral anterior (**-15 dBV**) no se obtendrá ninguna mejora en las señales débiles, y por lo tanto se perderán bajo el ruido del amplificador los **17 dB** más débiles de la señal. Pero si en vez de utilizar un umbral de **-15 dBV** utilizamos uno de $-15 - 23 = -38$ dB (es decir, reducimos el umbral en la misma proporción en que habíamos reducido la ganancia), el máximo nivel a la salida del compresor será

$$N_{\text{máx, sal}} = \frac{4 - (-38)}{2} + (-38) = -17 \text{ dBV}.$$

Ahora podemos agregar, por medio del control de ganancia de salida del compresor, una ganancia de **23 dB** con lo cual el máximo nivel de salida resulta

$$N_{\text{máx, sal}} \Big|_{\substack{\text{con 23 dB} \\ \text{de ganancia}}} = -17 + 23 = 6 \text{ dBV}.$$

El resultado ha sido igual al anterior, es decir aplicamos como máximo **6 dBV** al amplificador, lo cual está de acuerdo con sus especificaciones.

Repasemos lo que hemos hecho: dado que la señal máxima de entrada *al compresor* era demasiado alta para éste (con el peligro de saturarlo), bajamos en **23 dB** la ganancia de las etapas previas, y junto con ésta bajamos también en **23 dB** el umbral obtenido anteriormente. Finalmente, restituimos el nivel de la señal (reducido por la compresión) agregando una ganancia de **23 dB**.

Una variante del compresor analizado hasta el momento lo constituyen algunos compresores en los que la transición entre la señal no comprimida y la comprimida no se produce en forma brusca a partir del umbral, sino que la compresión varía gradualmente desde **1:1** hasta el valor seleccionado (ver **Figura 13.9**). Este tipo de compresión se conoce como **soft knee** (que podría traducirse en forma libre como **codo gradual**), y provee un sonido algo más natural.

Para brindar al operador más información sobre qué está sucediendo con la señal, los compresores suelen tener indicadores de barra (del tipo de los vómetros a **LED** (diodos luminosos)) que muestran la reducción de ganancia en un determinado instante, y los niveles de entrada y salida. También se proporciona un interruptor de **bypass** que elimina la acción del compresor conectando en forma directa la entrada con la salida. La finalidad de esto es permitir al operador comparar la señal natural con la comprimida.

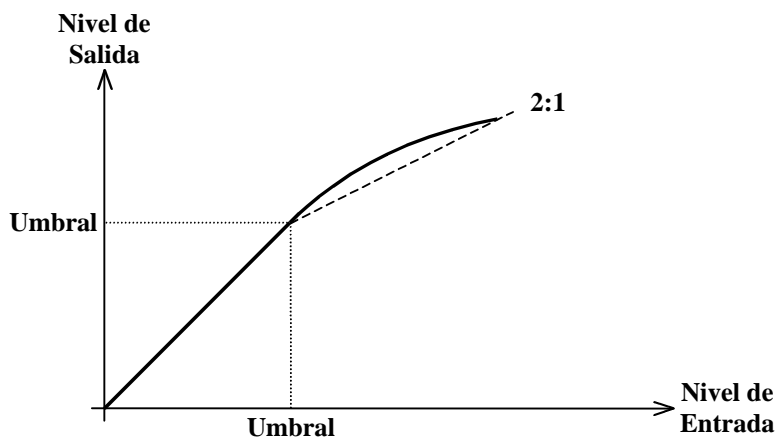


Figura 13.9. Curva de compresión de un compresor de tipo soft-knee.

Los compresores estereofónicos suelen tener dos modos de operación. En el primero, cada canal funciona independientemente del otro, en la forma ya explicada. Es ideal para comprimir señales independientes, antes de la mezcla final. En el segundo, la compresión se realiza en forma simultánea e idéntica en ambos canales, a partir de la señal más alta entre las dos entradas. Esta modalidad se utiliza para señales estéreo propiamente dichas, en las cuales la compresión independiente de ambos canales podría redundar no sólo en una alteración de la dinámica, sino también en *una severa distorsión de la imagen estereofónica*. Esto podría suceder en un caso en que hubiera dos instrumentos en escena, por ejemplo un contrabajo del lado derecho tocando *forte*, y una flauta al centro tocando *piano*. El bajo ocupará principalmente el canal derecho, mientras que la flauta, por estar al centro, aparecerá en ambos canales con nivel similar. Si se comprimieran independientemente, el canal derecho quedaría comprimido y el izquierdo no. Dado que la compresión afecta a *toda* la señal del canal derecho, la flauta se atenuaría en el canal derecho y no en el izquierdo, y aparecería por lo tanto desplazada espacialmente hacia la izquierda.

13.3. Limitadores

Hemos visto que es posible seleccionar la relación de compresión. El sonido más natural se logra con los valores más bajos. Sin embargo, los compresores permiten relaciones de compresión muy altas, por ejemplo **20:1** ó aun **∞ :1** (el símbolo ∞ se lee “infinito”, y denota un número muy grande). Un compresor que comprime con una relación **∞ :1** se denomina **limitador**, ya que su función pasa a ser la de *limitar* el crecimiento de la señal de tal modo que no supere el umbral (ver **Figura 13.2**). No debe confundirse un *limitador* con un *recortador*. Un recortador recorta la onda, exactamente del mismo modo que lo haría un amplificador que satura, provocando una severa distorsión en la señal. Un limitador, en cambio, no deforma la onda, sino que reduce la ganancia de manera de llevar el nivel de señal a un valor constante, igual al umbral. Si bien la onda no

se distorsiona, sí se produce una distorsión en las relaciones dinámicas de la música, restringiendo, una vez superado el umbral, las posibilidades expresivas. Por ejemplo, puede suceder que un percusionista, al acercarse al clímax de una pieza musical, toque cada vez más *forte*; pero al superar el umbral, pese a sus denodados esfuerzos, el nivel no experimentará nuevos incrementos. Esto resta interés a la música, por lo cual en general la limitación no es recomendable; se utiliza como recurso de emergencia, y sólo en aquellos casos en los que no es admisible superar un determinado nivel. Un ejemplo es el de las emisoras de frecuencia modulada (**FM**), en las cuales por ley está prohibido enviar al aire frecuencias más allá de $\pm 75 \text{ kHz}$ de la frecuencia de la emisora. Como en **FM** la amplitud se codifica como desviación de frecuencia, una mayor amplitud implica una mayor desviación de frecuencia, con el peligro de invadir la banda asignada a la emisora vecina en el dial. En este caso, el limitador actúa como recurso extremo para no entrar en la ilegalidad.

Capítulo 14

Compuertas y expansores

14.1. Introducción

En un sistema de audio de buena calidad, el ruido propio de los componentes electrónicos es casi siempre inaudible. Pero en las tomas con micrófono, el ruido interno del micrófono y el ruido acústico convertido en señal eléctrica son, normalmente, muy superiores al ruido del resto de los otros componentes (consolas, procesadores, amplificadores, etc.). Aún en salas de grabación muy silenciosas, el ruido de los músicos moviéndose, dando vuelta las páginas de una partitura, o simplemente respirando, puede volverse claramente audible en la toma durante los momentos de silencio. Este problema se resuelve por medio de un procesador dinámico denominado **compuerta**.

14.2. Compuertas

La compuerta es un procesador dinámico que en cierta forma realiza la función inversa de los compresores. Opera en la forma de un interruptor de señal que conecta la entrada solamente si es suficientemente alta como para que sea atribuible a la señal. En cambio, cuando la entrada es demasiado pequeña se interpreta como ruido y por lo tanto se desconecta. El resultado equivale a un mejoramiento de la relación señal/ruido, ya que mientras hay señal, ésta enmascara al ruido haciéndolo virtualmente inaudible, y cuando no hay señal el ruido es eliminado. En la **Figura 14.1** se ilustra la operación de la compuerta. Existe un umbral, por lo general ajustable, por debajo del cual la compuerta se cierra y por encima del cual se abre. El umbral debería ajustarse apenas por encima del ruido de fondo, de manera de no recortar señales de pequeño nivel.

Según puede observarse, mientras la compuerta se cierra impidiendo el paso del ruido del micrófono, queda el ruido residual del resto de los componentes electrónicos, que como ya se ha remarcado, en general es prácticamente inaudible.

Este esquema conceptual de funcionamiento no puede aplicarse directamente en la práctica por varias razones. En primer lugar, un corte tan abrupto de la señal como el que tiene lugar cuando la compuerta se cierra casi invariablemente provoca un *click* audible, y lo mismo sucede cuando se abre. En segundo lugar, para señales muy peque-

ñas, con niveles cercanos al del ruido de fondo, podría suceder una inestabilidad de la compuerta, al abrirse y cerrarse a repetición a causa del efecto combinado de la señal y el ruido (**Figura 14.2**). En tercer lugar, se cortaría abruptamente no sólo la señal sino también la última parte de la reverberación anterior, creando un efecto antinatural. Por

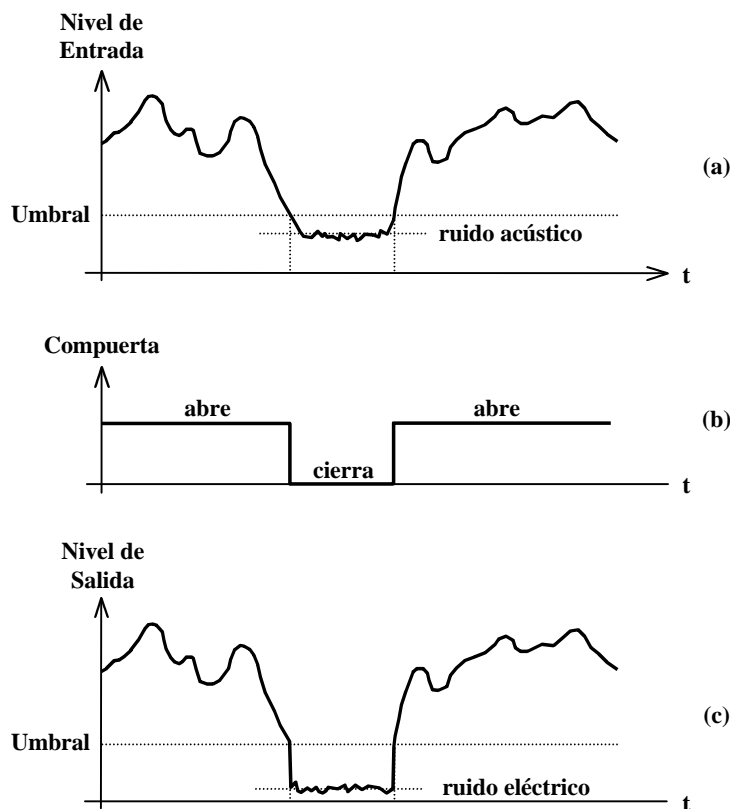


Figura 14.1. Operación conceptual de una compuerta. (a) Evolución del nivel de una señal de entrada. En el ruido *acústico* se ha incluido también el del micrófono. (b) Acción de la compuerta. (c) Salida. El ruido eléctrico involucra el de todos los restantes componentes (procesadores, efectos, consola, etc.), incluida la propia compuerta.

estas razones se agregan dos elementos nuevos a la compuerta. El primero es una **histéresis**, es decir un umbral para el cierre de la compuerta y otro diferente (mayor) para su apertura (**Figura 14.3**). El segundo, una **envolvente**, es decir un cierre y apertura graduales (**Figura 14.4**).

14.3. Histéresis

La histéresis consiste en la existencia de dos umbrales diferentes. El umbral de cierre sólo está operativo mientras la compuerta esté abierta. Cuando la entrada dismi-

nuye hasta hacerse menor que dicho umbral de cierre, la compuerta se cerrará y entonces pasará a estar operativo el umbral de apertura. En consecuencia, una vez cerrada la compuerta, las pequeñas fluctuaciones alrededor del umbral de cierre no tendrán ningún efecto, ya que es necesario superar el nuevo umbral (el de apertura) para reabrir la compuerta. La diferencia entre ambos umbrales se denomina **ventana de histéresis**, y debe seleccionarse algo mayor que las fluctuaciones de nivel debidas al ruido. De ese modo, el ruido no será, por sí solo, capaz de provocar conmutaciones de la compuerta.

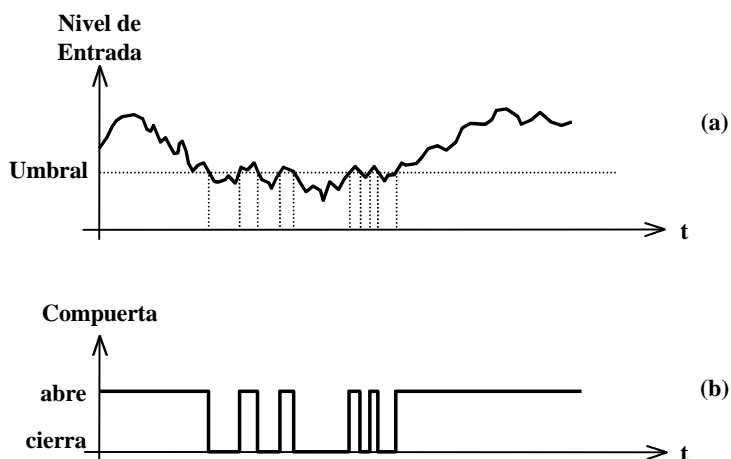


Figura 14.2. (a) Evolución del nivel de una señal de entrada. La suma de una señal pequeña y el ruido produce fluctuaciones cerca del umbral. (b) La compuerta se abre y cierra repetitivamente.

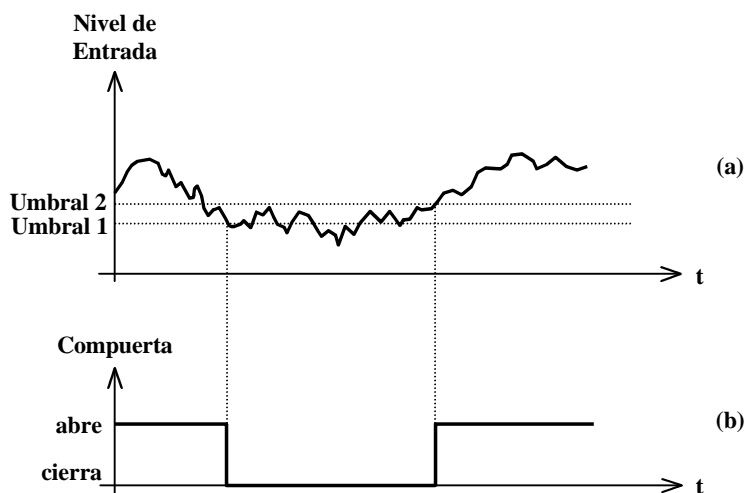


Figura 14.3. Compuerta con histéresis: umbrales diferentes para cerrar y para volver a abrir la compuerta. (a) Evolución del nivel de una señal de entrada. (b) Acción de la compuerta.

14.4. Envolvente

La envolvente controla la rapidez de la apertura y cierre de la compuerta, proporcionando un cierre y apertura graduales. Se deja de lado la idea de cortar y restituir la señal abruptamente y en su lugar se la corta reduciendo la ganancia de **1** a **0** durante un lapso de tiempo denominado **tiempo de relevo**, y se la restituye aumentando la ganancia de **0** a **1** durante un **tiempo de ataque** (ver **Figura 14.4**). Estas operaciones se realizan con una configuración similar a la de un compresor, ilustrada en el diagrama de bloques correspondiente (capítulo 13), con la única diferencia de que en aquel caso la envolvente representaba el grado de compresión, y en este caso representa la ganancia.

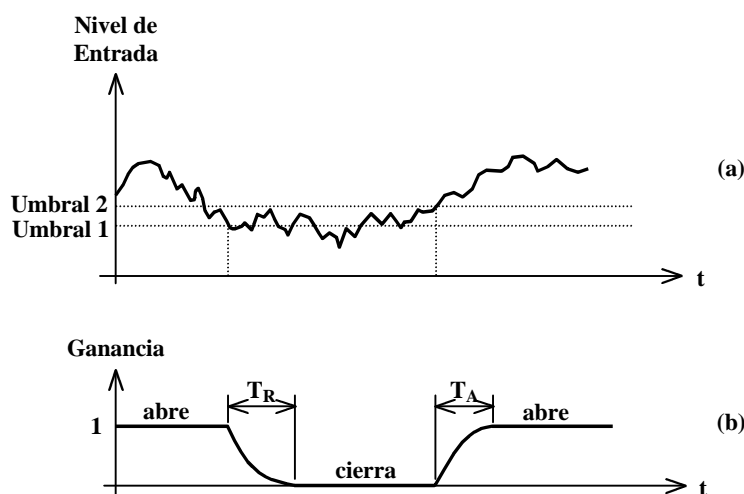


Figura 14.4. Compuerta con histéresis y tiempos de ataque y relevo. (a) Evolución de una señal de entrada. (b) Ganancia de la compuerta.

14.5. Expansores

Por último, existe una variante más en lo que respecta a compuertas, y es la posibilidad de que la “ganancia” cuando la compuerta se cierra no sea **0** sino un valor mayor, tanto más cercano a **1** cuanto más cerca esté la señal del umbral. En este caso la compuerta se denomina **expansor**, ya que convierte el rango dinámico de la parte de la señal que está por debajo del umbral en un rango dinámico mayor según una **relación de expansión** determinada. Por ejemplo, si fijamos la relación de expansión en **1:3**, y el umbral en **−50 dBV**, una señal de entrada que baje hasta **−56 dBV** habrá bajado **6 dB**, por lo cual después del expansor la salida deberá bajar $6 \times 3 = 18 \text{ dB}$, y tendrá entonces un nivel $-50 - 18 = -68 \text{ dBV}$. La operación es, por lo tanto, inversa a la del compresor.

En la **Figura 14.5** se muestra la familia de curvas para diversas relaciones de expansión. La compuerta pura se obtiene para la relación **1:∞**.

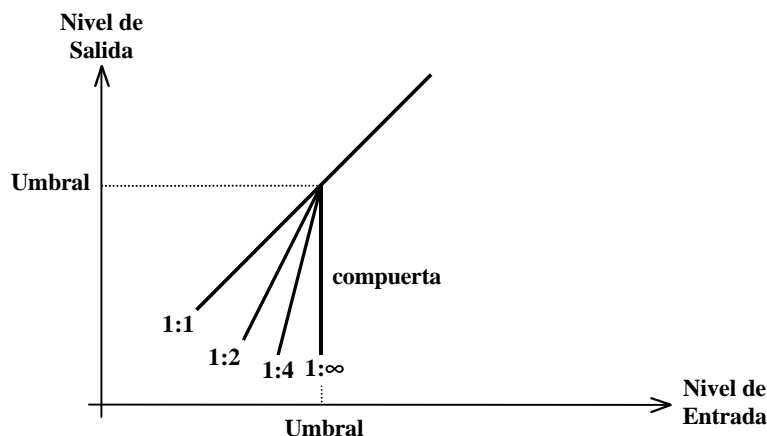


Figura 14.5. Efecto de las diversas relaciones de expansión sobre la operación de un expansor.

Los expansores pueden utilizarse no sólo como compuertas, sino también para restituir el rango dinámico de señales que han sido comprimidas, por ejemplo señales de una radio **FM**, o de un cassette. Sin embargo, es necesario advertir que es difícil, si no imposible, lograr una compensación total de una compresión realizada con un compresor, salvo si ex profeso se comprime utilizando un umbral muy bajo y posteriormente se expande con un umbral muy alto, y en ambos casos con relaciones complementarias (por ejemplo una compresión de **2:1** y una expansión de **1:2**. Estos procedimientos aseguran que se comprima y expanda *toda* la señal y no sólo partes de ella. Una aplicación de los pares compresor-expansor complementarios es la reducción del ruido en las grabaciones en cinta magnética.

Tanto las compuertas como los expansores proveen en general acceso a la cadena lateral (**side-chain**), lo cual permite controlar la operación con una señal diferente de aquella a procesar. Así, puede habilitarse una señal recién cuando aparece otra, lo cual en ciertos casos es útil para mejorar el sincronismo entre dos instrumentos. También es posible utilizar la cadena lateral simplemente para intercalar un filtro o un ecualizador y así habilitar la apertura de la compuerta sólo cuando están presentes ciertas frecuencias. Muchos equipos vienen con filtros incorporados, con llaves para intercalarlos en la cadena lateral.

Finalmente, algunos equipos incorporan simultáneamente un compresor-limitador y una compuerta (con sus filtros), lo cual brinda mayor versatilidad, ya que en un solo procesador dinámico se incluyen las funciones básicas de compresión y expansión.

Las especificaciones de las compuertas y expansores merecen los mismos comentarios hechos oportunamente para los compresores y limitadores. En general la distorsión aumenta cuando la señal está siendo expandida, y por ello deberían especificarse cuidadosamente las condiciones en que se ha realizado la medición.