

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.

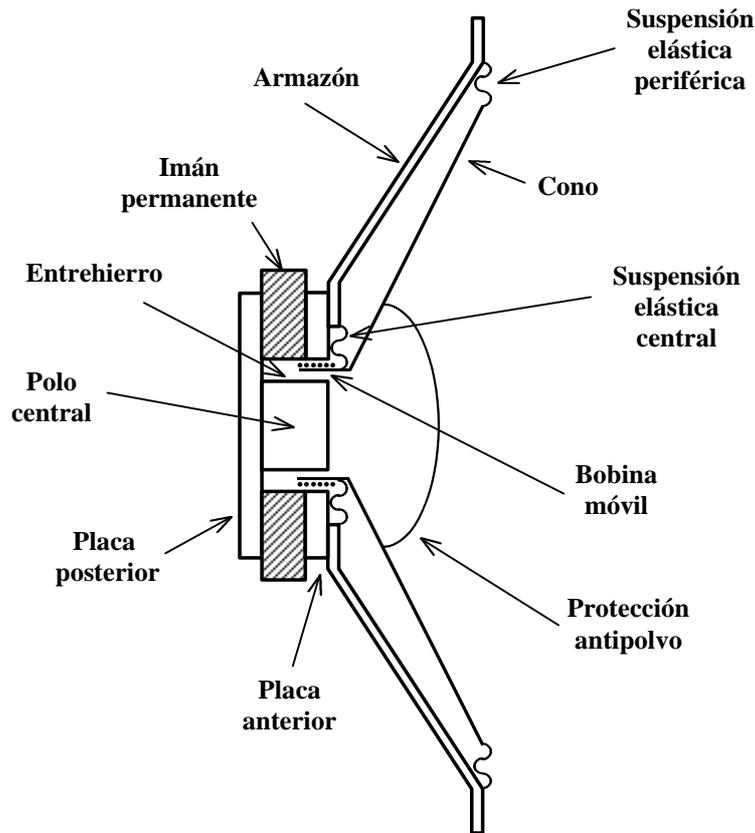


Figura 10.1. Corte transversal de un altavoz de bobina móvil típico, en donde se indican sus partes funcionalmente más importantes.

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.

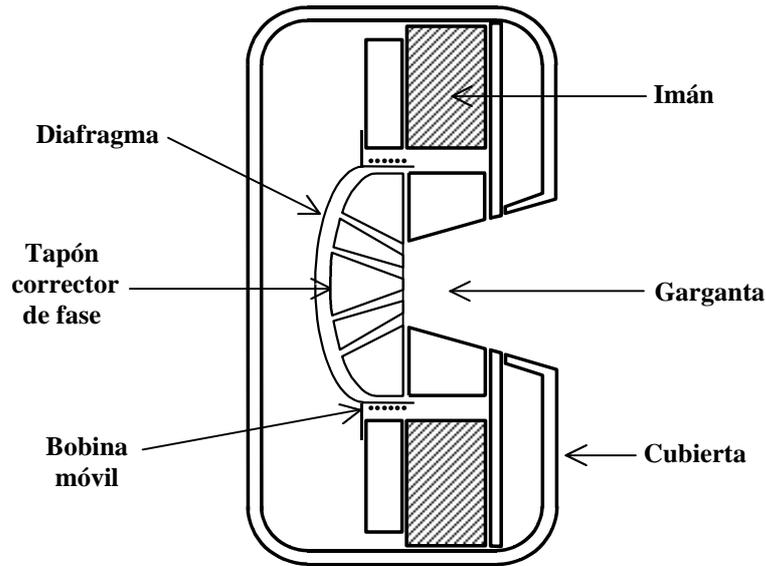


Figura 10.2. Un excitador de compresión (compression driver) que es el elemento motor de un tweeter.

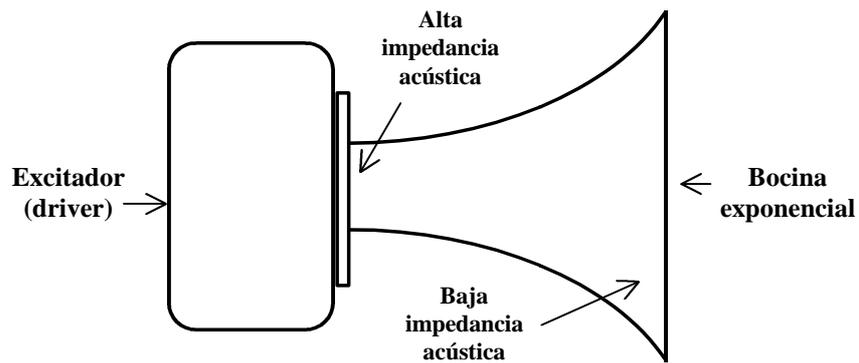


Figura 10.3. Un excitador de compresión acoplado al ambiente por medio de una bocina exponencial.

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.

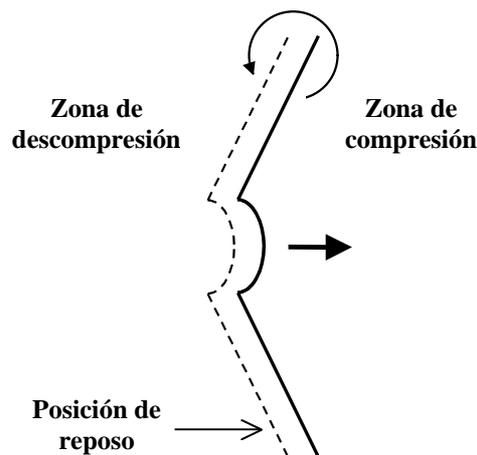


Figura 10.4. Un altavoz de radiación directa sin caja acústica provoca al mismo tiempo zonas de compresión y de descompresión que producen cancelaciones de sonido.

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 ($\lambda/2$).

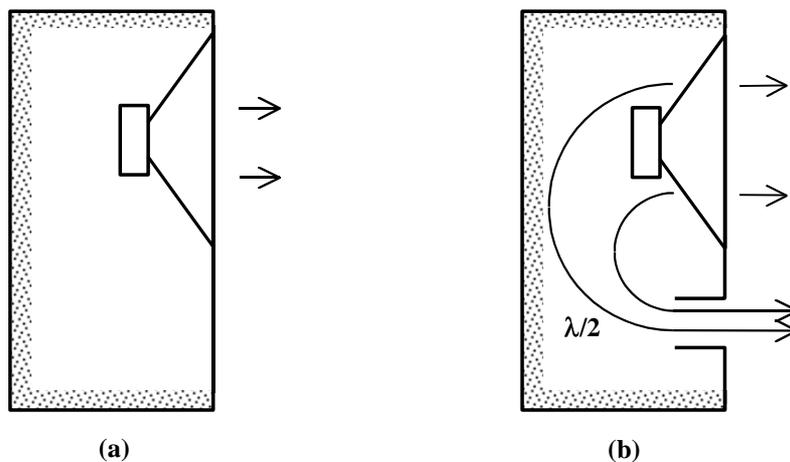


Figura 10.5. (a) Un **baffle cerrado**. La onda generada por la parte posterior del cono es absorbida por el recubrimiento absorbente. (b) Un **baffle reflector de bajos**. La onda creada por la parte posterior del cono recorre una distancia igual a media longitud de onda antes de salir por la abertura 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**.

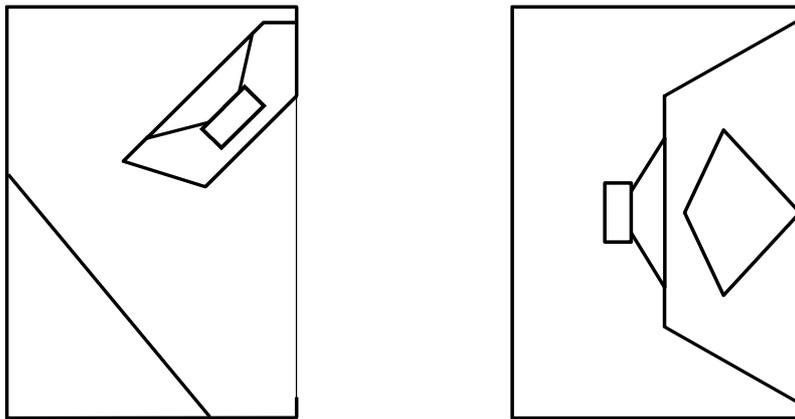


Figura 10.6. Dos tipos de baffle de bocina para baja frecuencia. La bocina se encuentra plegada sobre sí misma de modo de reducir el espacio requerido. Por esa razón se suele denominar **folded horn**.

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

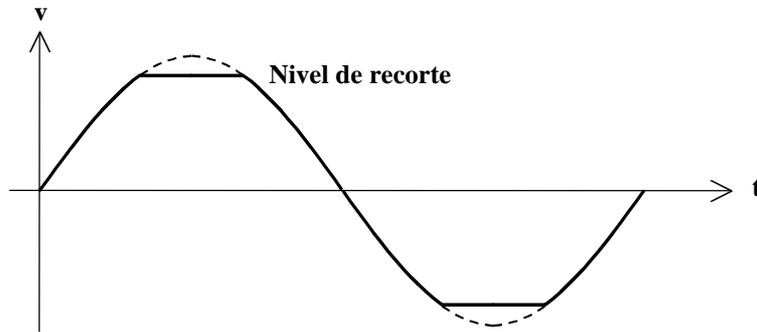


Figura 10.7. Una onda senoidal recortada por saturación del amplificador de potencia. En línea de trazos se ve la parte recortada.

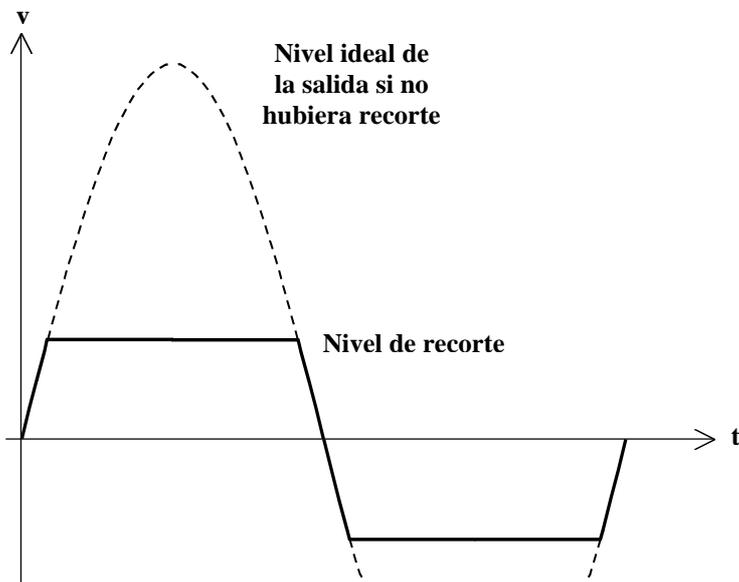


Figura 10.8. Una onda senoidal recortada fuertemente por la saturación del amplificador de potencia. En línea de trazos, la onda senoidal ideal. Se puede observar cómo la onda resultante se parece más a una onda cuadrada.

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

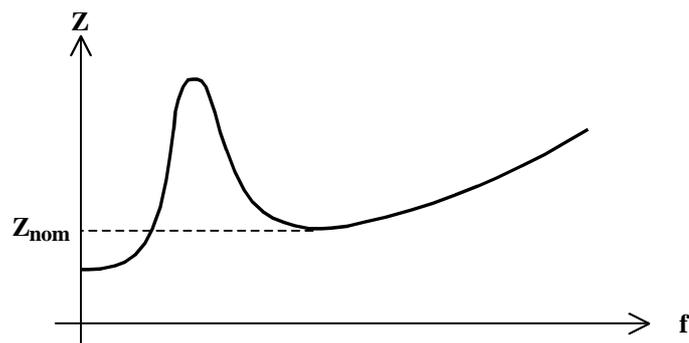


Figura 10.9. Curva de la impedancia de un altavoz sin montar, en función de la frecuencia de la señal que se le aplica. La **impedancia nominal** es la impedancia mínima después de la resonancia.

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**.

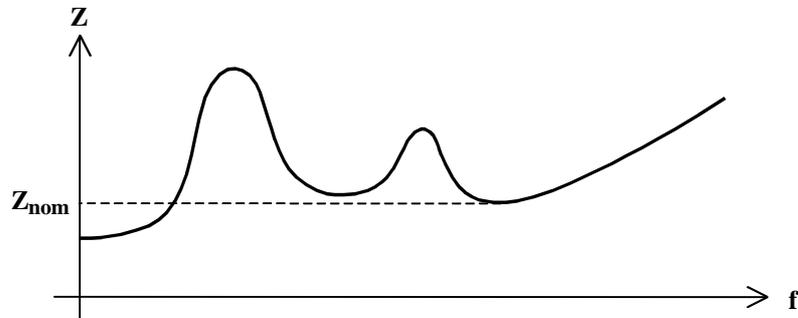


Figura 10.10. Curva de la impedancia de una caja acústica de dos vías, en función de la frecuencia de la señal que se le aplica. La **impedancia nominal** es la impedancia mínima después de las resonancias.

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

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

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 bafle 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 bafle 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 bafle*) 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 bafle 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**

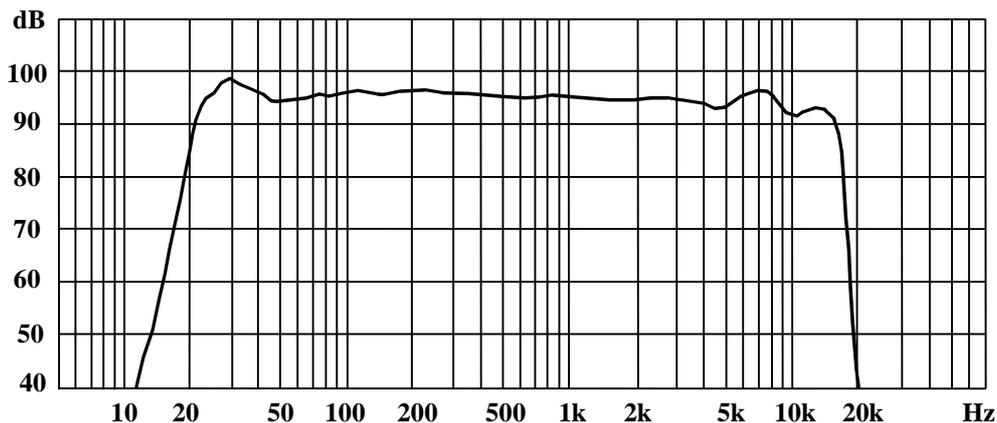


Figura 10.11. Respuesta en frecuencia de una caja acústica .

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).

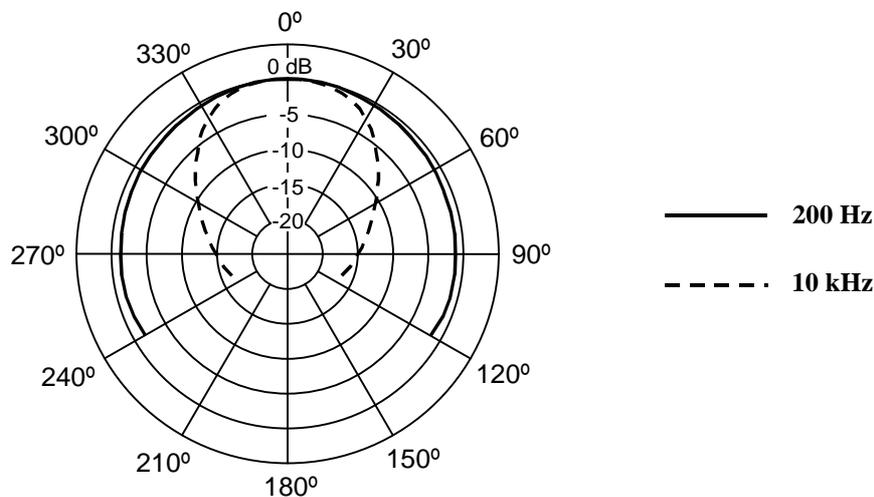


Figura 10.12. Diagrama direccional de un baffle en el plano horizontal. El patrón polar resulta simétrico por la simetría horizontal del baffle, y en alta frecuencia es muy unidireccional.

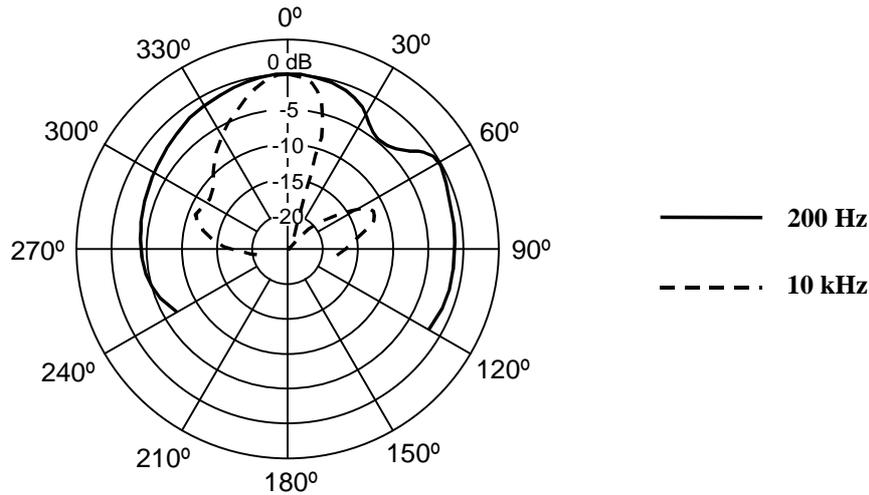


Figura 10.13. Diagrama direccional de un baffle en el plano vertical. El patrón polar es muy asimétrico y la asimetría se profundiza en alta frecuencia.

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.