

HI-FI: CAJAS ACÚSTICAS Y FILTROS

Los altavoces presentes en el medio emiten, generalmente, una onda acústica en cada una de las caras de su membrana o diafragma. Ahora bien, estas ondas están en oposición de fase. Por este motivo, cuando la longitud de onda acústica que se va a reproducir es grande respecto a las dimensiones del altavoz, habrá en él un cortocircuito acústico debido a que se produce difracción alrededor del cono. Este fenómeno atenúa el nivel del sonido y provoca un rendimiento muy pobre en las bajas frecuencias.

En efecto, supongamos un altavoz que en un momento dado produce un desplazamiento hacia adelante, provocando así una compresión de la masa de aire que se encuentra en su parte anterior. En este mismo instante se está produciendo una depresión o enrarecimiento de la masa de aire situada en la parte posterior. Por ello, el frente de presión producido en la zona anterior avanza en todas direcciones y provoca una compresión en la zona anterior del altavoz, rodeando el contorno de éste y alcanzando su cara posterior. De esta forma, se atenúa en parte la depresión que allí se había originado, como se puede observar en la Figura 1.

Para evitar el efecto producido hay que proveer al altavoz o altavoces de un sistema que evite en lo posible el cortocircuito acústico entre las dos ondas producidas por las diferentes caras del altavoz, aislando una de otra. Es posible atenuar o suprimir este efecto aumentando la distancia que separa las dos caras de la membrana mediante un baffle (deflector), nombre que reciben genéricamente las cajas o pantallas acústicas que encierran en su interior herméticamente los altavoces utilizados en HI-FI.

Un baffle es, pues, un dispositivo que impide la interacción perjudicial entre las dos ondas generadas en las caras anterior y posterior del altavoz.

Por otra parte, es muy difícil que un solo altavoz pueda reproducir toda la gama de frecuencias audibles. Por ello, se recurre a un sistema de varios altavoces de diferentes características en cuanto a su respuesta de frecuencia acoplados entre sí mediante un filtro divisor de frecuencias, con el fin de que cada uno de ellos reproduzca la gama de frecuencias más apropiada a sus características.

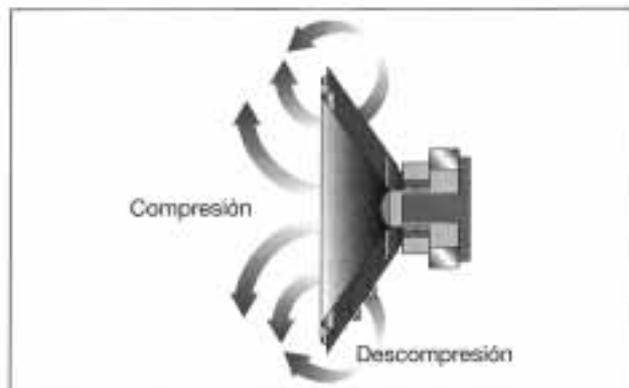


Figura 1. Los frentes de presión producidos en la cara anterior de un altavoz alcanzan la cara posterior de éste y anulan la descompresión producida en ella, reduciendo el rendimiento del transductor.



1. FILTROS DIVISORES DE FRECUENCIA

Es ampliamente conocido que los altavoces pueden utilizarse para reproducir diferentes zonas del espectro de audio, dando lugar a una especialización de los mismos. Dada la dificultad técnica que entraña que un solo transductor (altavoz) reproduzca, con la necesaria fidelidad y potencia, todo el espectro de audio, la

solución idónea es utilizar varios altavoces específicos para cada zona de frecuencias (graves, medios y agudos) de forma que, solapándose, cubran toda la banda de audiofrecuencia.

Efectivamente, si queremos reproducir toda la gama de frecuencias de audio, lo lógico es utilizar varios al-

tavoces para que cada uno de ellos trabaje en su zona adecuada. Así, obtendremos un mayor rendimiento y calidad de los sonidos emitidos. Si empleamos, por ejemplo, tres altavoces, ¿cómo debemos acoplarlos a la salida del amplificador? Una solución posible es acoplarlos en paralelo; pero en este caso llegan al altavoz de graves las mismas frecuencias que al de agudos, y si bien el primero reproduce perfectamente los graves, permanece prácticamente impasible frente a los agudos, perdiéndose, por tanto, una parte de la energía correspondiente a las notas altas. Lo mismo podríamos decir del altavoz de agudos frente a los graves, y del altavoz de medios frente a los extremos de la banda de audio.

En definitiva, conectando así los tres altavoces se perdería una energía considerable y, por consiguiente, el rendimiento del sistema sería muy bajo y no obtendríamos la calidad deseada. Así pues, a cada altavoz debe aplicársele únicamente la gama de frecuencias que puede reproducir y para la que se encuentra diseñado. De ahí la necesidad de separar las frecuencias del espectro de audio para entregar cada gama de frecuencias al altavoz apropiado que saque el mayor rendimiento de ellas. Ésta es la finalidad de los filtros divisores o separadores de frecuencias.

Gracias al filtro es posible igualar las curvas de respuesta y de impedancia, trabajar las rotaciones de fase y conseguir un mayor rendimiento en la calidad de la reproducción del sonido.

En general, se utilizan dos tipos de filtros para la separación de las frecuencias en audio frecuencia: los filtros pasivos y los filtros activos. Éstos, a su vez, pueden subdividirse en varios tipos, como tendremos oportunidad de estudiar.

El tipo de filtro más utilizado para los divisores de frecuencia en las pantallas acústicas es el de configuración pasiva, constituido por elementos inductivos y capacitivos (bobinas y condensadores) que, en función de la impedancia variable que poseen con la frecuencia, de-

jan pasar cierta banda del espectro de audio. De esta manera forman las redes pasivas que constituirán los diferentes tipos de filtros que se intercalarán entre la salida del amplificador y los altavoces (normalmente se alojan en el interior de las pantallas acústicas). Funcionan a baja impedancia y alta potencia (Fig. 2.a).

El filtro activo se utiliza en multi-amplificación (varios amplificadores), estando cada altavoz excitado por su propio amplificador. En este caso, el filtro se sitúa entre el preamplificador y los amplificadores de potencia. Un filtro de este tipo funciona en alta impedancia y baja potencia (Fig. 2.b).

Este sistema tiene la ventaja de que no debe manejar potencias elevadas y que puede conseguir mayores pendientes de atenuación.

Como inconvenientes, es obvio que se utilizan tanto amplificadores como grupos de señales que precisen el sistema, y ello implica un mayor costo. Los filtros pasivos son los más empleados en la práctica debido a su mayor economía, aunque presentan el inconveniente de que toda la potencia debe pasar a través de los mismos, y ello tiene la desventaja de la pérdida de potencia.

Las características principales de los filtros pasivos utilizados en las cajas acústicas son:

- El número de vías.
- La frecuencia de cruce o transición (crossover).
- La pendiente del filtro.
- La impedancia de carga.

1.1. El número de vías

Normalmente, las cajas acústicas que se encuentran en el mercado pueden tener dos o tres vías y estar formadas por simples circuitos o redes compuestas por inductancias, condensadores y resistencias. Su principio de fun-

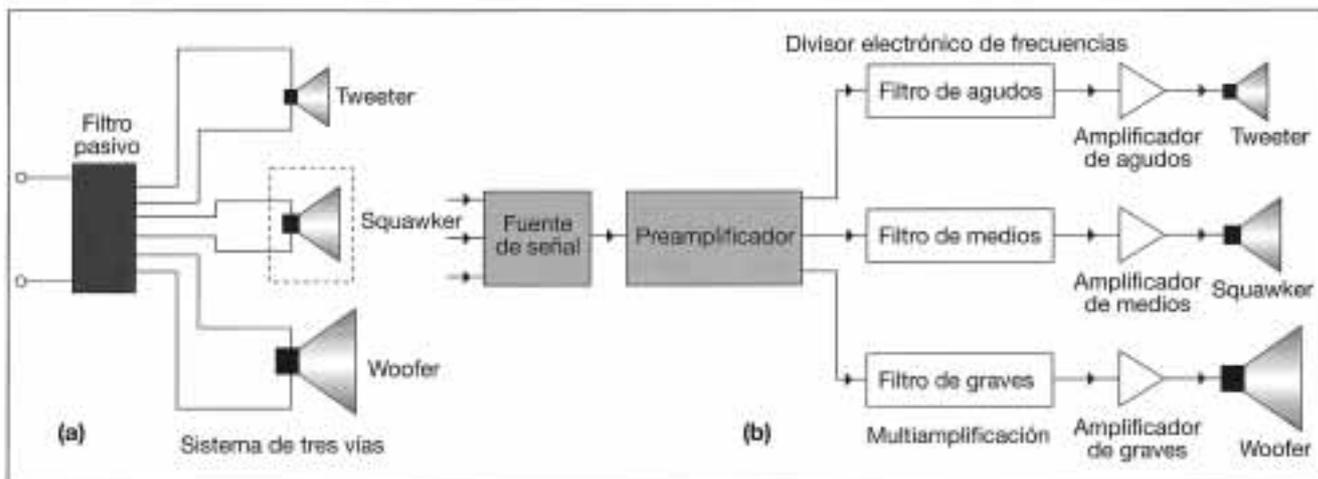


Figura 2. a) Diagrama de bloques de un filtro pasivo. b) Diagrama de bloques de un filtro activo utilizado en multi-amplificación.

cionamiento está basado en el efecto que presentan las reactancias capacitivas de los condensadores e inductivas de las bobinas frente a la frecuencia.

Quizá la red más simple que podemos obtener es la que aparece en la Figura 3, formada por un solo condensador conectado en serie con el altavoz de agudos o bien una bobina conectada con un altavoz de graves. Como la reactancia capacitiva (resistencia del condensador a la corriente alterna) disminuye con la frecuencia, el condensador en serie con el altavoz actuará de manera que ofrezca una resistencia muy pequeña a las altas frecuencias, dejando que éstas pasen fácilmente, a la vez que impide el paso a las bajas frecuencias. En resumen, el condensador en serie es un filtro paso-alto (deja pasar las altas frecuencias y bloquea las bajas). De este modo, al altavoz de agudos sólo llegan las frecuencias que deje pasar el condensador, las altas, mientras que el de graves recibirá todas las frecuencias de la banda de audio, ya que no tiene ningún elemento reactivo que lo impida.

Podemos modificar esta red divisora y evitar la llegada de las altas frecuencias al altavoz de graves colocando en serie en su circuito una inductancia, puesto que ésta actúa de filtro paso-bajo (deja pasar las bajas frecuencias y bloquea las altas) (Fig. 4.a).

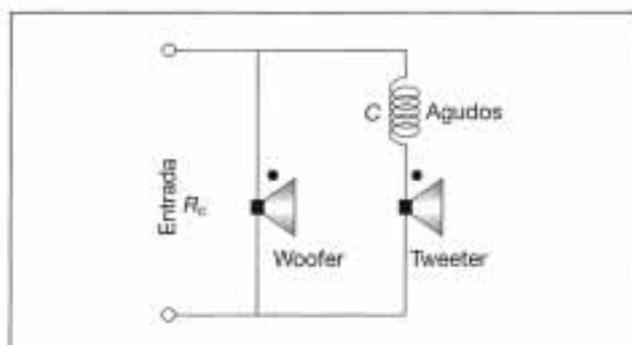


Figura 3. Filtro elemental de 6 dB/octava formado por un simple condensador en serie con el altavoz de agudos. (Cortesía de Niniwatt.)

Otro sistema parecido al anterior, pero con los altavoces alimentados en serie, es el de la Figura 4.a. El condensador, en paralelo con el altavoz de graves y en serie con el de agudos, cortocircuita al altavoz de graves cuando la frecuencia de la señal es muy elevada, por lo que dicha señal quedará aplicada al altavoz de agudos. Igualmente, la bobina conectada en paralelo con el altavoz de agudos y en serie con el de graves cortocircuita al altavoz de agudos cuando la frecuencia aplicada al conjunto es baja, por tanto la señal quedará aplicada al altavoz de graves.

Los filtros de dos vías que se muestran en las Figuras 4 a-b son de resistencia constante, donde la impedancia de R_0 es constante e igual a $R_0 = \sqrt{LC}$ para todo el espectro de audio.

En el caso de los filtros con 6 dB/octava, Figura 4, la impedancia de los elementos capacitivo e inductivo a la frecuencia de cruce es igual al valor de R_0 .

Unos filtros de dos vías, más usuales y de mejores prestaciones en su pendiente (12 dB/octava) que los anteriores, son los que aparecen en las Figuras 5.a y b.

Para los filtros con pendiente de atenuación de 12 dB/octava, el valor de las impedancias a la frecuencia de cruce se hace igual a $R_0 \times \sqrt{2}$ en el caso de montaje paralelo (Fig 5.a), y en el caso del montaje en serie (Fig 5.b) se hace igual a $R_0/\sqrt{2}$. Esto significa que en este tipo de montajes, las dos inductancias tienen el mismo valor; lo mismo se puede afirmar de los condensadores.

En la Figura 5.a podemos observar un filtro paralelo de dos vías que está formado por dos redes que funcionan independientemente para cada altavoz. La red del altavoz de graves está constituida por una inductancia L_1 en serie con el altavoz (filtro paso-bajo) que deja pasar la banda correspondiente de frecuencias bajas acorde al valor de la inductancia, y un condensador C_1 en paralelo con él (filtro paso-alto) que cortocircuita las altas frecuencias de audio que puedan llegar al mismo a masa. Igual le sucede a la red del altavoz de agudos, que está constituida por un condensador en serie C_2 (filtro paso-alto) y una bobina en paralelo L_2 (filtro paso-bajo).

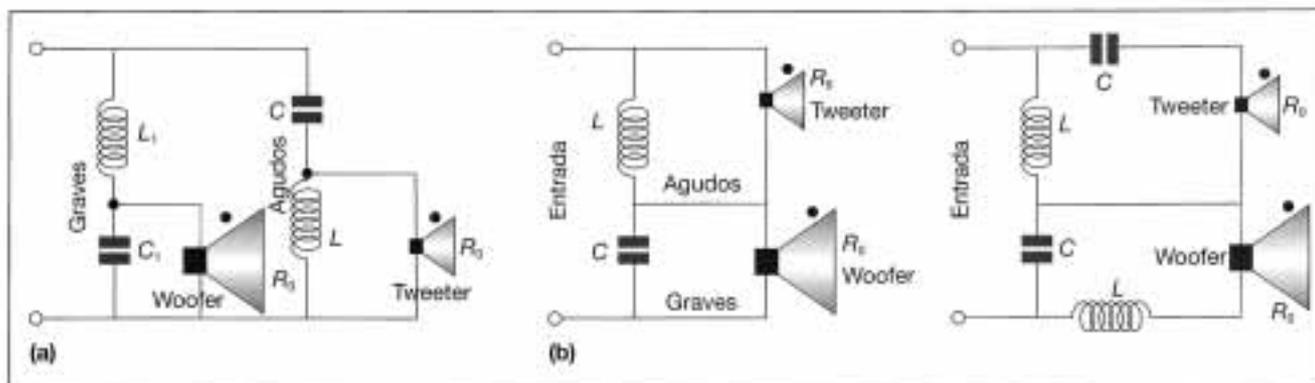


Figura 4. a) Circuito de un filtro divisor de frecuencias paralelo de dos vías para las frecuencias de graves y de agudos con una pendiente de 6 dB/octava. b) Circuito de un filtro de dos vías conectando a los altavoces en serie.

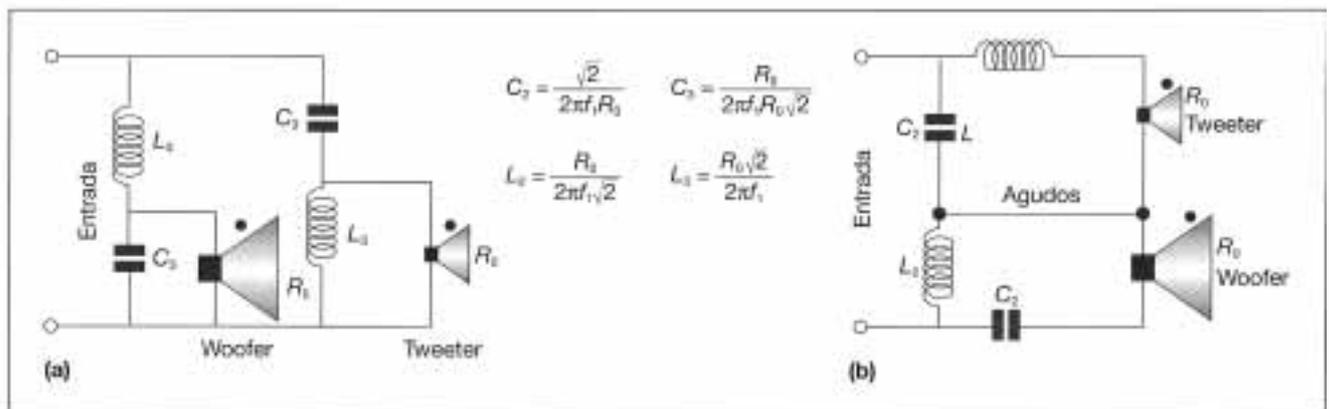


Figura 5. a) Circuito de un filtro de dos vías con una pendiente de 12dB/octava con altavoces conectados en paralelo. b) Circuito de un filtro de dos vías con una pendiente de 12 dB/octava con altavoces alimentados en serie.

En la Figura 5. b se representa un circuito de dos vías, para el caso de que los altavoces estén conectados en serie. El funcionamiento es similar a los anteriores, en él la red del altavoz de graves funciona mediante una bobina L_2 en paralelo con el altavoz de agudos (filtro paso-bajo) cortocircuitando la señal de baja frecuencia que pueda quedar aplicada a dicho altavoz y aplicándola sólo al altavoz de graves. El condensador C_2 en paralelo con el altavoz de graves (filtro paso-alto) tiene por misión cortocircuitar las altas frecuencias que puedan llegar al altavoz de graves y la bobina L_2 que se encuentra en serie con el altavoz de graves forma un filtro paso-bajo, que tiene por misión bloquear las altas frecuencias y evitar su paso hacia el altavoz de graves dejando pasar sólo las bajas frecuencias.

La red del altavoz de agudos funciona de forma similar a la anterior.

En las cajas acústicas utilizadas para HI-FI se uti-

lizan generalmente tres vías. Son muy empleadas las dos vías frecuentemente en líneas domésticas de bajas prestaciones, donde la calidad de sonido no es muy notable.

A continuación vamos a estudiar los filtros divisores de tres vías: una de graves, otra de medios y la tercera de agudos. Este circuito se basa en los mismos principios estudiados con anterioridad, asociando filtros paso-bajos, paso-altos y paso-bandas en serie y paralelo y utilizando los valores de las inductancias y condensadores para determinar el paso de una banda de frecuencias y atenuar otras.

Los circuitos de la Figura 6 están compuestos por dos filtros de tres vías y 6 dB/octava en serie y paralelo respectivamente. La vía de graves del circuito paralelo está formada por una inductancia L_4 en serie con el altavoz de graves, la cual está calculada para oponerse al paso de las frecuencias medias y altas hacia el citado altavoz. La segunda vía de medios está constituida por un filtro paso-banda constituido por C_6 y L_6

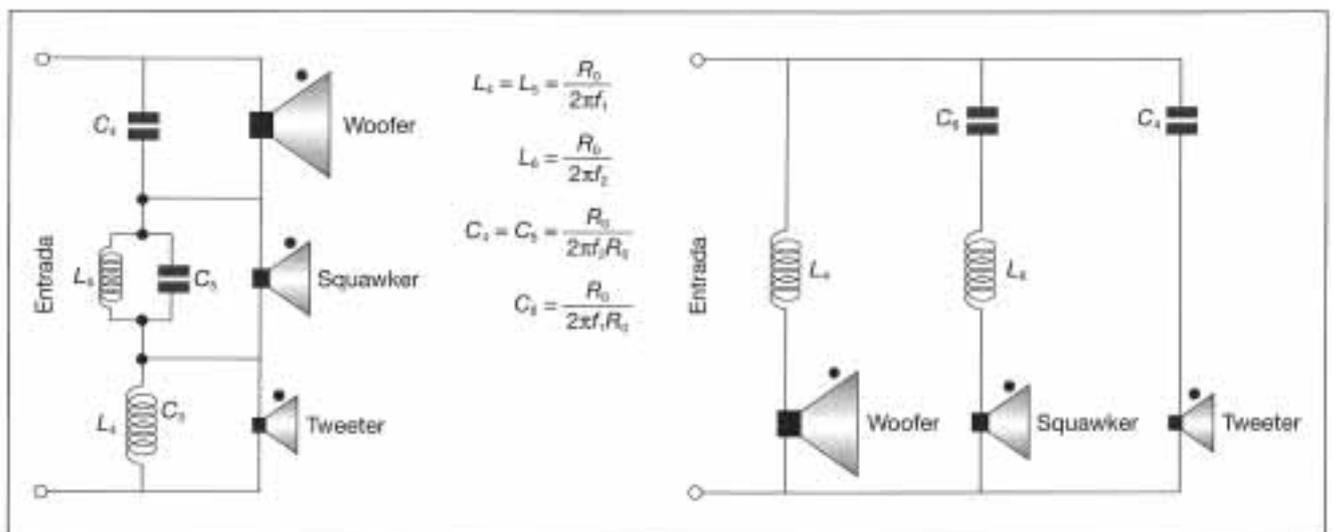


Figura 6. Filtros de tres vías con una pendiente de 6 dB/octava en serie y paralelo respectivamente.

que deja pasar todo el espectro de las frecuencias de medios y atenúa las demás. Por último, la vía de agudos la forma un filtro paso-alto, que está constituido por un condensador de valor adecuado C_4 en serie con el altavoz de agudos que permita el paso de las altas frecuencias hacia el altavoz y atenúa el resto.

También podemos encontrar en el mercado filtros pasivos de tres vías más eficientes y con atenuaciones mayores en sus pendientes que utilicen a los altavoces conectándolos en serie o paralelo, como los circuitos de la Figura 7.

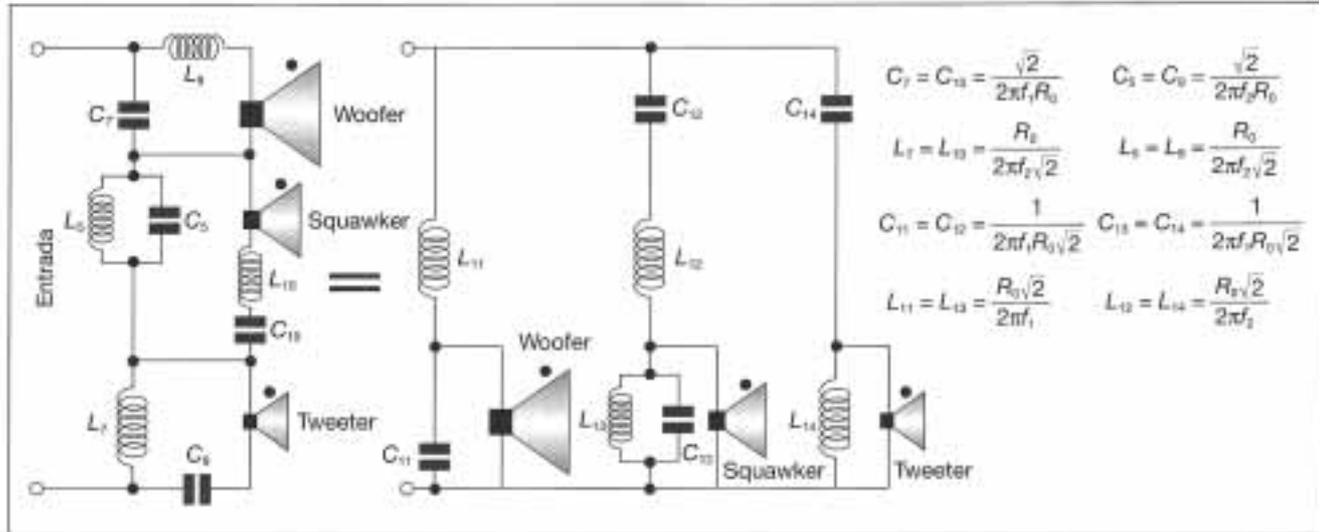


Figura 7. Filtros divisores de tres vías con una pendiente de 12 dB/octava, con altavoces asociados en serie y paralelo respectivamente.

Para calcular un filtro de 3 vías y 12 dB/octava se pueden utilizar las siguientes expresiones:

$$L_1 = (1000 \times Z)/(6,28 \times f_2) \quad L_2 = (1000 \times Z)/(6,28 \times f_1)$$

$$L_3 = (1600 \times Z)/(6,28 \times f_2) \quad L_4 = (1600 \times Z)/(6,28 \times f_1)$$

$$L_4 = (1000 \times Z)/(6,28 \times f_1) \quad L_5 = (1600 \times Z)/(6,28 \times f_2)$$

$$C_1 + C_2 = 1000000/(10,048 \times f_2 \times Z)$$

$$C_3 + C_4 = 1000000/(10,048 \times f_1 \times Z)$$

$$C_5 + C_6 = 1000000/(6,28 \times f_2 \times Z)$$

$$C_7 + C_8 = 1000000/(6,28 \times f_1 \times Z)$$

El dicho filtro f_1 es la frecuencia de cruce inferior en hercios (500 Hz), f_2 es la frecuencia de cruce superior en hercios (4000 Hz), Z es la impedancia de los altavoces en ohmios, L es la inductancia en mH y C es la capacidad en faradios (Fig. 8).

1.2. Frecuencias de cruce o transmisión

Al hablar de filtros divisores de frecuencia es imprescindible mencionar la **frecuencia de cruce**, que se con-

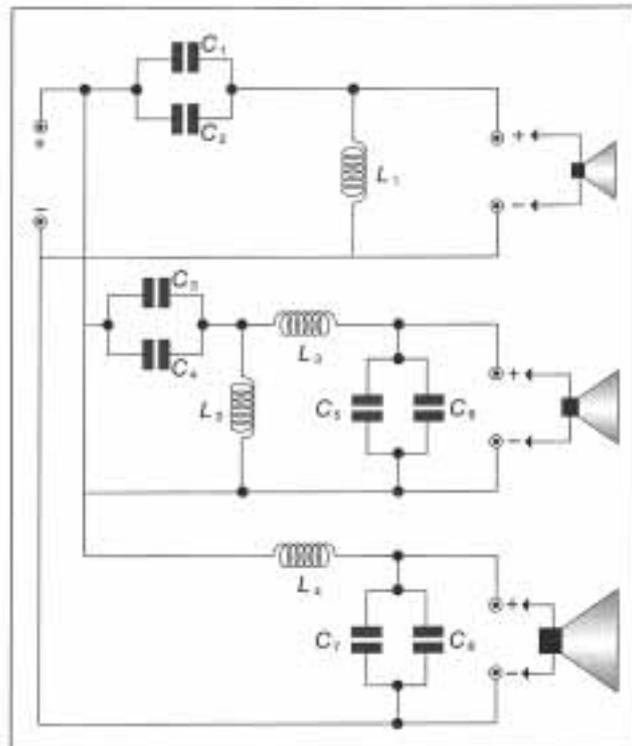


Figura 8. Filtro divisor de tres vías con 12 dB de atenuación por octava, con altavoces en paralelo.

sidera como la frecuencia cuya amplitud es un 70,7 por 100 del valor de la amplitud máxima de la señal tratada o, lo que es lo mismo, $1/\sqrt{2}$ de la amplitud máxima (punto de potencia media -3 dB). En la Figura 9 se ha representado una curva de respuesta de un filtro de una red pasiva; en él podemos observar la frecuencia (f_0) para la cual la amplitud de la tensión es máxima y las dos frecuencias de corte tanto inferior (f_i) como superior (f_s). Por debajo y por encima de estas frecuencias la tensión en bornes de salida es inferior al 70,7 por 100 de la tensión máxima. El ancho de banda Δb del citado circuito estará, por tanto, comprendido entre estas dos frecuencias de corte inferior (f_i) y superior (f_s). Todo cuanto se ha expuesto se refiere, pues, a un filtro pasivo compuesto por una inductancia y un condensador en paralelo (circuito resonante).

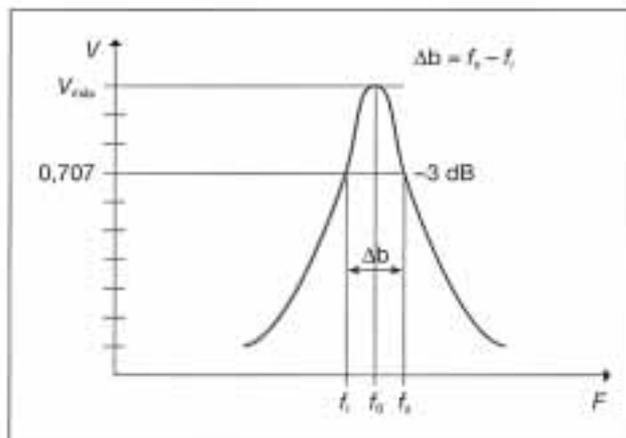


Figura 9. Curva de respuesta de un circuito de filtro pasivo donde se representan las frecuencias de corte inferior (f_i) y superior (f_s) que tienen una amplitud igual al 70,7 por 100 de la amplitud máxima.

Ahora bien, en el caso de los filtros pasivos divisores de frecuencia que se encuentran formados por una sola red pasiva (filtro paso-bajo, paso-alto), existirá sólo una frecuencia de corte.

Como hemos podido observar, las redes constituidas por inductancias y condensadores forman los diferentes filtros, que tendrán por misión actuar sobre una determinada banda de frecuencias a la que facilitarán su paso a través de la red constituida por el filtro, atenuando o eliminando al resto de la banda. ¿Qué factor determina ese límite de paso? La frecuencia de corte.

En el caso de los condensadores, en los que la reactancia capacitiva disminuye proporcionalmente con la frecuencia aplicada, considerando un circuito abierto para la componente continua, la frecuencia de corte será sólo una, aquella para la cual la tensión en sus bornes de salida alcanza un valor superior al 70,7 por 100 de la tensión aplicada a su entrada.

Consideremos un condensador en serie con un altavoz de agudos. Si mantenemos constante la tensión efi-

caz aplicada en sus bornes de entrada, observaremos cómo la tensión en los extremos del condensador aumentará al disminuir la frecuencia (a mayor reactancia del condensador, mayor tensión entre sus extremos), mientras que en el altavoz disminuirá (diferencia entre la tensión aplicada a la entrada del filtro y la tensión en los extremos del condensador).

Idénticas consideraciones podemos aplicar al caso de las inductancias, con la diferencia de que en ellas la reactancia inductiva se reduce al disminuir la frecuencia y viceversa.

Para conocer el principio de funcionamiento de los filtros divisores de frecuencia de dos vías, podemos aplicar una tensión de baja frecuencia variable en todo el espectro de audio mediante un generador de BF a la entrada de un amplificador, para estudiar la curva de respuesta del conjunto amplificador-filtro. La curva de respuesta será distinta en función de que la tensión de salida se tome en la salida del filtro de agudos o de graves. En la Figura 10 se pueden observar las curvas de salida de un filtro de dos vías.

Pues bien, las dos curvas de respuesta deben ser complementarias, de tal forma que, consideradas en conjunto, la respuesta del sistema sea plana en todo el espectro de audio. Es decir, se trata de que la tensión de salida del conjunto se mantenga por encima del 70,7 por 100 de la tensión máxima. Esto se consigue logrando obtener una misma frecuencia de corte, o sea, allá donde el filtro paso-bajo comienza a atenuar las frecuencias altas, el filtro paso-alto empieza a permitir su paso (Fig. 10.c).

Para ello es imprescindible que la frecuencia de corte superior de la red de graves coincida con la frecuencia de corte inferior de la red de agudos. A esta frecuencia común de las dos redes se le denomina **frecuencia de cruce o transición**. En la Figura 10.a de nuestro ejemplo dicha frecuencia de cruce es de 2 kHz.

Por consiguiente, al conectar un filtro de dos vías con frecuencia de corte en 2 kHz a un amplificador que desarrolle 60 W, al altavoz de graves esta frecuencia llegará con tan sólo 30 W. Así, este altavoz reproduciría esta frecuencia con tan sólo 30 W, pero no debemos olvidar que también el filtro paso-alto sólo dejará pasar hacia el *tweeter* esta misma frecuencia atenuada en 3 dB, por lo que este segundo altavoz reproducirá los 2 000 Hz con otros 30 W. Sumando los 30 W del *woofer* con los 30 W del *tweeter*, obtendremos de nuevo la potencia total de 30 + 30 W.

Cuando se utilizan filtros de tres vías, además del filtro paso-bajo (para el *woofer*) y del paso-alto (para el *tweeter*), existe también un filtro paso-banda (para el *squawker*), que sólo permite el paso de las frecuencias de los medios.

En los filtros de tres vías existen dos frecuencias de cruce, la correspondiente a la frecuencia de cruce entre la banda de graves y medios, que se suele calcular entre 500 y 800 Hz, y la frecuencia de cruce, que se encuentra entre la banda de medios y agudos y se suele calcular para una frecuencia de corte comprendida entre 4 000 y 5 000 Hz. En la Figura 11 se aprecia que las dos frecuencias de cruce de este filtro de tres vías son de 500 y 4 000 Hz.

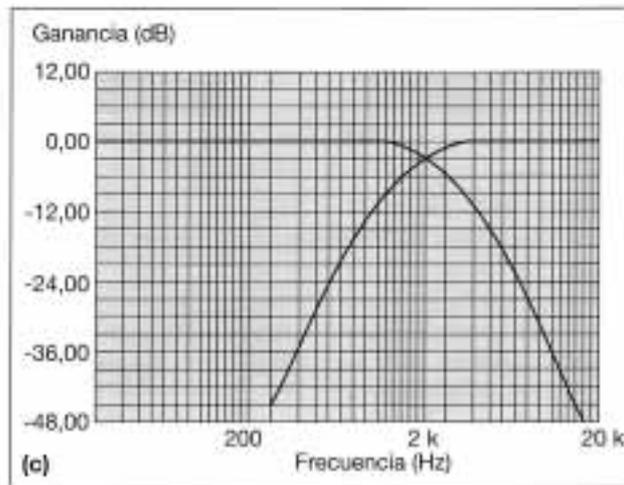
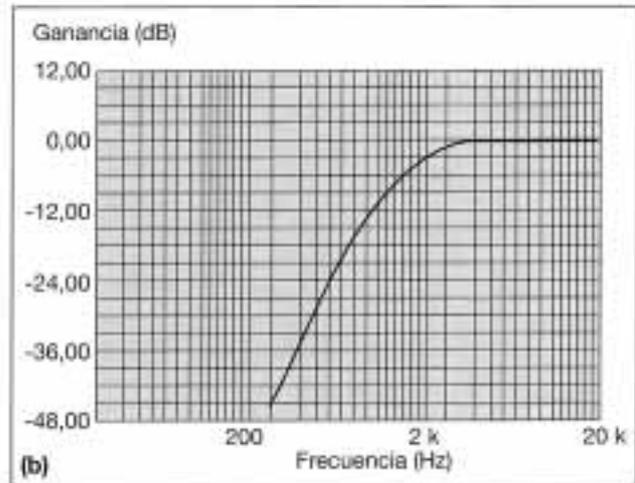
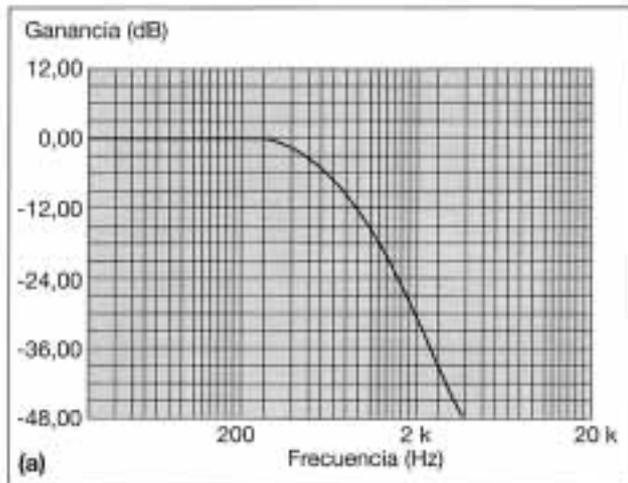


Figura 10. **a)** Curva de respuesta de salida del filtro de graves. **b)** Curva de respuesta de salida del filtro de agudos. **c)** Curvas de respuesta complementarias de un filtro de dos vías para graves y agudos.

Hay que indicar, por último, que cuando las vías del filtro son dos, los altavoces utilizados para graves y agudos deberán cubrir una banda más amplia en su respuesta de frecuencias que cuando se trate de filtros de tres vías. En las Figuras 10.c y 11 la respuesta de frecuencia para los diferentes altavoces de graves y de agudos difiere considerablemente.

1.3. Pendiente de un filtro

No hay que confundir el concepto de atenuación de un filtro a la frecuencia de corte, que está normalizada para todos los filtros en -3 dB, con el concepto de pendiente de un filtro, el cual se expresa en decibelios por octava (Figura 12).

Para comprender este concepto pasaremos a ilustrarlo con un ejemplo. Si tomamos la Figura 12, constituida por la curva de respuesta de un filtro paso-

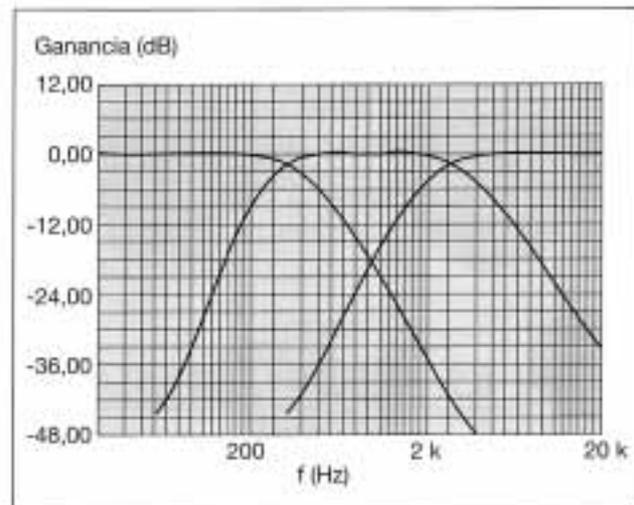


Figura 11. Curva de respuesta de un filtro de tres vías que dispone de dos frecuencias de corte.

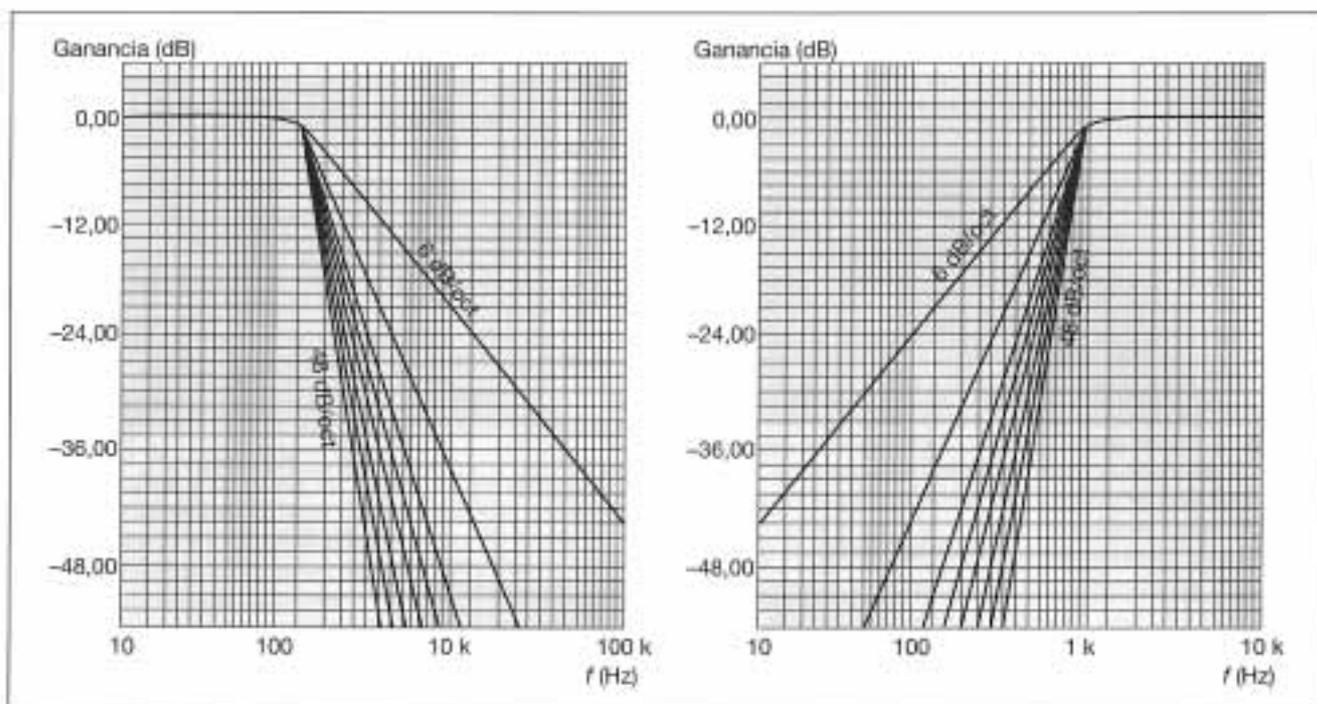


Figura 12. Curvas de respuesta de varios tipos de filtros paso-bajo y paso-alto con diferentes grados de atenuación.

alto, observaremos que la frecuencia de cruce está en 1 000 Hz. A esta frecuencia la atenuación es de -3 dB, pero la pendiente puede ser diferente tomando valores de 6, 12, 18 o hasta 48 dB/octava.

Efectivamente, cuando se dice que un filtro produce una atenuación de 6 dB/octava, significa que, por cada octava, la señal queda atenuada 6 dB. Es decir, que la primera octava superior 2 kHz e inferior 500 Hz son atenuadas en 6 dB, y así sucesivamente para cada octava con respecto a la señal de referencia o de máxima amplitud, 0 dB.

Si tomamos un filtro con atenuación de 18 dB/octava, la atenuación será mayor y, por tanto, el filtro será más selectivo. En la Figura 12 se muestran las curvas de respuesta de tres filtros de distinta pendiente y con una frecuencia de corte común de 1 kHz (frecuencia de corte).

Como se puede comprobar, las distintas curvas se cruzan en -3 dB, circunstancia común para la frecuencia de cruce, pero, sin embargo, las pendientes son di-

ferentes para cada una. Atenúa más el filtro de mayor pendiente, por tanto, será el más selectivo, al poseer un ancho de banda más estrecho.

1.4. Efecto de impedancia de carga de un altavoz

La **impedancia de carga** de un filtro nos da la *resistencia que éste debe presentar a su entrada y a su salida para adaptar la impedancia del amplificador a la de los altavoces a los que va a alimentar*. Como los valores de las inductancias y de las capacidades están calculados para conseguir una frecuencia de cruce concreta para un valor exacto de impedancia, si se modifica éste se consigue un filtro que no desarrolla como es debido la función para la que ha sido previsto.



2. REDES COMPENSADORAS

Con objeto de obtener una curva de impedancia más regular y ajustar los diferentes filtros divisores de frecuencia a la curva de respuesta de cada altavoz, y conseguir que la carga eléctrica vista desde el amplificador sea mucho más estable, se compensan las curvas de impe-

dancia de los diferentes altavoces. El **principio de la compensación** es sencillo, pero su puesta en práctica es más complicada. *Es posible compensar la frecuencia de resonancia de los altavoces colocando una célula LRC en paralelo con los altavoces, que suprimirá la cresta de*

la frecuencia de resonancia de los altavoces. Esta corrección se aplica sólo a los altavoces de medios y de agudos.

Si se utiliza un altavoz convencional, es frecuente comprobar una fuerte subida de la curva de impedancia en alta frecuencia. Esta anomalía es debida al efecto autoinductivo de la bobina del altavoz. Se puede co-

rrregir mediante un circuito RC cableado en paralelo con los bornes del altavoz, llamado red de Zoobel.

En caso de un altavoz de graves o medios, el hecho de añadir este circuito de compensación permite una puesta a punto más cómoda del filtro divisor de frecuencia. En el caso del altavoz de agudos, este circuito evita los fuertes tonos de agudos.



3. RECINTOS ACÚSTICOS O CAJAS ACÚSTICAS

Independientemente del altavoz que se utilice para radiar energía sonora, será preciso separar la señal sonora emitida por la parte anterior de la emitida por la parte posterior, ya que las ondas generadas a cada lado del diafragma del altavoz están desfasadas 180° y cuando se encuentran tienden a anularse entre sí. Esto ocurre parcialmente en baja frecuencia, donde existe difracción alrededor del cono, ya que la fuente es omnidireccional y se produce una atenuación del sonido (cortocircuito acústico), debido a que existe una oposición de fase entre las señales emitidas por la parte anterior y posterior del altavoz (Fig. 1).

Para evitarlo, se debe utilizar un panel de gran superficie o pantalla acústica de una longitud igual a la longitud de onda de la frecuencia más baja que se quiera reproducir. Esta solución escapa a la posibilidad de instalarlo en cualquier habitación o recinto, y por ello se ha recurrido a otras soluciones mucho más prácticas y eficaces.

El efecto que produce la pantalla acústica al aislar las dos ondas emitidas por el altavoz en sus caras anterior y posterior se conoce con el nombre inglés de *baffle* (*deflector*). Con este nombre se conocen las pantallas o cajas acústicas que alojan en su interior los altavoces y los filtros que se utilizan en HI-FI.

Una de las soluciones aportadas para corregir este efecto consiste en plegar las paredes del panel utilizado para separar las ondas anteriores de las posteriores hasta formar una caja o recinto donde se deje *encerrada* la señal emitida por la parte posterior del altavoz. Esta medida plantea varios problemas; el más importante es que dentro de la caja donde se encierra el altavoz se producen resonancias debidas a las dimensiones del recinto y que son difíciles de eliminar. Para atenuar tal efecto se suelen emplear materiales absorbentes (fibra de vidrio, lana, etc.) que se colocan revistiendo todas las paredes interiores de la caja acústica para amortiguarlo en gran medida absorbiéndolo.

Además, si se quiere prever una buena reproducción de las bajas frecuencias hay que realizar una caja bastante grande, ya que la impedancia que ve la parte interior del altavoz aumenta a medida que el volumen de la caja disminuye. Además, el aire encerrado dentro del recinto ofrece una resistencia al ser comprimido, lo que produce un aumento de la frecuencia de resonancia del

altavoz y, como consecuencia, una pérdida en el ancho de la banda de reproducción de las frecuencias de graves. En la Figura 13.b se aprecia esta influencia sobre la frecuencia de resonancia.

Para evitar, en buena parte, estos problemas se han desarrollado varios sistemas de cajas o recintos acústicos que pasamos a estudiar.

En las curvas características de impedancia de estos recintos se pueden apreciar cuatro zonas en función de la frecuencia, que denominamos *A*, *B*, *C*, *D*, y que se corresponden con los diferentes factores que integran la impedancia de un altavoz con el recinto acústico que lo aloja y que pasamos a describir:

- La zona *A* indica la resistencia en corriente continua (0 Hz), que es la que se mide con un polímetro en la función de óhmetro entre los bornes del altavoz. Es importante indicar que ésta no se corresponde con la que se marca como impedancia característica sobre el altavoz, sino que es algo inferior.
- La zona *B* se corresponde con la impedancia que tiene el altavoz a su frecuencia de resonancia y se encuentra muy afectada por la construcción y colocación del altavoz.
- La zona *C* se sitúa aproximadamente entre los 400 y 1 kHz y no está afectada por la ubicación que toma el altavoz. Es la que realmente presenta la impedancia de un altavoz y con la que normalmente los fabricantes los marcan.
- La zona *D*, correspondiente a las más altas frecuencias, presenta un aumento paulatino de su impedancia debido al incremento de la impedancia que toma la bobina móvil.

3.1. Recinto infinito o *baffle* perfecto

La misión del *baffle* era evitar la radiación frontal del altavoz con la radiación posterior de éste, para así eludir el cortocircuito acústico. En la práctica, es necesario un panel con dimensiones superiores a la longitud de onda más baja que se quiera reproducir, lo que impide que este sistema sea utilizado.

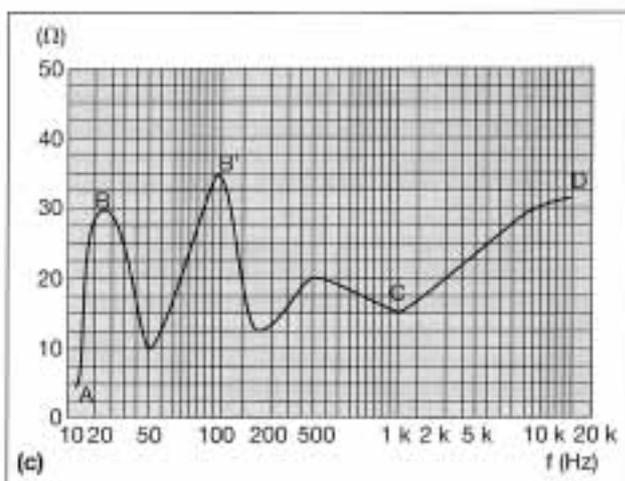
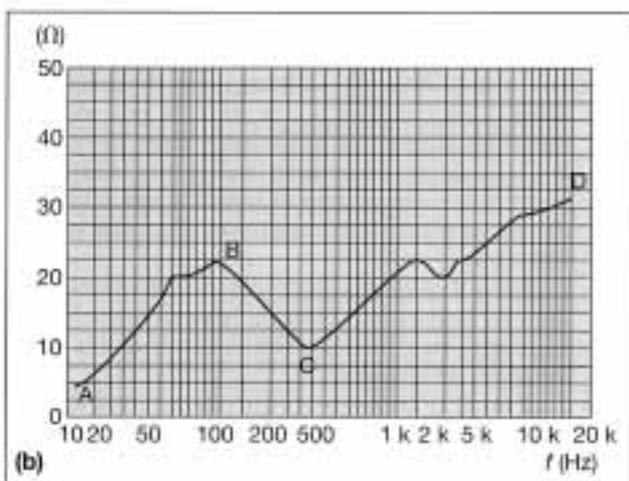
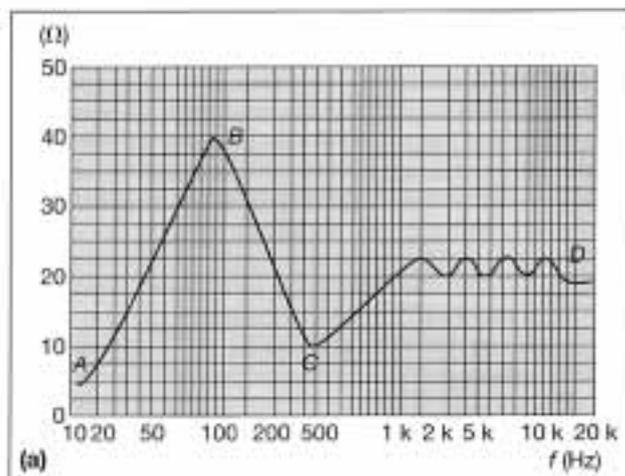
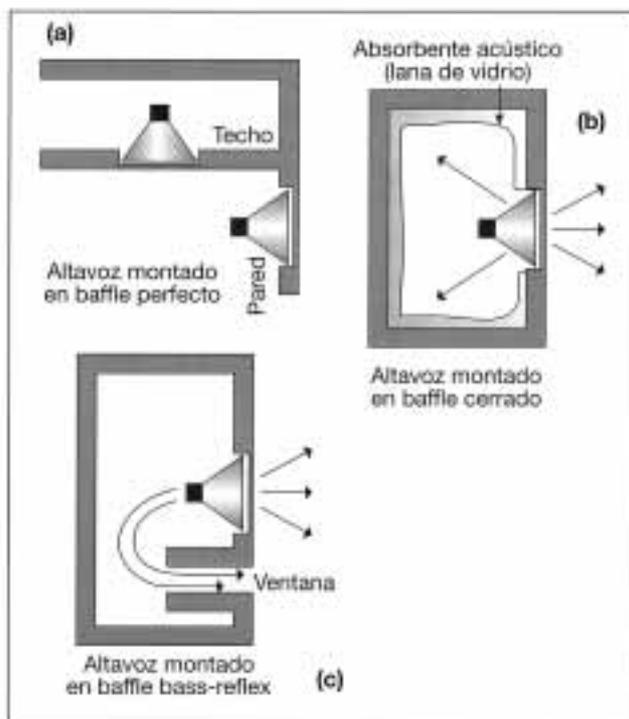


Figura 13. Constitución de los diferentes recintos acústicos que acogen a los altavoces y sus curvas típicas de impedancia en función de la frecuencia.

El sistema idóneo sería disponer de dos habitaciones separadas por un tabique en el falso techo en el cual se instalaría el altavoz. De esta forma, las ondas emitidas por las diferentes caras del altavoz no se relacionarían entre sí y se evitaría la interacción de ambas, llegando al oyente sólo las ondas emitidas por la cara anterior del altavoz. En sonorización es muy habitual este montaje, es el caso de los altavoces empotrados en techos, huecos de armarios, etc. (Fig. 13.a).

Cuando el altavoz se encuentra montado en el techo, la zona B de la curva de impedancia coincide con la **frecuencia de resonancia del altavoz**, que será la **mínima frecuencia a la que el altavoz funcionará a pleno rendi-**

miento. Ante la resonancia, la potencia que consume el altavoz es mínima, de ahí el elevado valor de su impedancia. La curva de impedancia se observa en la Figura 13.a.

3.2. Recinto cerrado o *baffle* cerrado

Una solución más práctica y que permite eliminar el cortocircuito acústico es el **recinto cerrado**, que *consiste en montar el altavoz o altavoces en una caja completamente cerrada, de forma que la propagación de la onda*

posterior no pueda salir del interior de la caja y se consiga una total separación entre las dos ondas generadas por el altavoz. Sin embargo, esto se logra a costa de modificar de forma inconveniente las condiciones de trabajo del altavoz o altavoces alojados en el interior de la caja (Fig. 13.b).

Este recinto cerrado tiene varios inconvenientes, ya que si elegimos una caja pequeña para contener el altavoz, la masa de aire que contiene ésta en su interior está sometida a sobrepresiones mucho mayores que las del aire de la habitación que formaba el *baffle* perfecto.

Aparentemente, es como si las suspensiones del altavoz se hubiesen hecho más rígidas, lo que tiene como consecuencia elevar la frecuencia de resonancia del altavoz y reducir, por tanto, el espectro de frecuencias en la zona de graves. Así pues, cuanto mayor sea el volumen del aire dentro de la caja acústica, menor será la frecuencia de resonancia y más amplia será la curva de respuesta de audio en el extremo de graves, lo que obliga a utilizar con este sistema cajas de dimensiones grandes.

En el caso del recinto cerrado, la emisión acústica producida por la parte trasera de la membrana del altavoz se pierde en parte en forma de calor a través del material absorbente que recubre todas las paredes interiores de dicho recinto y que está constituido por fibra de lana.

3.3. Recinto *baffle* de reflexión de graves (*bass-reflex*)

El sistema de reflexión de graves, en inglés *bass-reflex*, es una variante del recinto cerrado al que se le ha practicado un orificio en su parte anterior por el que sale la señal producida por la parte posterior del cono buscando aprovechar la radiación posterior del altavoz para recuperar las ondas perdidas en baja frecuencia por efecto de la caja. El objetivo es corregir el pico de resonancia del altavoz y extender la zona de reproducción de las frecuencias de graves más allá de lo que se conseguiría con una caja cerrada de las mismas dimensiones (Fig. 13.c).

El sistema *bass-reflex* basa su principio de funcionamiento en la resonancia mecánica, factor que depende del volumen de la caja acústica, del área del orificio

practicado a la caja y del volumen del aire puesto en vibración por el cono del altavoz, así como de la forma de la caja y de la suspensión del altavoz.

Dar una explicación clara y detallada de los fenómenos que tienen lugar en una caja *bass-reflex* requiere hacer uso de conocimientos de electroacústica que están fuera de nuestro estudio. Sin embargo, conviene saber que la masa de aire contenida por la caja, y que la parte posterior del cono pone en vibración, puede entrar en resonancia mecánica a una frecuencia que depende del volumen de la caja y del área de la ventana y que se denomina frecuencia de sintonía.

En las proximidades de la frecuencia de resonancia del sistema, la onda sonora provocada por la parte posterior del cono sufre en la caja una inversión de fase, de manera que emerge por la ventana en concordancia de fase con la onda generada por la cara anterior del altavoz y ambas, por consiguiente, se refuerzan aumentando la presión acústica a estas frecuencias.

Por otra parte, es importante dejar claro que a la frecuencia de resonancia, la carga que el aire contenido en el interior del recinto acústico ofrece al altavoz es mayor que a las demás frecuencias, por lo que a la frecuencia de resonancia, las vibraciones del cono tienen, para una misma señal de entrada, una amplitud menor que para otra cualquiera.

Pues bien, si las frecuencias de resonancia del altavoz y del sistema *bass-reflex* coinciden, el pico de resonancia del primero queda enérgicamente amortiguado por la mayor carga ofrecida por el segundo, y el margen de frecuencias reproducibles se extiende debido al refuerzo originado por la radiación a través de la ventana.

En la Figura 13.c podemos observar una curva característica típica de un sistema *bass-reflex*, donde la impedancia que presenta el gran pico alrededor de los 70 Hz indica la frecuencia de resonancia de la caja acústica-altavoces. El valle creado en torno a los 40 Hz es la frecuencia de resonancia de la ventana del sistema *bass-reflex*, donde ésta radia la máxima energía en baja frecuencia y el altavoz de graves radia la mínima energía.

Para frecuencias superiores, los fenómenos estudiados no tienen lugar y la caja se comporta como un *baffle*, si se ha tenido la precaución de no colocar la ventana muy próxima al altavoz.

La publicación de este artículo ha sido posible gracias a McGRAW HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.U. que ha concedido permiso para publicar este extracto de su libro EQUIPOS DE SONIDO y a SONY ESPAÑA S.A., que ha cedido la información contenida en este artículo.