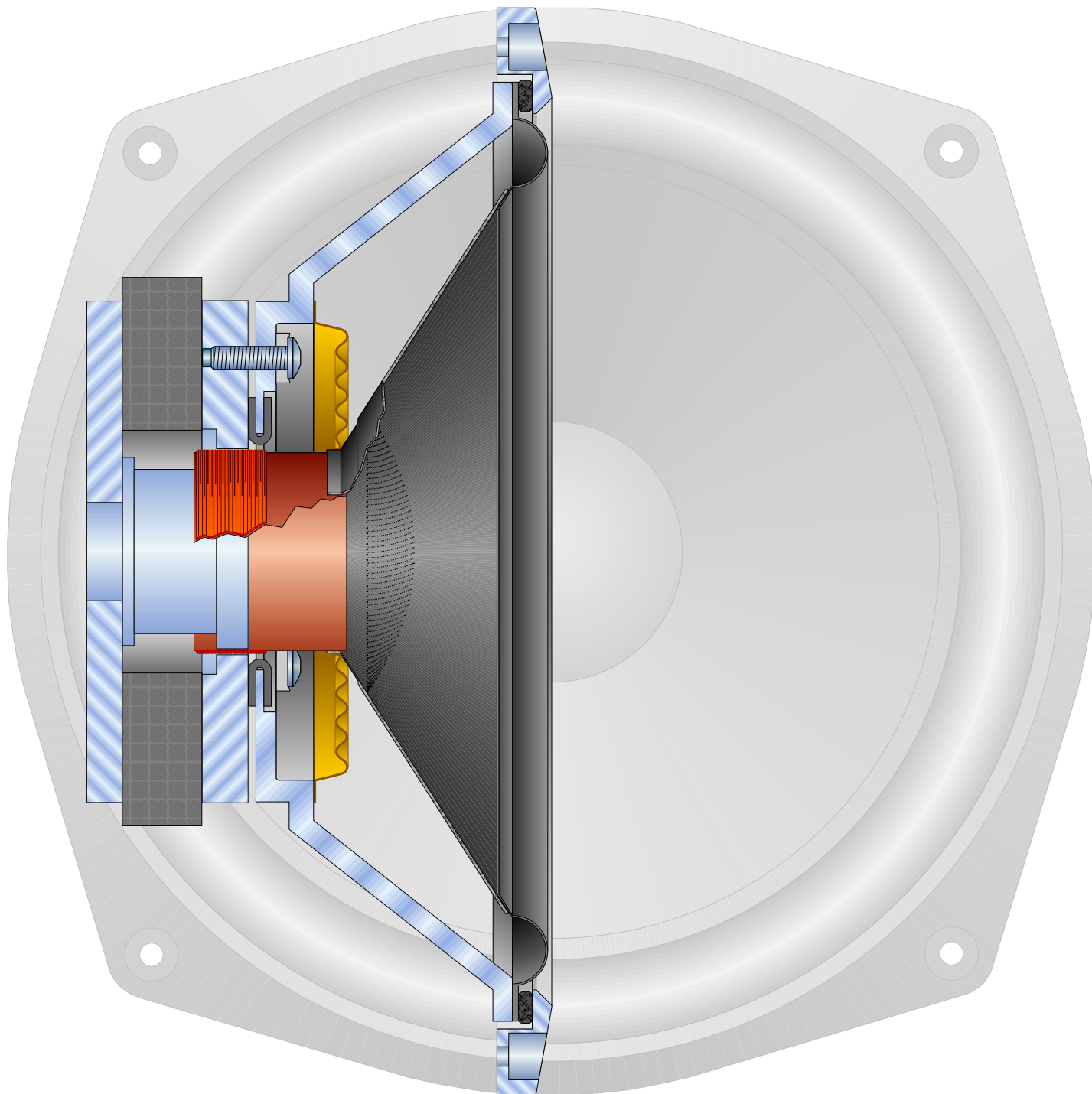


Altavoces y recintos acústicos

Breve descripción ilustrada de las tecnologías de los altavoces y los retos a los que se enfrentan

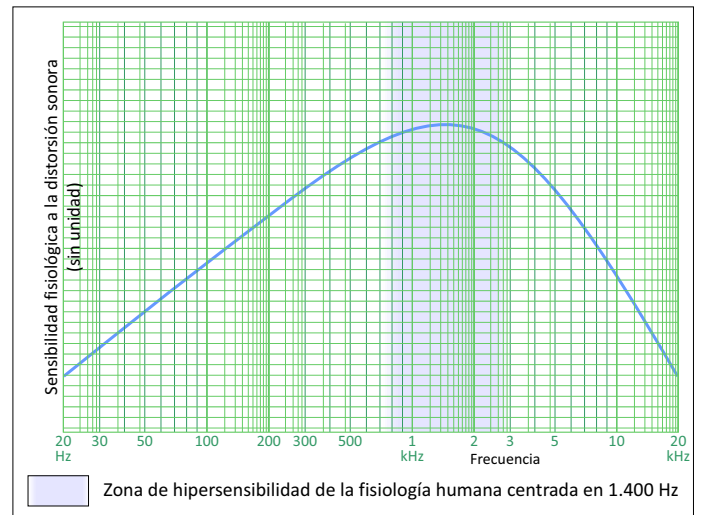
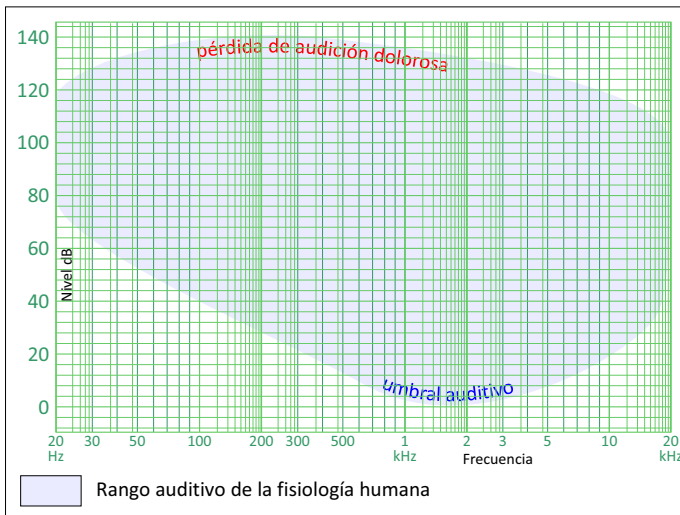


diciembre de 2025

Traducido del inglés al español por Josep Busquets

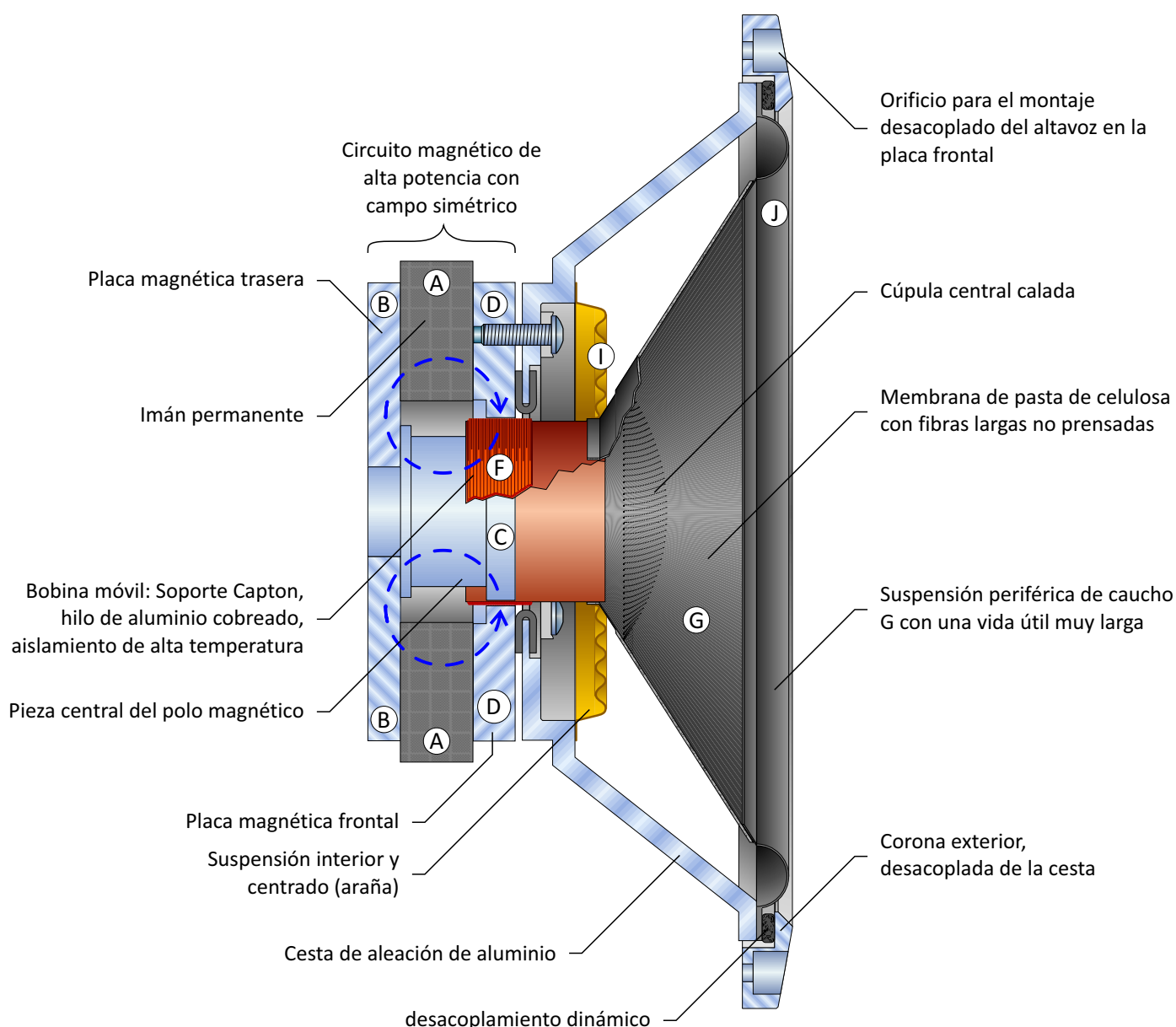
Sensibilidad fisiológica humana

La sensibilidad fisiológica humana es la base de todas las limitaciones a la reproducción de música de alta fidelidad. Esta sensibilidad no es lineal; ni en a la frecuencia ni en cuanto a la amplitud. Entre 78 y 102 decibelios (dB), una persona de 30 años aún puede oír señales sonoras con frecuencias entre 20 y 20.000 Hz. Al envejecer, los oídos de las personas pierden algo de sensibilidad a frecuencias más altas; con más de 60 años, las frecuencias por encima de 12 ó 14 kHz se atenúan, pero no se pierden del todo. Durante un concierto, un melómano de esta edad escucha la música con los oídos de su edad. Sin embargo, el sistema de análisis de su cerebro tiene mejores capacidades que la mayoría de las personas de 20 años. Esta capacidad cultural le permite saber escuchar mejor, aunque en realidad oiga . Podríamos decir que oímos con los oídos pero escuchamos con el cerebro. O podríamos decir - perdonen la comparación- que nuestros oídos son comparables a un hardware (micrófonos) que envejece con los años, y que nuestro cerebro funciona gracias a un software continuamente actualizado y adquirido culturalmente.



Así pues, nuestra sensibilidad fisiológica no es lineal en a la frecuencia, ni mucho menos. Existe una zona de hipersensibilidad situada en torno a los 1.400 Hz. La gama de frecuencias de 2 octavas alrededor de 1.400 Hz, es decir, de 700 a 2.800 Hz, es una "zona sagrada", en la que hay que tomar las medidas más draconianas para reducir cualquier forma de distorsión en la reproducción del sonido (distorsiones, ensanchamiento del tiempo de decaimiento y error direccional). Por lo tanto, esta gama de frecuencias requiere, en la medida de lo posible, el diseño de un recinto acústico a partir de su altavoz de medios y en torno a él. Exigimos a este altavoz un trabajo extremadamente preciso, teniendo en cuenta al mismo tiempo que el campo de acción se reduce únicamente a estas 2 octavas. Para completar la reproducción espectral en su conjunto, el sistema acústico debe complementarse con un altavoz de frecuencias graves (woofer) y un altavoz de frecuencias agudas (tweeter). En consecuencia, un recinto acústico de altas prestaciones debe estar equipado con no más (ni menos) de tres altavoces para ser un verdadero sistema de reproducción sonora.

Principio de funcionamiento de un altavoz



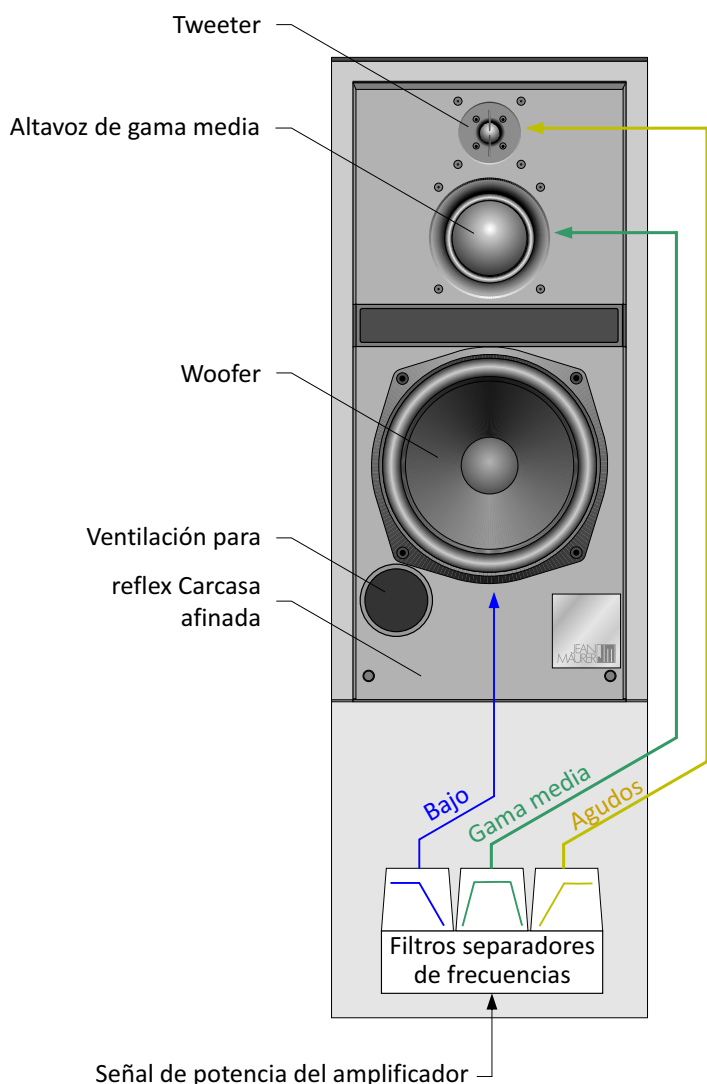
B245-5 woofer

El circuito magnético, formado por el imán circular de ferrita A, la placa magnética trasera B, el núcleo central C y la placa magnética delantera D, crea un campo magnético muy intenso en la estrecha ranura circular situada entre D y C, denominada entrehierro. La bobina móvil F y la membrana cónica G están suspendidas por las suspensiones I y J, de modo que la bobina está centrada en el entrehierro sin tocar los lados.

La corriente eléctrica procedente del amplificador pasa a través de la bobina móvil y, bajo la influencia del intenso campo magnético del entrehierro, empuja la membrana hacia delante o tira de ella hacia atrás, según la dirección de la corriente.

Al avanzar y retroceder al ritmo de la señal eléctrica (que es la imagen eléctrica del sonido captado por el micrófono durante la grabación), la música se recrea con mayor o menor fidelidad.

La construcción de un recinto acústico y la distribución de la carga de potencia

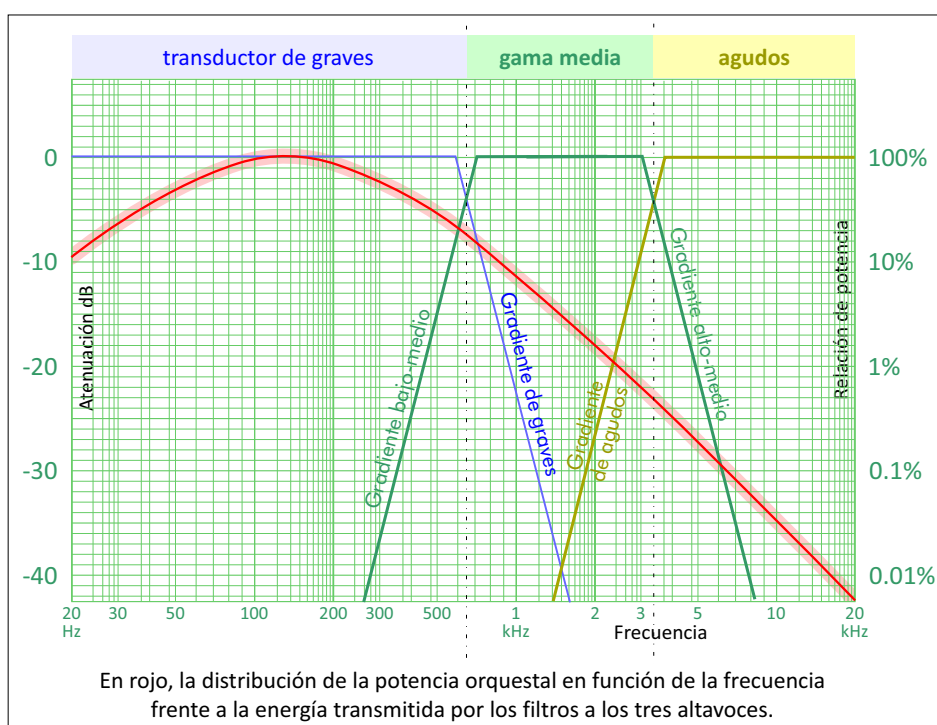


Un recinto acústico consta de tres grupos de elementos que tienen la misma importancia para un rendimiento general de alta fidelidad:

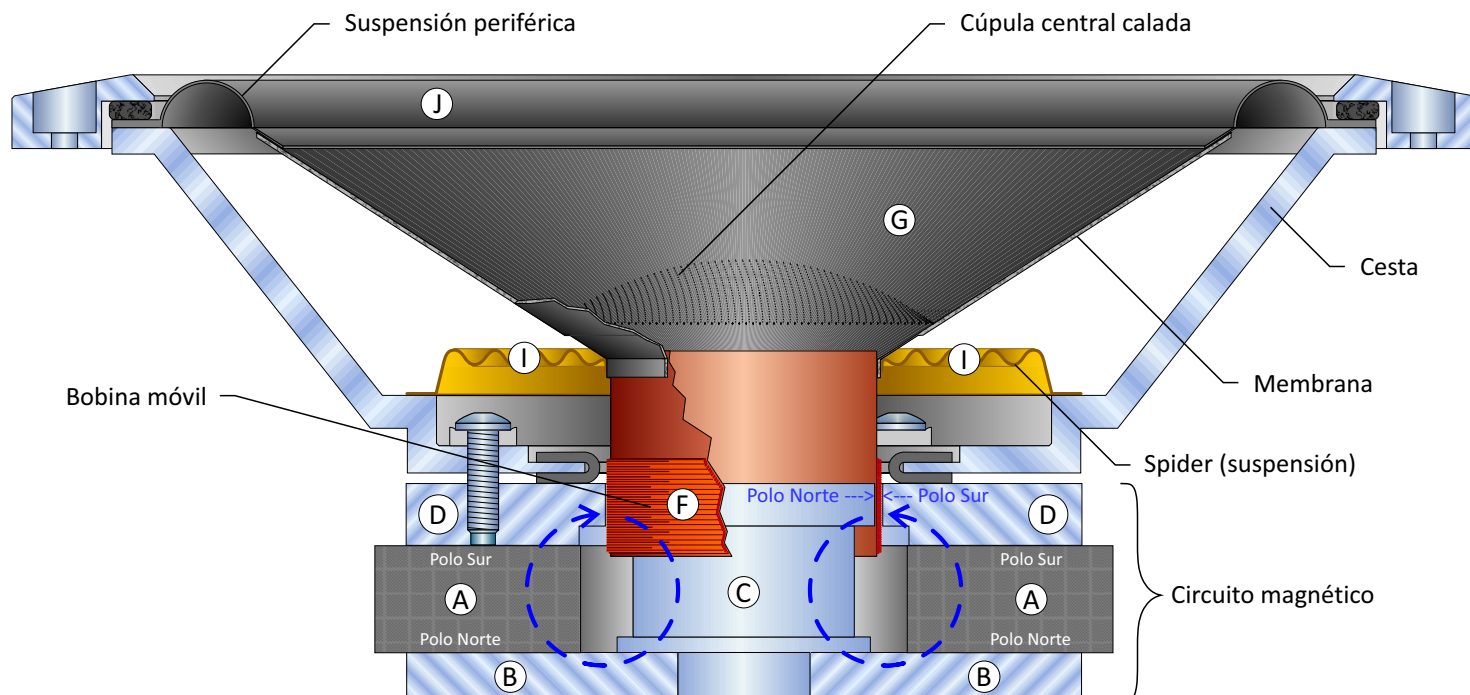
- Los altavoces, o transductores, que transforman la señal eléctrica del amplificador en movimiento mecánico y, por tanto, en sonido.
- Los filtros que dirigen la señal eléctrica a cada uno de los altavoces, en función del contenido en frecuencias de la señal.
- La carcasa o, mejor dicho, las carcasas del sistema de altavoces, que deben tratar las señales acústicas detrás de cada altavoz (ondas sonoras dentro del recinto creadas por las membranas). Esto se hace para que la onda de fondo no perturbe la señal acústica directa.

En el caso de una orquesta sinfónica, la mayor parte de la energía musical será reproducida por el altavoz de graves (alrededor del 80%), responsable de la profundidad de la imagen musical y de su cuerpo instrumental. La mayor fidelidad de reproducción se exige al transductor de medios, responsable de la inteligibilidad de la interpretación musical.

El espacio sonoro lo proporciona el altavoz de agudos, al que se exige la mayor velocidad de reacción para reproducir la Señal de potencia del amplificador las señales más allá de los 20 kHz.

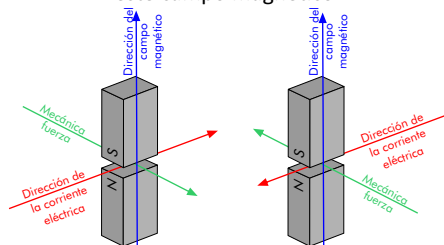


Los cuatro parámetros principales del altavoz



Factor de fuerza: $B \cdot l$

Corresponde al campo magnético en el entrehierro (ranura circular situada entre C y D) multiplicado por la longitud del arrollamiento de la bobina móvil inmersa en este campo magnético



**Tesla-metro
(Tm)**

Masa móvil: m

(comúnmente denominada Mms) corresponde a la suma de las masas de la bobina móvil (F)+ membrana (G) + parte de las suspensiones (I+J) es decir, las que están en movimiento



**gramo
(g)**

Conformidad: C

(comúnmente denominada Cms) corresponde a la suma de la elasticidad de las suspensiones periféricas (J) + el centrado interno (I)



**milimetro/Newton
(mm/N)**

Superficie: S

corresponde a la superficie emisiva total, es decir, la superficie de la membrana (G) + parte de la suspensión periférica (J)



$$S = \pi \cdot r^2$$

**metro²
(m²)**

y R_{dc} que es la resistencia DC de la bobina móvil (F)

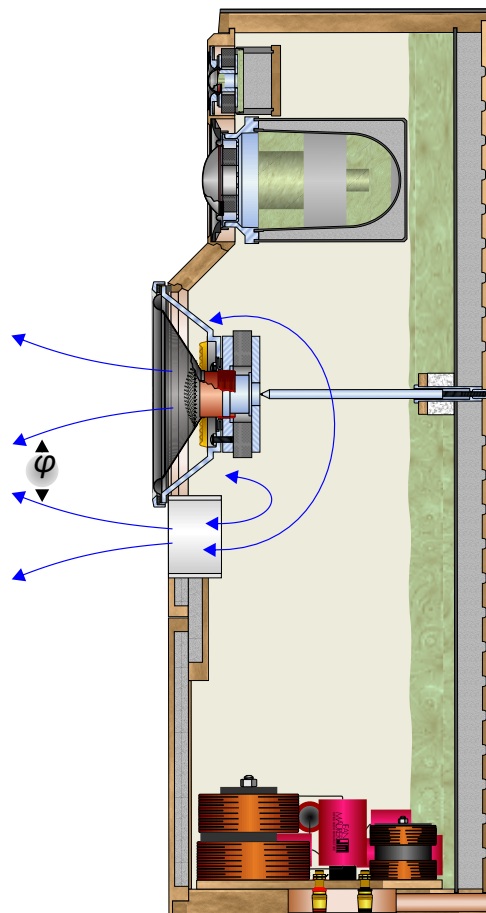
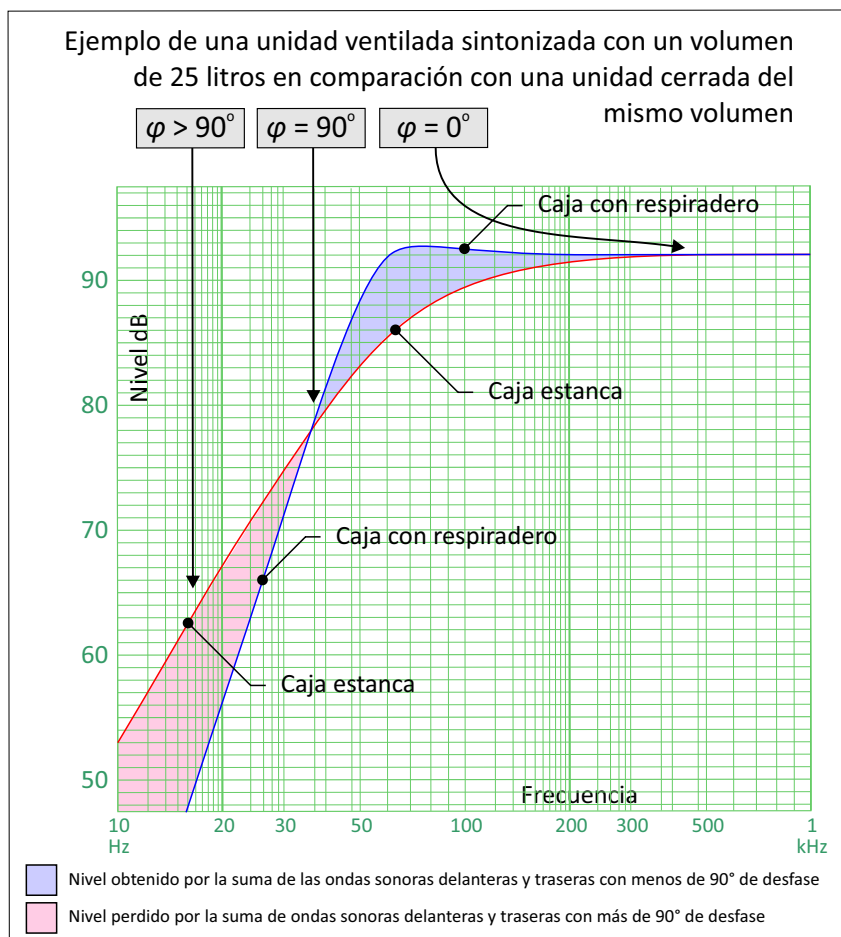
El rendimiento del altavoz es proporcional a:

$$\eta \approx \frac{S \cdot (B \cdot l)^2}{m^2 \cdot R_{dc}}$$

En esta ecuación no interviene la conformidad Cms.

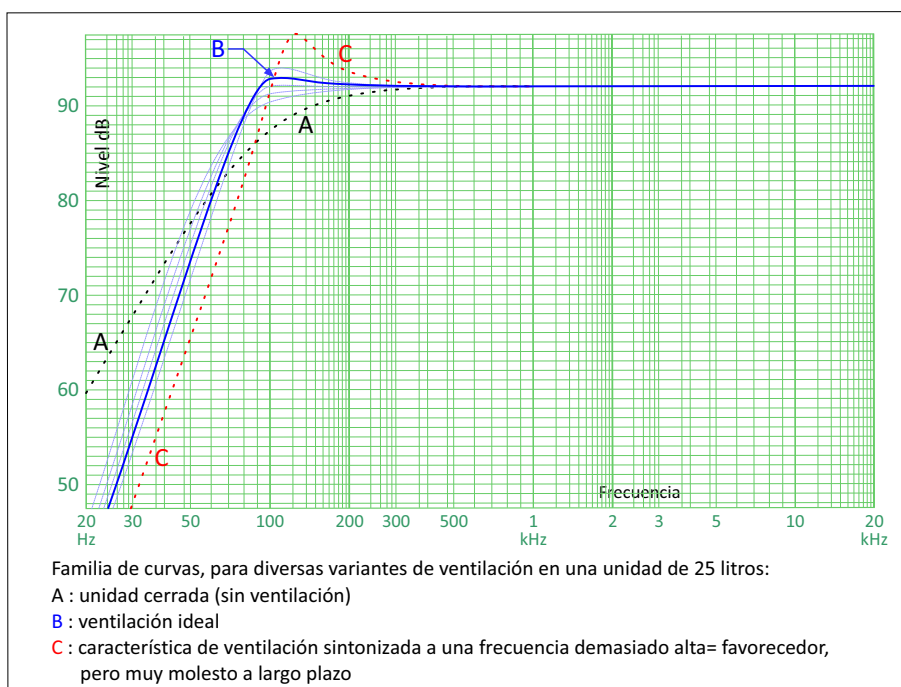
Sin embargo, a partir de esta fórmula podemos observar que la masa móvil tiene una influencia proporcional al cuadrado de su valor: Por ejemplo, en el caso del altavoz B245-5, con una masa móvil de 33 gramos, el rendimiento del altavoz se reducirá en un 6,15%, decir, en 0,52 dB, si se utiliza 1 gramo de más de pegamento durante el montaje de las piezas móviles.

Ajuste de la carcasa mediante respiraderos



Para las frecuencias extremadamente bajas, la rejilla de ventilación transmite mucha energía sonora del interior de la carcasa a su exterior. Esta energía, que disminuye al aumentar la frecuencia, llega a ser prácticamente nula por encima de 250 Hz.

En comparación con una unidad cerrada, un bass-reflex ventilado bien calculado permite, por tanto, recuperar una cierta cantidad de energía de la onda trasera del woofer para recuperarla en la habitación del oyente (con una relación de fase favorable) y atenuar las frecuencias extremadamente bajas apenas audibles y perjudiciales para el altavoz (resultantes de una relación de fase desfavorable). Este sistema permite, por tanto, linealizar la respuesta a bajas frecuencias.



Los criterios básicos de la reproducción de frecuencias graves

1 - **Eficacia** (dB/W a 1m)

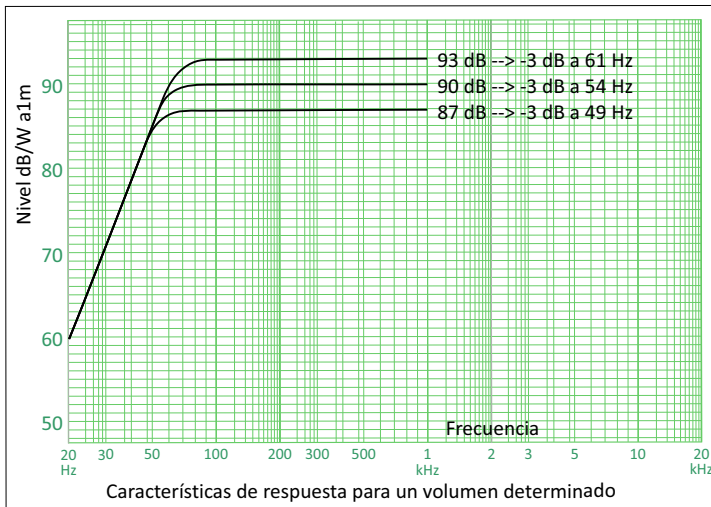
2 - **Volumen** (litros) y tipo de carga (volumen cerrado, sistema ventilado o carga pasiva)

3 - **Ancho de banda** para frecuencias extremadamente bajas

Estos tres criterios para las frecuencias graves no pueden contradecir las reglas fundamentales de la física, es decir:

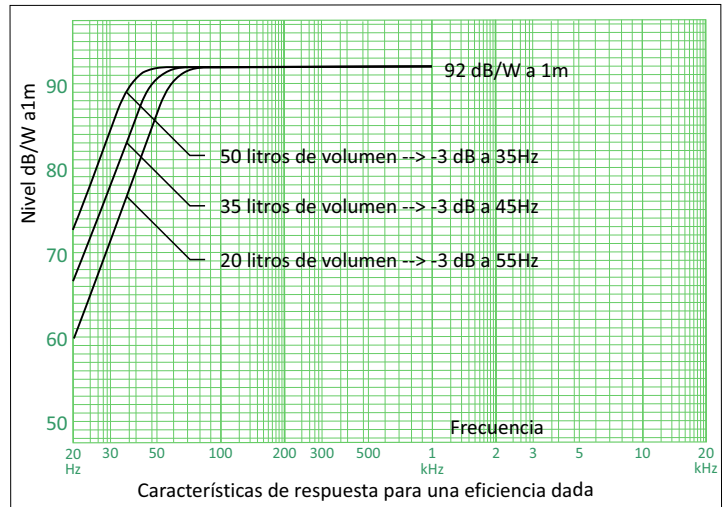
Para un volumen determinado:

La eficiencia y el ancho de banda se definen



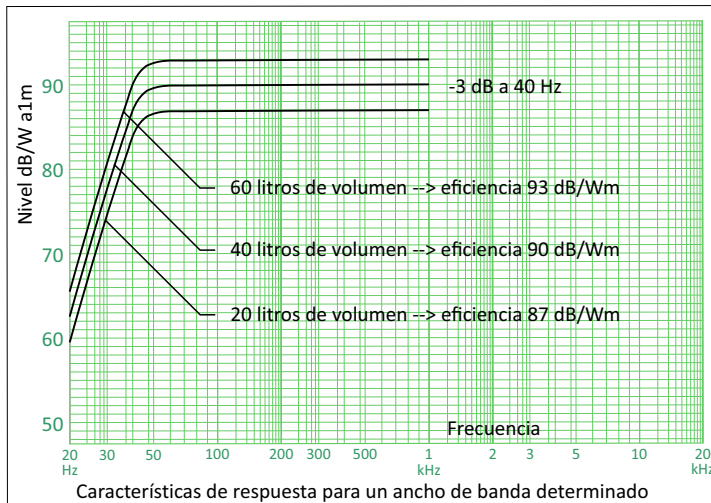
Para una eficacia determinada:

El volumen y el ancho de banda se definen



Para un ancho de banda determinado:

La eficacia y el volumen se definen



4 - **El nivel máximo admisible** en decibelios (dB)

5 - **Otros factores de rendimiento musical**

(distorsiones, ensanchamiento del tiempo de decaimiento, etc.)

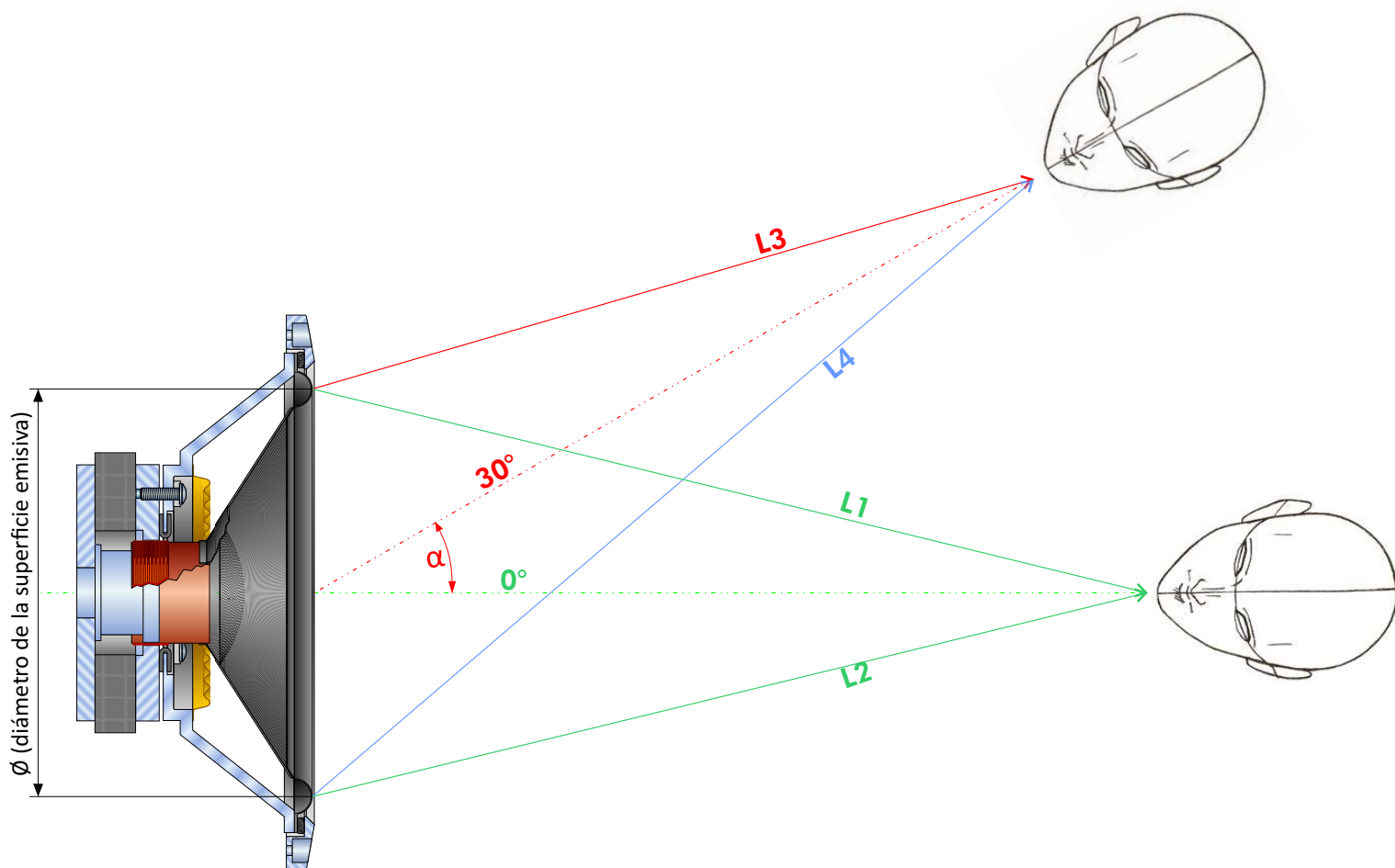
6 - **La fiabilidad** (en la limitación de la carga y en el envejecimiento)

El origen de la directividad de un altavoz

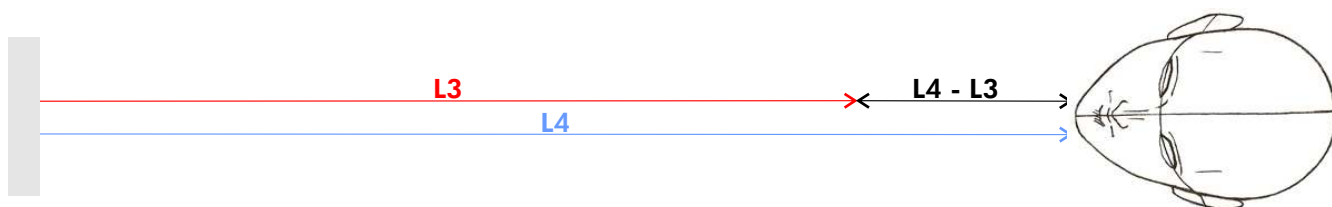
La directividad de un altavoz está vinculada a 3 parámetros:

- 1- el tamaño de su diafragma (más concretamente de su parte emisiva), es decir, su diámetro $\varnothing$ (en m)
- 2- la frecuencia F (en Hz)
- 3- el ángulo de posición del oyente con respecto al eje del altavoz: α (en grados)

En este fenómeno hay que tener en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el aire ($V_{air}=344\text{m/s}$).



La directividad se debe a la diferencia de longitud de propagación del sonido desde las distintas partes emisivas de la membrana hasta el oyente.



Direccionalidad en detalle

En el caso de un oyente situado en el eje del altavoz, las distancias **L1** y **L2** son equivalentes. Los sonidos emitidos por todas las partes de la membrana llegarán al oyente al mismo tiempo.

En el caso de un oyente situado, como en el dibujo presentado aquí, con una desviación angular $\alpha = 30^\circ$, las distancias **L3** y **L4** no son idénticas. La diferencia de longitud (**L4** - **L3**) se traduce en un retardo de la señal sonora que ha recorrido la distancia más larga (**L4**) con respecto a la procedente de **L3**.

Aquí, para un diafragma de $\varnothing 20$ cm y un ángulo de 30° :

$$L4 - L3 = \frac{\varnothing \cdot \cos 30^\circ}{2} + \frac{\varnothing \cdot \sin 60^\circ}{2} = 0,1 \text{ m}$$

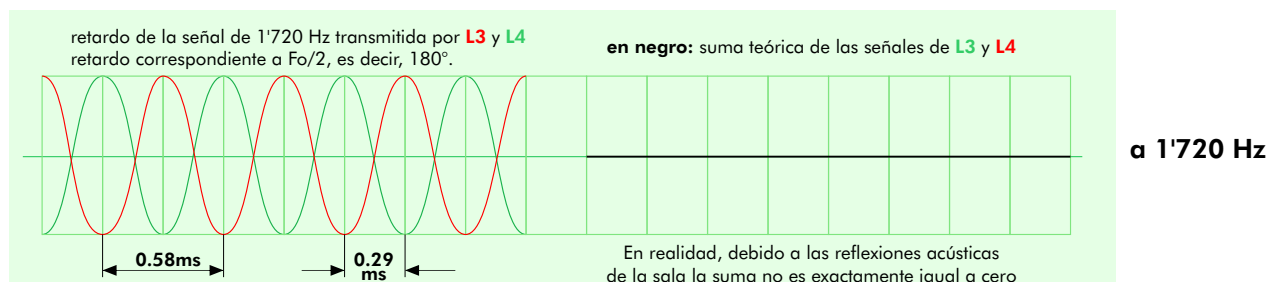
El retraso T resultante de una diferencia de longitud de 0,1 m es igual a :

$$T \text{ (s)} = \frac{L4 - L3 \text{ (m)}}{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}} \quad \text{o bien :} \quad T = \frac{0,1}{344} = 0,29 \text{ ms}$$

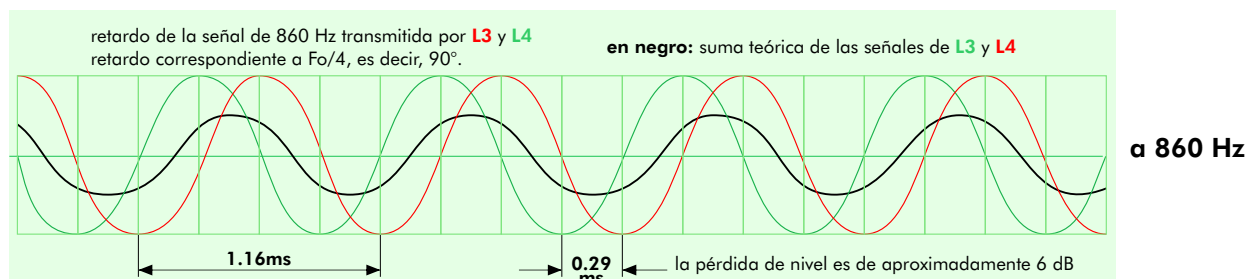
La frecuencia correspondiente a esta longitud de onda de 0,1m es igual a :

$$F_0 \text{ (Hz)} = \frac{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}}{L4 - L3 \text{ (m)}} \quad \text{o bien :} \quad F_0 = \frac{344}{0,1} = 3'440 \text{ Hz}$$

Para la reproducción de una frecuencia de 1'720 Hz (es decir $F_0/2$) las señales de **L3** se anularán por las de **L4** por oposición de fase de 180° .

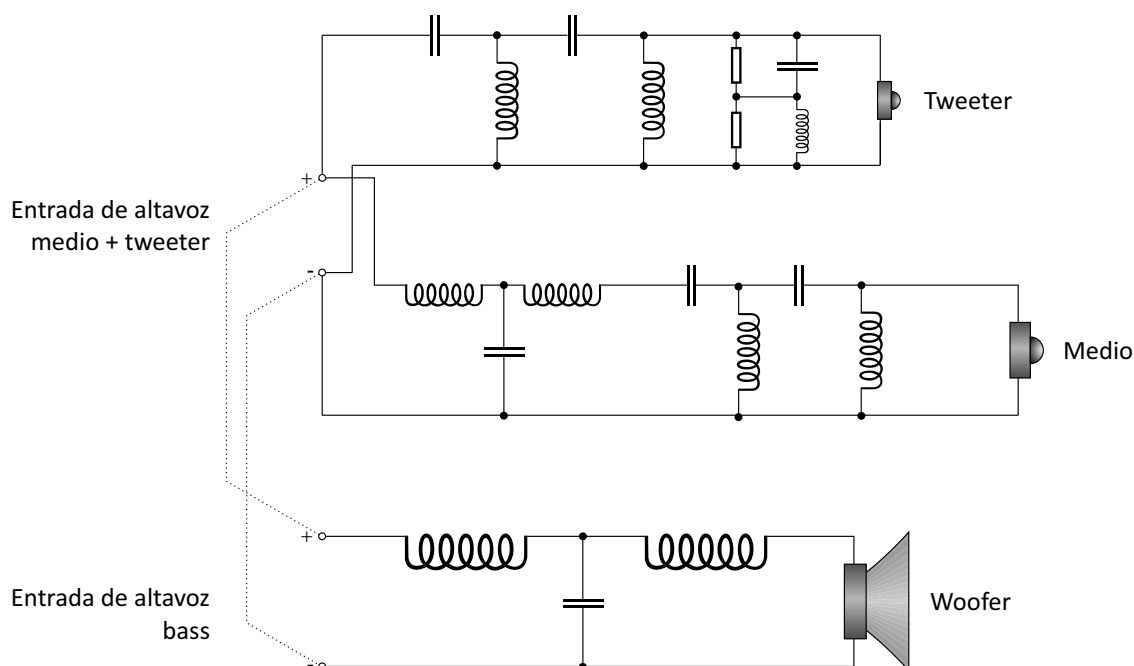


En realidad, a una frecuencia correspondiente a $F_0/4$ (es decir, 860Hz en nuestro ejemplo) la atenuación es significativa. En nuestro caso, con un diafragma de 20 cm y un ángulo de 30° , a partir de 860 Hz la directividad ya no es despreciable.



El diagrama de directividad de un altavoz no está relacionado con sus cualidades musicales, sino con el tamaño de su membrana: cuanto más grande es, más direccional es en la gama de frecuencias en cuestión.

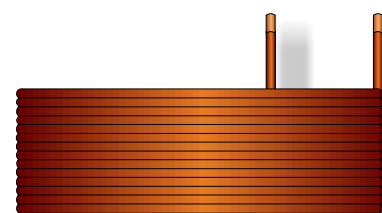
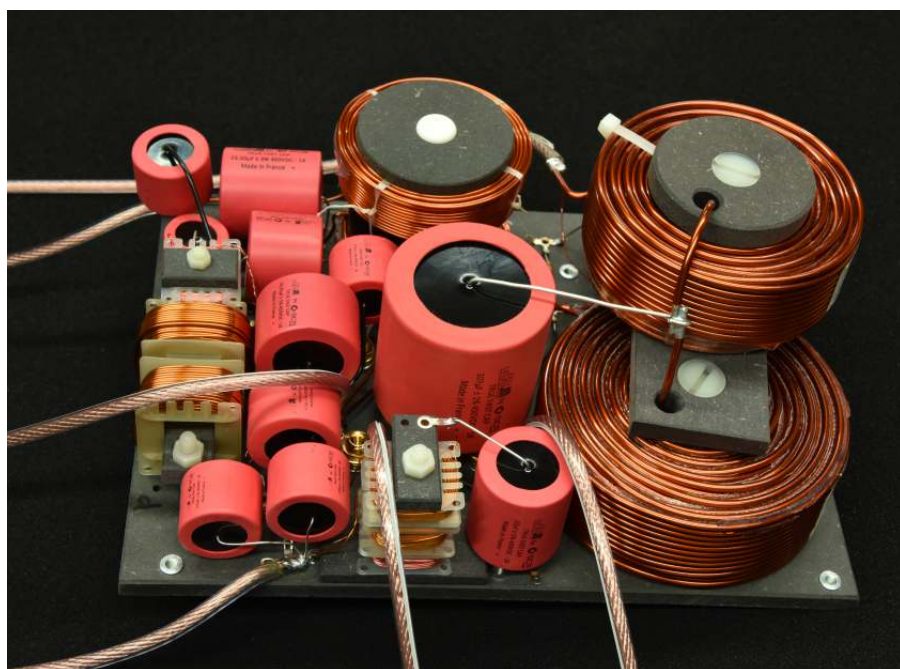
Filtros de distribución LC convencionales



Los filtros paso banda transmiten la señal procedente del amplificador a cada uno de los altavoces, en función de su contenido en frecuencias.

Los filtros pasivos de alto rendimiento, con sus pronunciados gradientes de atenuación, ofrecen ventajas decisivas en comparación con cualquier otro sistema. Formados por bobinas de autoinducción con una gran sección transversal de cobre y sin núcleo magnético, así como por condensadores de polipropileno, no son saturables y presentan una elevada linealidad, así como una vida útil excepcionalmente larga.

Componentes de los filtros pasivos y su construcción



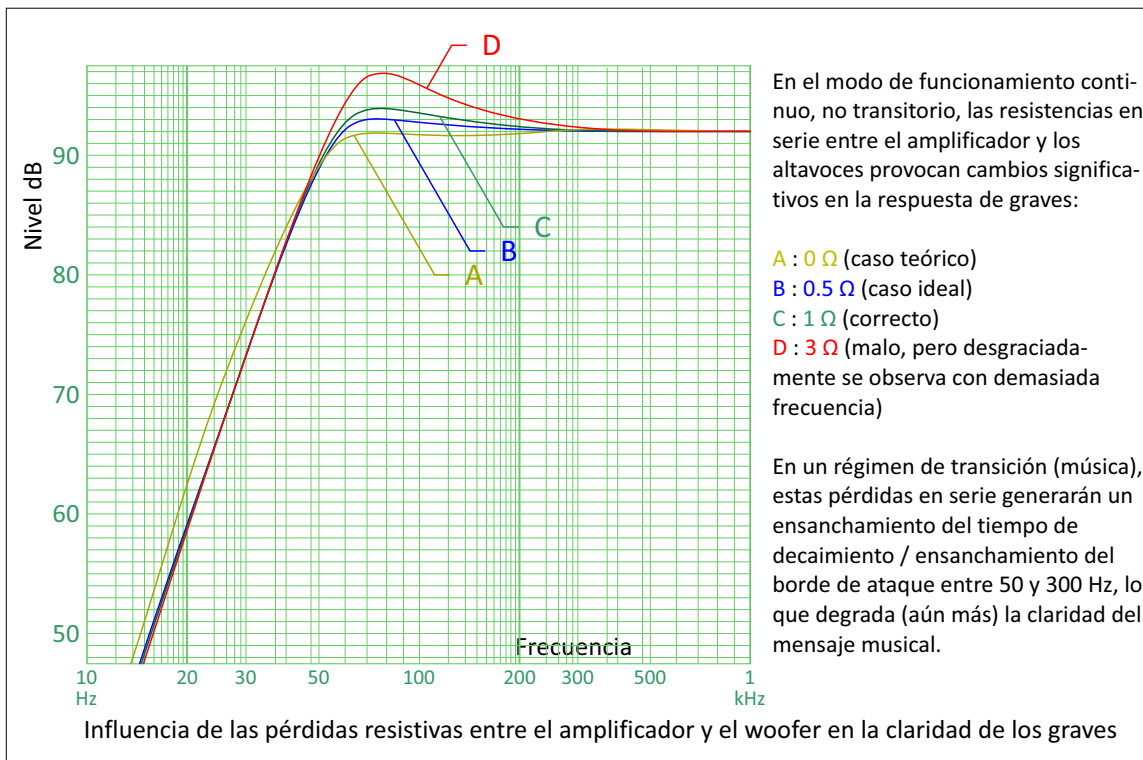
Bobinado de autoinducción sin núcleo y con una sección transversal muy grande:
1,68 mH - 0,11 Ω - 3 kg



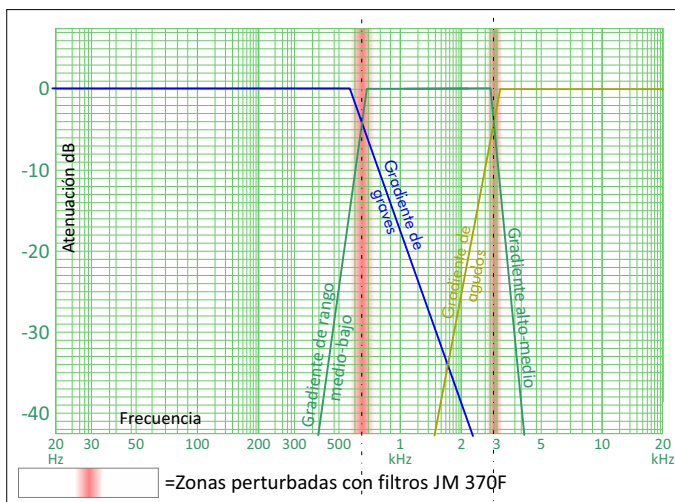
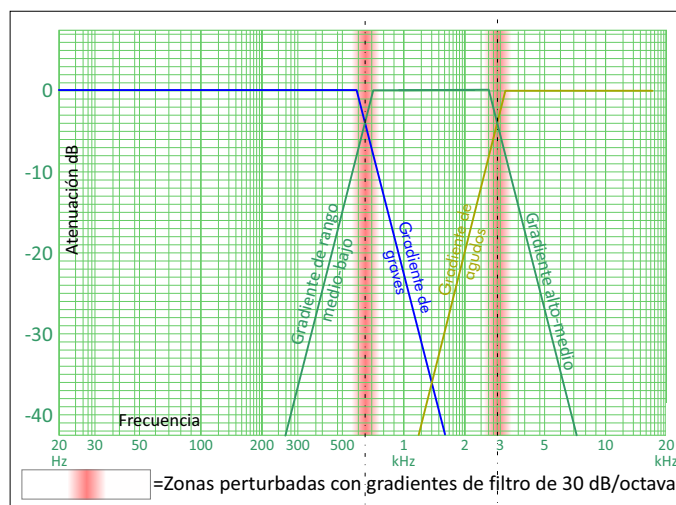
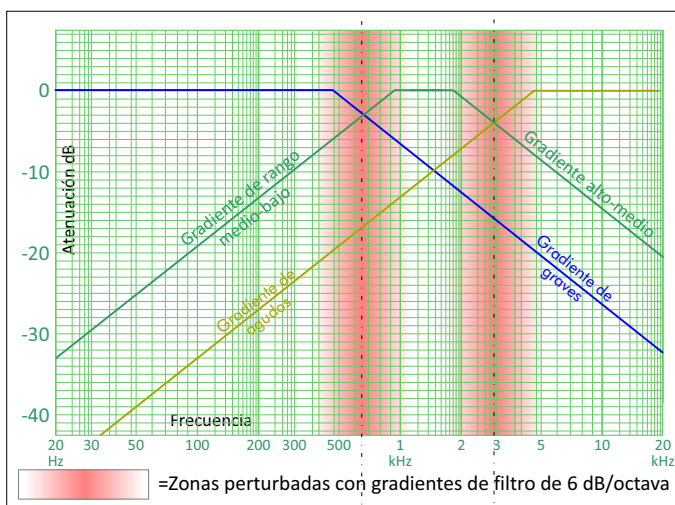
Condensador de polipropileno de gran estabilidad:
12,7 μ F - 3 % - $\text{tg} \delta < 0,06$ %

Filtros paso banda con gradientes de atenuación pronunciados y bajas pérdidas en serie, sin condensadores químicos ni núcleos magnéticos en el centro de los bobinados: 6,5 kg de componentes

Las pérdidas resistivas de los filtros paso banda y sus consecuencias



Los gradientes de atenuación de los filtros



Los gradientes de los filtros determinan zonas comunes de funcionamiento de los altavoces. Obviamente, estas zonas se ven alteradas por la influencia de varios altavoces físicamente distintos y situados en ubicaciones diferentes.

Cuanto más pronunciados sean los gradientes de los filtros, más pequeñas serán las áreas superpuestas. Por lo tanto, la reproducción del sonido emitido por una membrana de altavoz determinada será más correcta.

La impedancia del altavoz y el recinto acústico: una carga muy compleja y un gran reto para el amplificador

Al igual que un elemento calefactor, una resistencia es una carga simple. La corriente que circula por ella depende de la tensión que se le aplique; esta corriente se consumirá por completo y se transformará en calor. Esto es válido independientemente de la forma de tensión aplicada.

Un motor eléctrico de corriente alterna, o un altavoz, transforma la energía eléctrica en movimiento con un cierto rendimiento, que depende de las pérdidas del sistema. La parte de la energía que se pierde se transforma en calor. La parte de la energía transformada en movimiento presenta una carga no resistiva pero reactiva para la fuente de tensión. Esto implica, por razones difíciles de explicar, que este motor, o altavoz, va a pedir más corriente de la que realmente va a consumir, y devolverá el exceso de energía a la fuente de tensión. Esta energía

devuelta se denomina contrafuerza electromotriz (emcf).

Dependiendo del altavoz, la demanda de corriente puede superar hasta 7 veces la energía necesaria para mover su membrana. El exceso de energía tiene que volver al amplificador a través del filtro divisor de frecuencias y los cables del altavoz. Esta proporción de exceso de corriente devuelta depende del contenido de la señal musical eléctrica (variaciones de frecuencia y amplitud en cada momento). Podemos hablar de un "coseno dinámico phi" ($\cos\phi$).

A la hora de dimensionar el amplificador, la carga del altavoz presenta dos retos:

- Proporcionar suficiente capacidad de suministro de corriente: En amperios (A) y no en vatios (W). Esta capacidad permitirá al amplificador evitar la saturación de los picos dinámicos de cada gran demanda de corriente procedente del recinto acústico. El clipping no sólo es muy desagradable para el oyente, sino peligroso para la salud de los propios altavoces.

- Tener una buena capacidad de absorción de la energía que retorna de los altavoces (emcf). Si no es, un rebote de corriente en dirección a los altavoces perturbará la acústica espacial al tener un efecto eco muy perjudicial. Estos "bajones" dinámicos se verán ahogados por este retorno de energía y los detalles musicales se llenarán de resonancias muy desagradables, e incluso resultarán cansinos. La dinámica proporcionada por el sistema amplificador/altavoz se volverá pobre.

Algunos amplificadores de transistores son capaces de suministrar mucha corriente. Su capacidad, por ejemplo, de aceptar una carga resistiva de 2 ohmios o incluso menos es una característica agradable en este. Los amplificadores de transistores que no pueden funcionar con cargas inferiores a 4 ohmios deben eliminarse, ya que sus diseñadores no han comprendido lo que representa realmente una carga de altavoz.

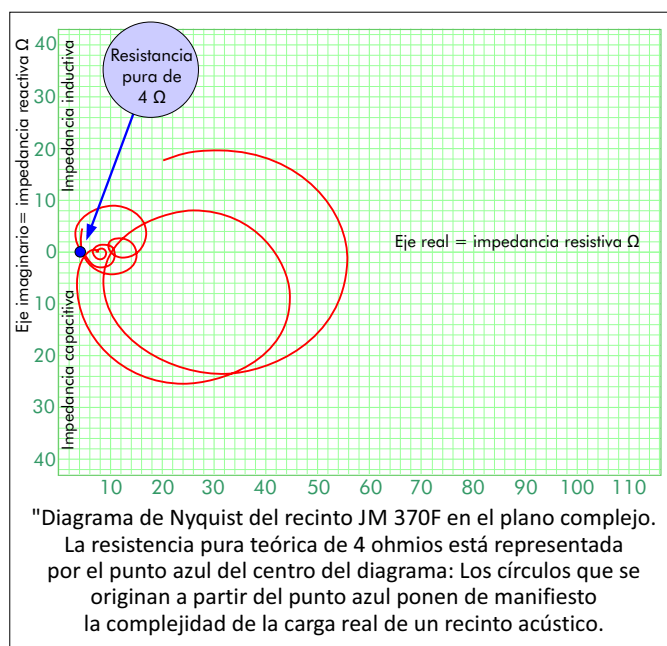
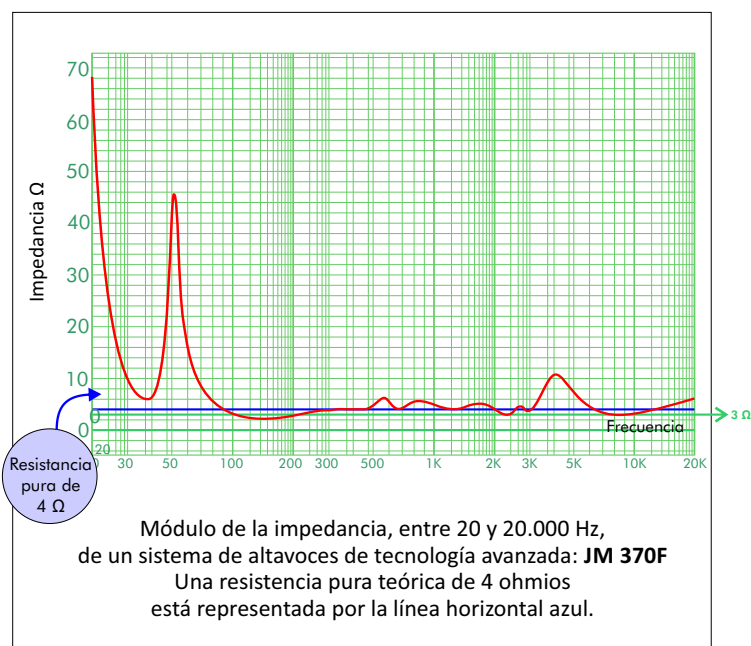
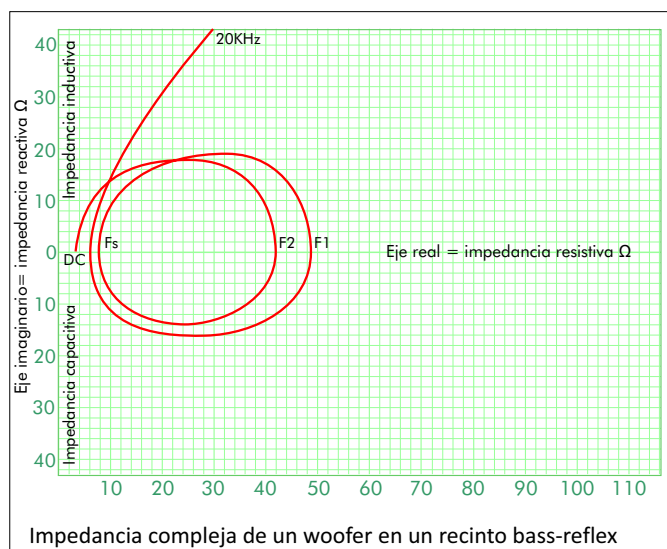
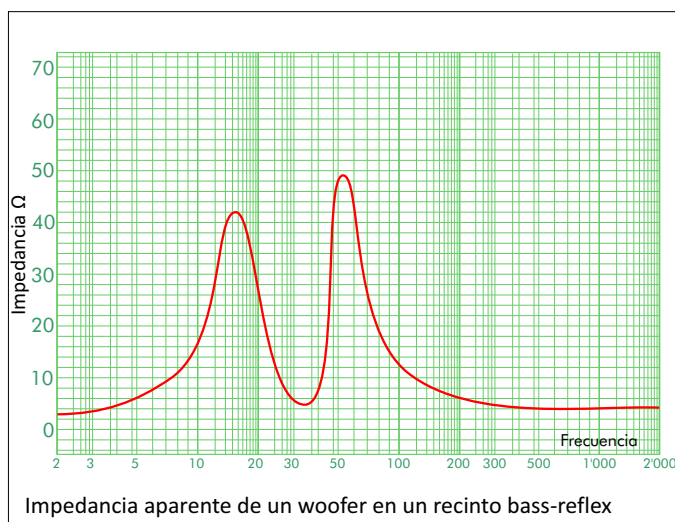
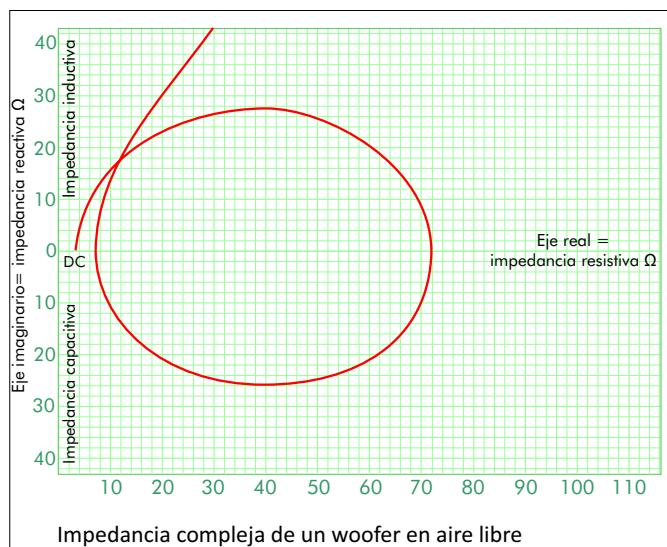
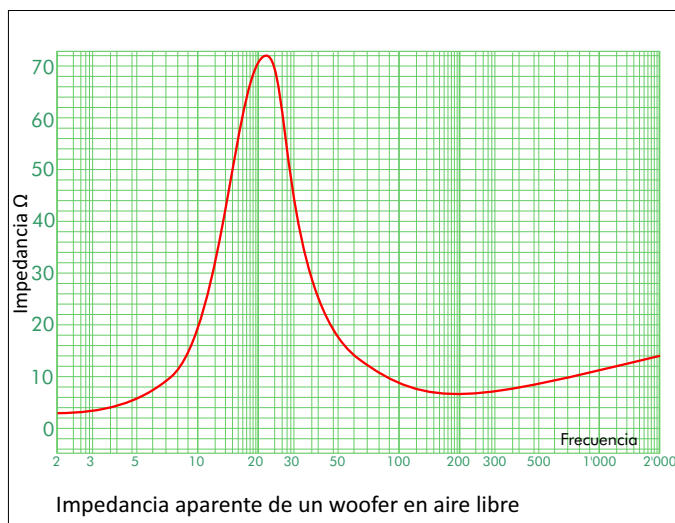
Por el contrario, la absorción de la fuerza electromotriz contraria (emcf) causa muchos problemas en las salidas de los amplificadores de transistores directos, es decir, los que no tienen transformadores de salida. La reabsorción de energía está mal controlada, con todas las sus consecuencias.

La tecnología de los amplificadores a válvulas requiere un transformador de salida para adaptar la impedancia de trabajo de las válvulas a la de los altavoces: El transformador es un componente grande, pesado, caro y tan difícil de desarrollar como de fabricar si se quiere obtener un rendimiento excelente. Sin embargo, si se dimensiona correctamente, es un verdadero regalo para el altavoz, que podrá no sólo recibir toda la corriente necesaria sino también devolver - con una muy buena eficacia - esta emcf, que será cortocircuitada por el bobinado secundario

del transformador. Al mismo tiempo, la baja resistencia en serie de los filtros y cables del altavoz facilita el retorno de la energía al amplificador.

Algunos amplificadores de transistores están equipados con transformadores de salida y su calidad puede acercarse a la de los buenos amplificadores de válvulas.

La impedancia de los altavoces y recintos acústicos



Las energías reactivas del altavoz, asesinas de la dinámica

La dinámica musical se define por la diferencia de amplitud entre un pico y una depresión de una curva de modulación. Para ser exactos, esto representa la dinámica, expresada en decibelios (dB).

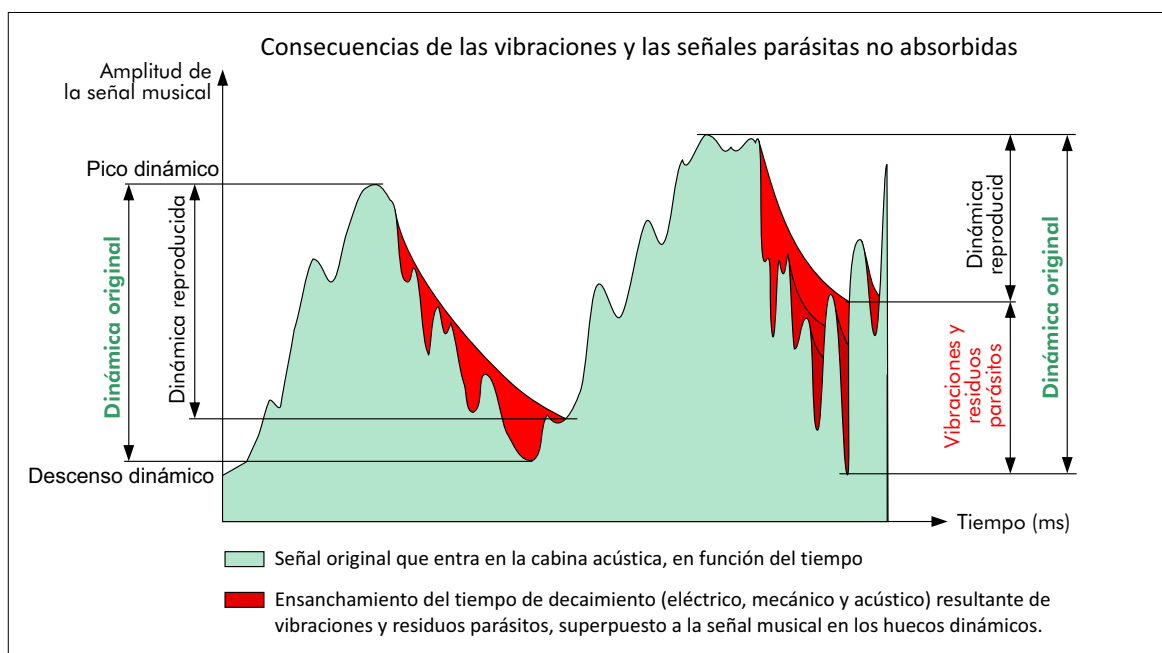
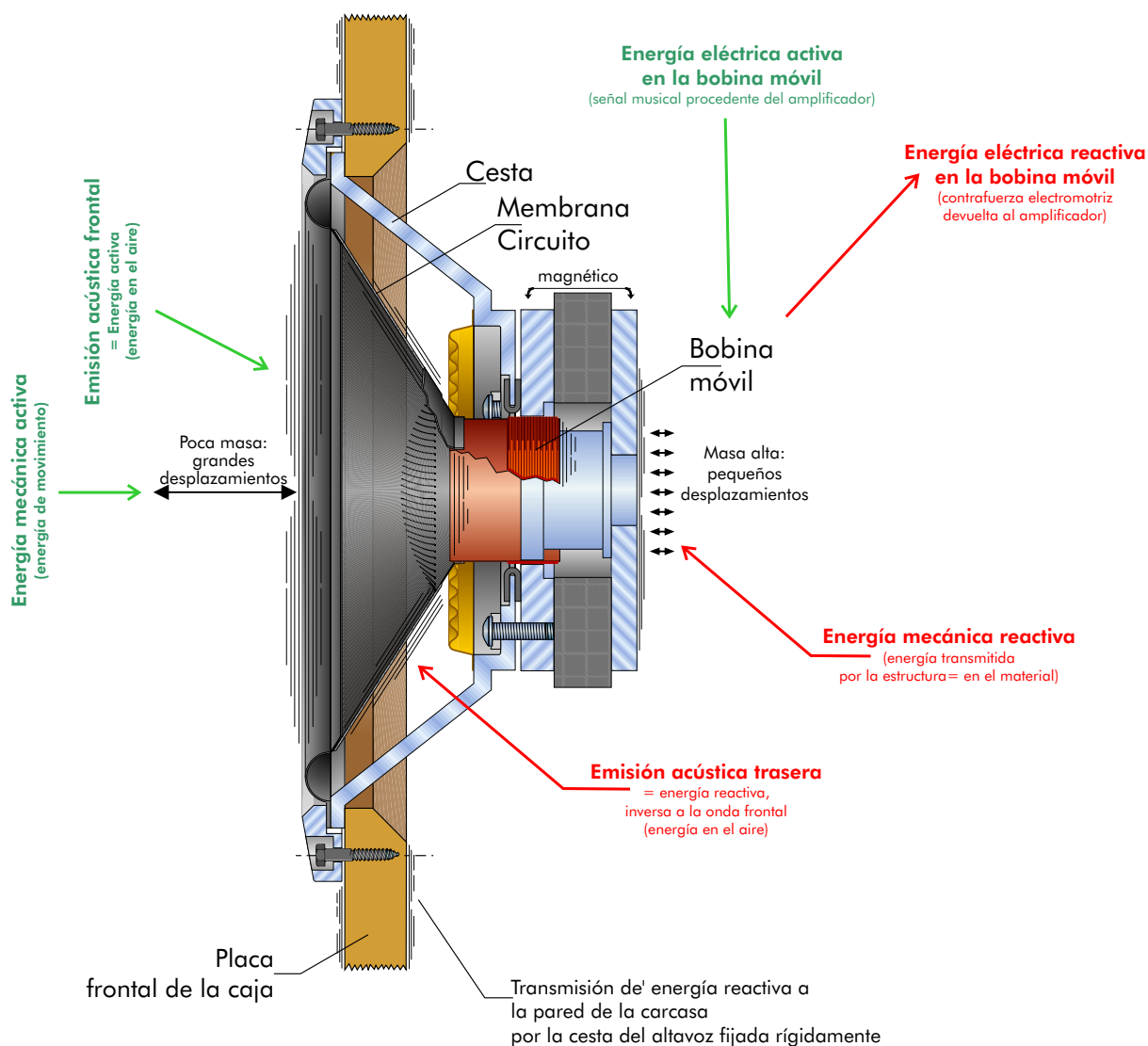
Es bastante fácil reproducir un pico dinámico; sin embargo, es mucho más difícil reproducir la caída dinámica que le sigue, porque una cantidad de residuos vibratorios (de naturaleza mecánica y eléctrica) tenderá a ahogar una señal musical de baja amplitud. Por ejemplo, una grabación de una orquesta sinfónica tiene fácilmente 60 dB de dinámica, es decir, una relación de potencia de 1 a 1.000.000. Esta diferencia de potencia debe reproducirse en una fracción de segundo.

Estos residuos parásitos (vibraciones en la caja acústica, ecos eléctricos, membranas mal amortiguadas, etc.) resultan evidentes cuando a un fortissimo le sigue un momento de muy baja intensidad, a veces incluso cercano al silencio (o, simplemente, una caída dinámica) y esta caída debe reproducirse realmente en ese instante. A estas señales que se prolongan de forma indelicada se las denomina "efectos de ensanchamiento del tiempo de decaimiento". El quid del problema reside en lo que se denomina "el respeto del silencio".

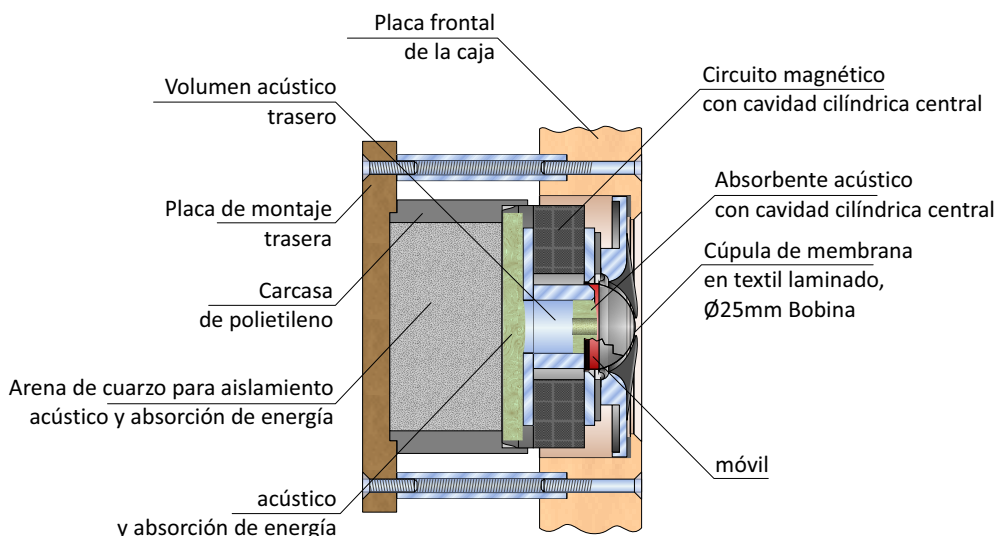
En un altavoz, hay 3 causas principales de ensanchamiento del tiempo de decaimiento:

1. La contrafuerza electromotriz (emcf) de cada uno de los altavoces es una corriente parásita inversa a la señal eléctrica musical procedente del amplificador. Tiene que ser reabsorbida por el amplificador lo mejor posible. Si esta absorción va mal, se producirá un efecto de eco como el se puede obtener en la montaña frente a una pared de roca: La señal sonora original se vuelve ininteligible por esta reverberación. Ahora bien, los transistores del amplificador pueden absorber mal esta energía de retorno, que luego se refleja hacia los altavoces y estropea la dinámica. Si un amplificador de válvulas está equipado con buenos transformadores de salida, los devanados secundarios de los transformadores cortocircuitan estas corrientes parásitas, y lo hacen con gran eficacia.
2. La energía mecánica reactiva provocada por el movimiento de los componentes del altavoz (bobinado y membrana) y por la masa de aire que los rodea da lugar a una forma de residuo parásito. Se trata de vibraciones mecánicas generadas por el propio altavoz. Para evitarlo, estas vibraciones se transmiten al recinto del altavoz a través del marco de la cesta del altavoz y excitan las distintas superficies con retardo y con una deformación considerable. En los recintos acústicos de Jean Maurer, estos diversos residuos son absorbidos por la arena de cuarzo, gracias en particular al pasador roscado pretensado que conecta dinámicamente el accionamiento del woofer con el doble fondo relleno de arena del recinto, que tiene una frecuencia de resonancia muy baja. Además, la cesta del altavoz está desacoplada dinámicamente de la parte frontal de la carcasa del altavoz. En el caso de los altavoces de medios y agudos, la arena insertada en sus recintos dobles garantiza este efecto.
3. Los movimientos de la membrana del altavoz producen una emisión sonora hacia delante y una emisión inversa en su parte posterior. Esta onda acústica posterior, la única forma de señal no deseada de la que todo el mundo habla, es absorbida por la lana mineral. Parte de esta señal es captada por la rejilla bass-reflex para linealizar la respuesta a bajas frecuencias. Con respecto a las dos formas anteriores de energía reactiva, ésta es la característica que presenta menos problemas de control en lo que se refiere al silencio. Si el recinto del altavoz es muy inerte, es decir, tiene poca resonancia, la acústica espacial devuelta será buena. La arena de cuarzo atrapada en el doble fondo de la caja y, en el caso del modelo JM 370F, en los laterales y las 2 partes frontales, contribuye en gran medida a este resultado.

Energías activa y reactiva del altavoz



Los transductores de medios y agudos: dos recintos integrados en el recinto del woofer

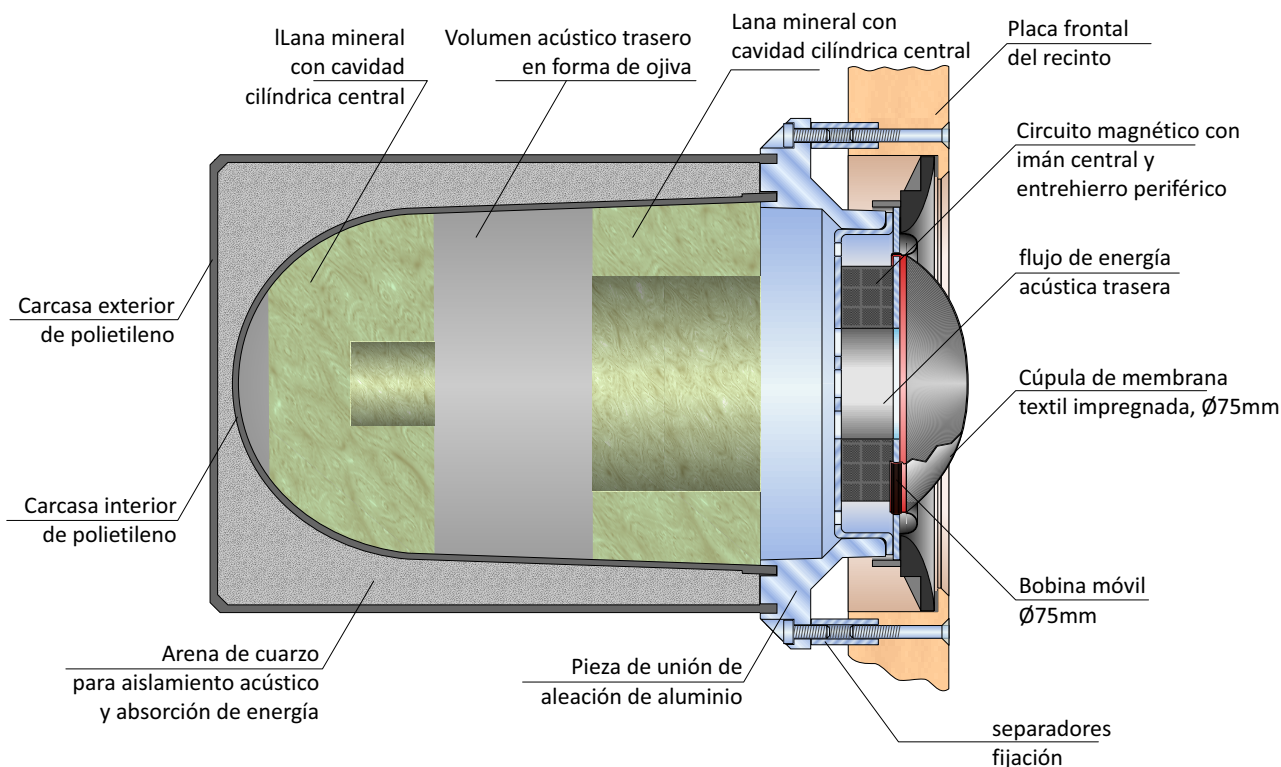


Caja de agudos, con transductor TD25-4

Cada altavoz, o transductor, produce una acústica frontal y otra posterior.

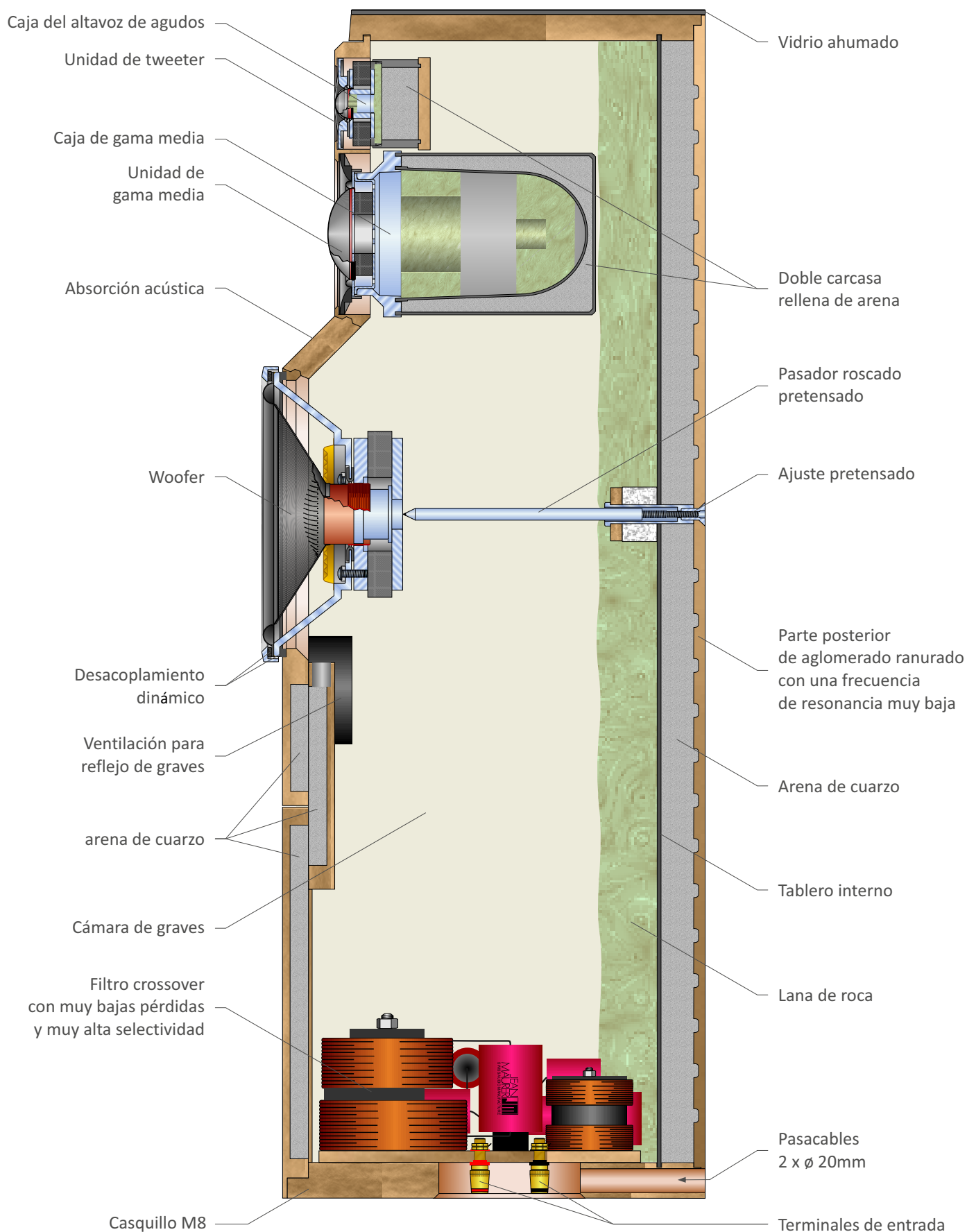
La energía de graves de un altavoz no debe mezclarse en ningún caso con la de otro, ya que el riesgo de perturbar gravemente el comportamiento de la membrana del vecino y provocar así una contaminación acústica es inaceptable. El riesgo de destrucción mecánica de las partes móviles de los transductores de medios o agudos por la energía de los graves también es considerable.

Las energías reactivas de estas dos unidades (medios y agudos) también deben tratarse con seriedad. En estos dos casos, la masa de la arena de cuarzo los estabilizará, al igual que la arena de la parte posterior del altavoz para los graves.

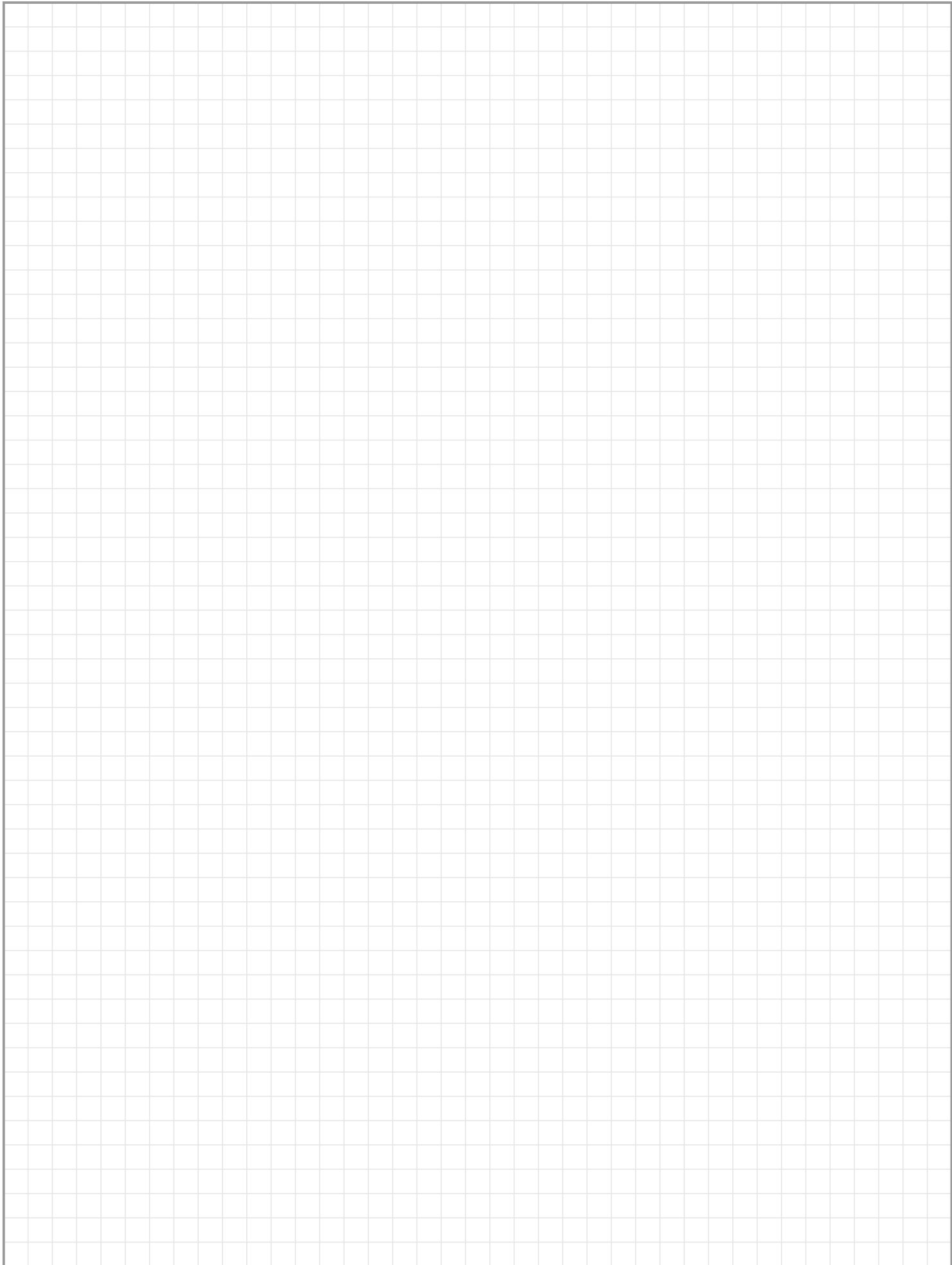


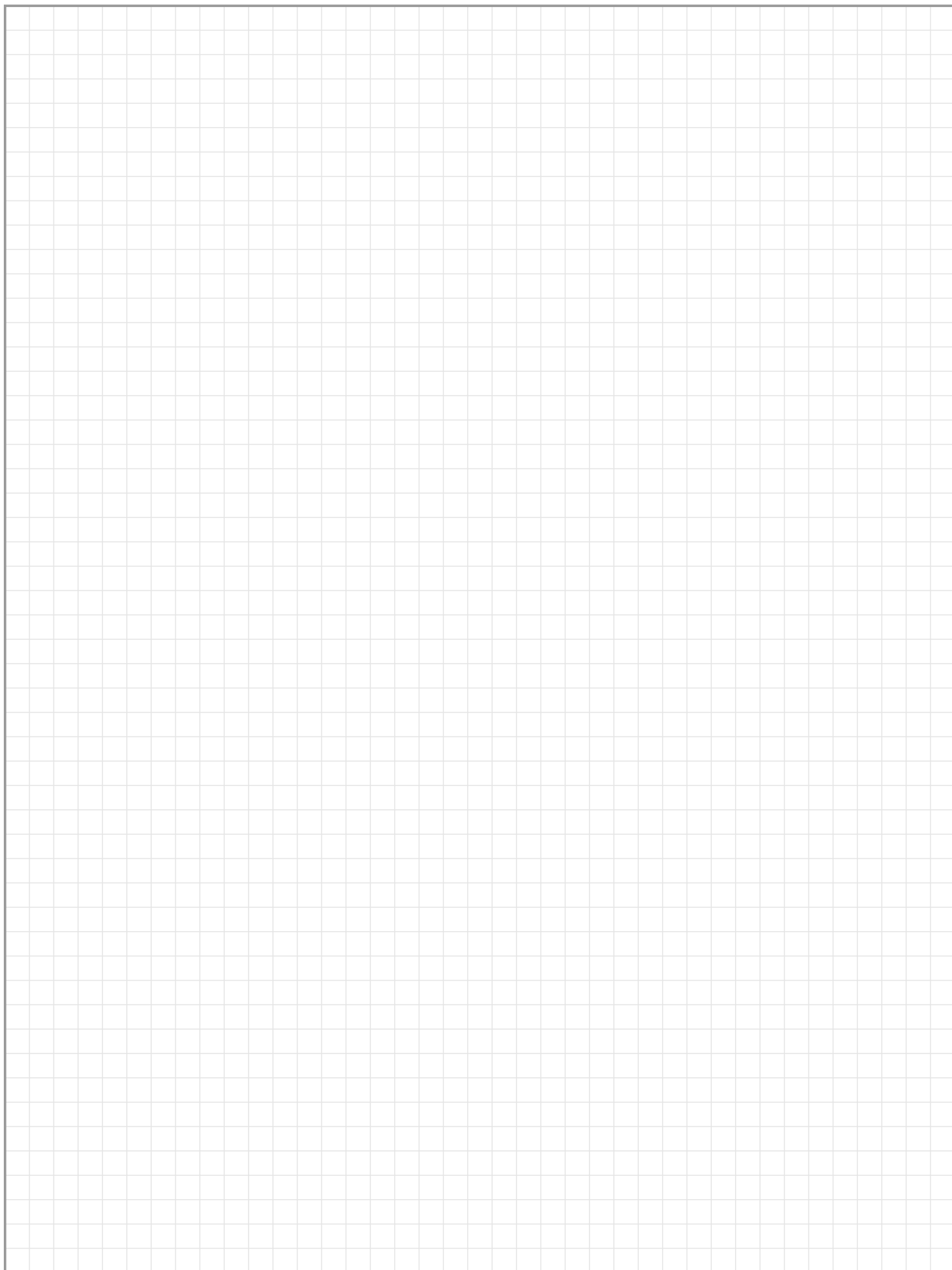
Recinto de rango medio, con transductor MD75-3

Construcción del recinto acústico con absorción de energía



Vista en corte de la caja acústica JM 370F





Fabricante suizo
de altavoces acústicos y
amplificadores de válvulas de excepción

www.jeanmaurer.ch

Jean Maurer Swiss Audio Manufacture SA
Rue du Chêne 17
CH-1170 Aubonne

+41 21 808 50 60 | info@jeanmaurer.ch | www.jeanmaurer.ch