

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”).

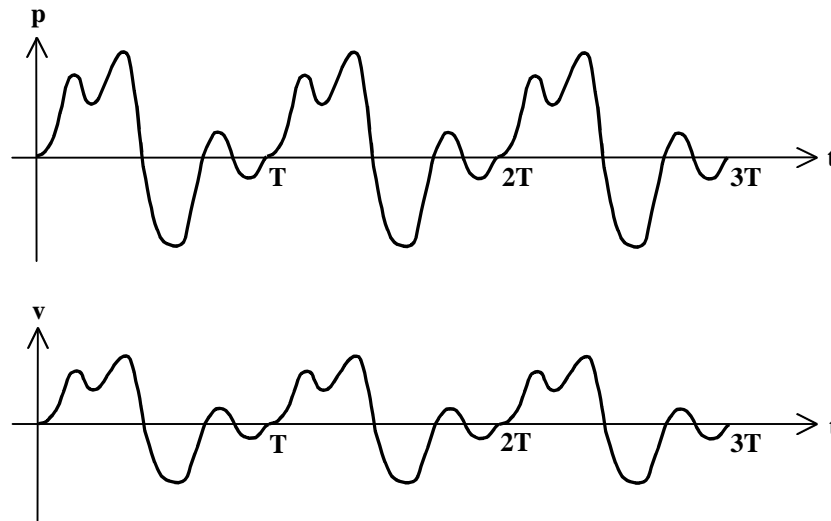


Figura 6.1. Forma de onda de una señal sonora (presión) y su análoga eléctrica (tensión). Obsérvese que las formas de onda, así como sus frecuencias, son iguales. El cambio aparente de amplitud, en realidad se debe a que los factores de escala no son iguales. En otras palabras, no es posible comparar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

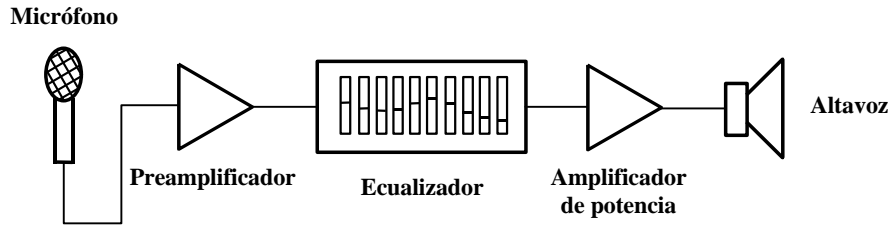


Figura 6.2. Un ejemplo de diagrama de bloques

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**!

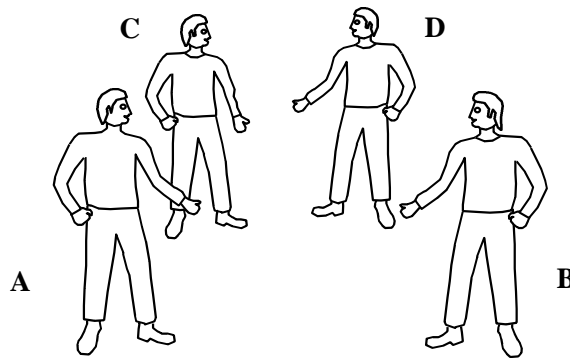


Figura 6.3. Cuatro personas conversando. **A** escucha a **B** y **C** escucha a **D**. Lo que habla **D** es ruido para **A** pero no para **C**; y lo que habla **B** es ruido para **C** pero no para **A**.

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 conexión, 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 **decibeles**:

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

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

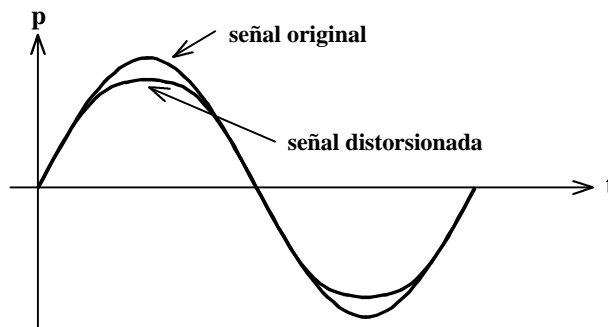


Figura 6.4. Deformación de una onda senoidal a causa de una distorsión en el sistema.

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.

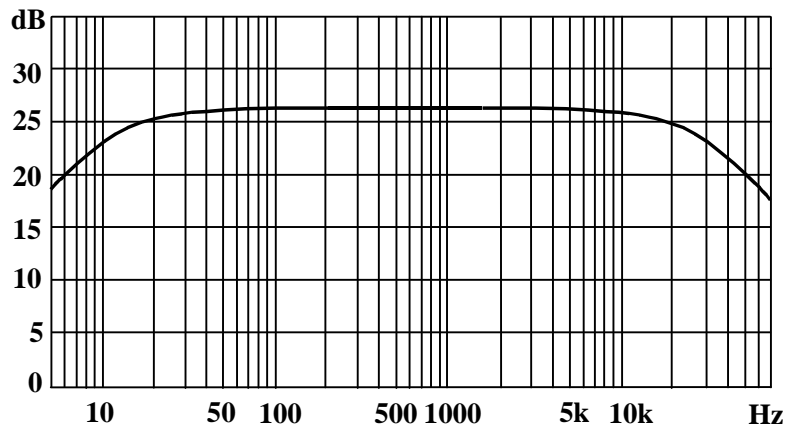


Figura 6.5. Respuesta en frecuencia de un amplificador.

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.