INDICE

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE ACÚSTICA ..... Pag. 4

1.1. Características del sonido ..... Pag. 4

2. EL ALTAVOZ ELECTRO-DINÁMICO ..... Pag. 18

2.1. Definición general como transductor ..... Pag. 18
2.2. Caracterización de las partes del altavoz ..... Pág. 19

2.2.1. El conjunto móvil ..... Pag. 19
2.2.2. El conjunto magnético. El factor de fuerza: Bl ..... Pag. 24

2.3. Características generales ..... Pag. 27

2.3.1. Impedancia ..... Pag. 27
2.3.2. Potencia admisible ..... Pag. 32
2.3.3. Respuesta en frecuencia ..... Pag. 41
2.3.4. Diferencia entre sensibilidad y rendimiento ..... Pag. 44
2.3.5. Distorsión ..... Pag. 46
2.3.6. Respuesta temporal ..... Pag. 47
2.3.7. Respuesta de fase ..... Pag. 49

2.4. Parámetros de Thiele-Small ..... Pag. 52

3. EL TWEETER ..... Pag. 55

3.1. Partes de un tweeter ..... Pag. 55
3.2. Tweeters de cinta ..... Pag. 56
3.3. Parámetros acústicos de los tweeters ..... Pag. 58

3.3.1. Rango de frecuencias ..... Pag. 58
3.3.2. La dispersión ..... Pag. 58

3.4. Potencia. Límites y mejoras ..... Pag. 59

3.4.1. Límites mecánicos. La importancia del filtrado ..... Pag. 59
3.4.2. Límites térmicos. El uso de ferrofluido ..... Pag. 60

4. SISTEMAS DE RADIACIÓN INDIRECTA ..... Pag. 60

4.1. Motores de compresión ..... Pag. 62

4.1.1. El conjunto móvil ..... Pag. 62
4.1.2. El conjunto magnético ..... Pag. 65
4.1.3. La cámara de compresión ..... Pag. 65
4.1.4. El corrector de fase ..... Pag. 69

4.2. La bocina ..... Pag. 69

4.2.1. Ángulo de cobertura, Q y DI ..... Pag. 70

ANEXO:
Medición del ángulo de cobertura C_L ..... Pag. 77
Medición del factor de directividad o Q ..... Pag. 79

5. ALTAVOCES COAXIALES ..... Pag. 82

5.1. Ventajas del altavoz coaxial ..... Pag. 83
5.2. Tipos de altavoces coaxiales ..... Pag. 83

6. CAJAS ACÚSTICAS ..... Pag. 87

6.1. Necesidad de las cajas ..... Pag. 87
6.2. La caja cerrada ..... Pag. 89

6.2.1. Efecto de la caja sobre los parámetros del altavoz ..... Pag. 89
6.2.2. Respuesta frecuencial y temporal ..... Pag. 90
6.2.3. Rendimiento del sistema caja cerrada ..... Pag. 91
6.2.4. Influencia de la caja cerrada sobre el desplazamiento del cono ..... Pag. 92
6.2.5. Limitación de potencia del sistema debido al desplazamiento del cono ..... Pag. 94
6.2.6. Efecto del relleno de la caja ..... Pag. 95
6.2.7. Resumen de la caja cerrada – ejemplo práctico ..... Pag. 96

6.3. Sistema Bass-reflex ..... Pag. 99

6.3.1. Respuesta frecuencial y temporal ..... Pag. 100

6.3.1.1. Pérdidas del recinto acústico ..... Pag. 101
6.3.1.2. Efectos del desajuste de la respuesta ..... Pag. 102

6.3.2. Requerimientos del tubo ..... Pag. 103

6.3.2.1. Cajas con carga resistiva en el tubo ..... Pag. 104

6.3.3. Rendimiento del sistema Bass-reflex ..... Pag. 104
6.3.4. Influencia de la caja Bass-reflex sobre el desplazamiento del cono ..... Pag. 106
6.3.5. Limitación de potencia del sistema debido al desplazamiento del cono ..... Pag. 107
6.3.6. Resumen de la caja bass-reflex – ejemplo práctico ..... Pag. 108

7. FILTROS Y SEÑALES: ¿QUÉ ES UN FILTRO? ..... Pag. 112

7.1. Tipos de filtros y características principales ..... Pag. 113
7.2. Parámetros de interés de los filtros ..... Pag. 116
7.3. Filtros pasivos y activos ..... Pag. 117

7.3.1. Filtros pasivos ..... Pag. 117
7.3.2. Filtros activos ..... Pag. 121

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE ACÚSTICA

En esta primera sección, vamos a estudiar los conceptos básicos que nos permiten caracterizar las ondas sonoras. Principalmente, toda la explicación está orientada a tener muy claras dos características del sonido: su amplitud y su frecuencia. Veremos cuál es la mejor forma de representar las ondas sonoras, además de la importantísima y estrecha relación existente entre tiempo y frecuencia.

1.1. Características del sonido

Si tenemos una onda sonora propagándose por el aire (fig 1.1), sabemos que:

$$Velocidad = \frac{espacio}{Tiempo}$$

El tiempo es el período ***T***, el tiempo que tarda en completarse un ciclo de la onda. La velocidad es la del aire, ***c.***Y el espacio recorrido es el que avanza la onda en una oscilación completa, que es la longitud de onda λ. Vamos a definir estos conceptos formalmente:

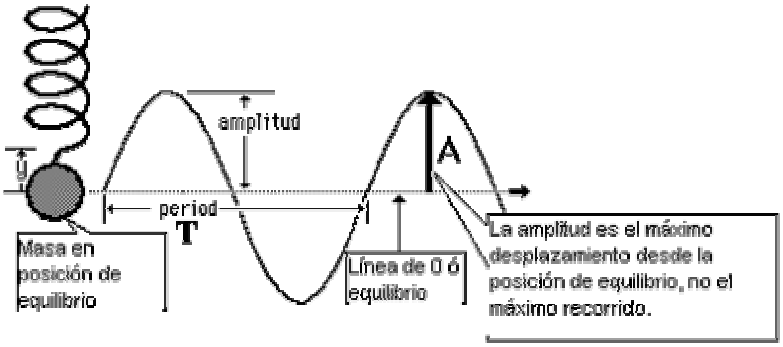


Figura 1.1.a. *Parámetros de una onda*

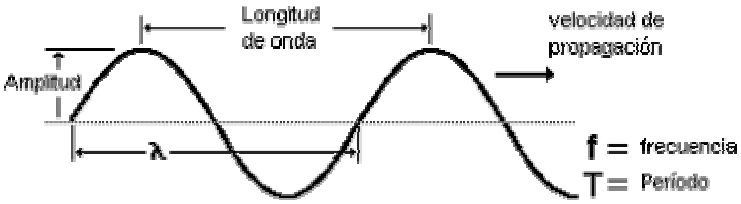


Figura 1.1.b. *Parámetros de una onda*

Velocidad del sonido: *Es la velocidad a la que se propaga una onda sonora en un medio*. El medio que nos interesa es el aire. En el aire, la velocidad del sonido varía según la temperatura y la humedad. Como referencia, a 20 ºC, la velocidad del aire es de 345 m/s (≈1242 km/h) y se suele simbolizar con la letra ***c.***

Longitud de onda*:* *Distancia que recorre el sonido para completar un ciclo de la onda sonora*. El símbolo de la longitud de onda es la letra griega lambda (***λ***) y se mide en metros (m).

$$\lambda = c \cdot T$$

Frecuencia: *Número de oscilaciones o ciclos completos de una onda sonora periódica que se producen por segundo.* Se mide en hertzs (***Hz***), que son equivalentes a s^{-1}.

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

Por tanto, podemos reescribir la fórmula de la velocidad como:

$$c = \lambda \cdot f$$

Esta fórmula, vista de una manera gráfica, sería como la de la figura 1.2.a y en escala logarítmica como en la figura 1.2.b. En ella, observamos que las longitudes de onda para distintas frecuencias varía desde los 17 m para 20 Hz hasta 17 mm para 20 kHz.

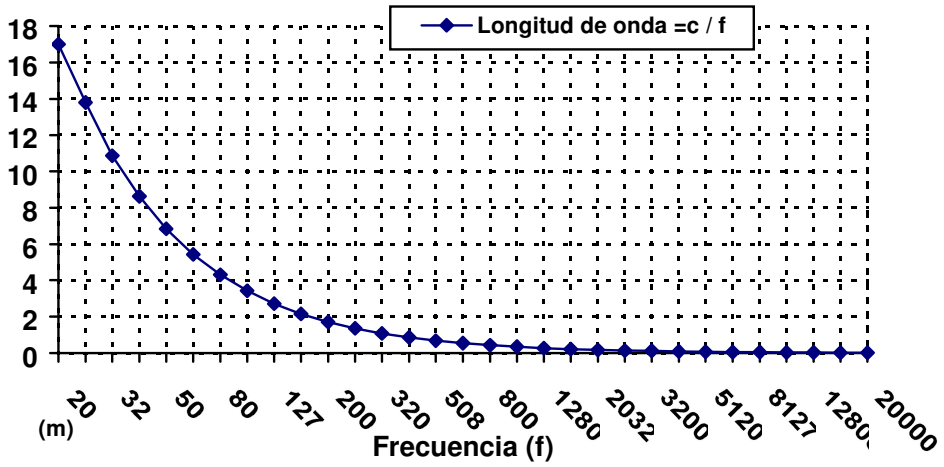


Figura 1.2.a. *Longitud de onda del sonido*

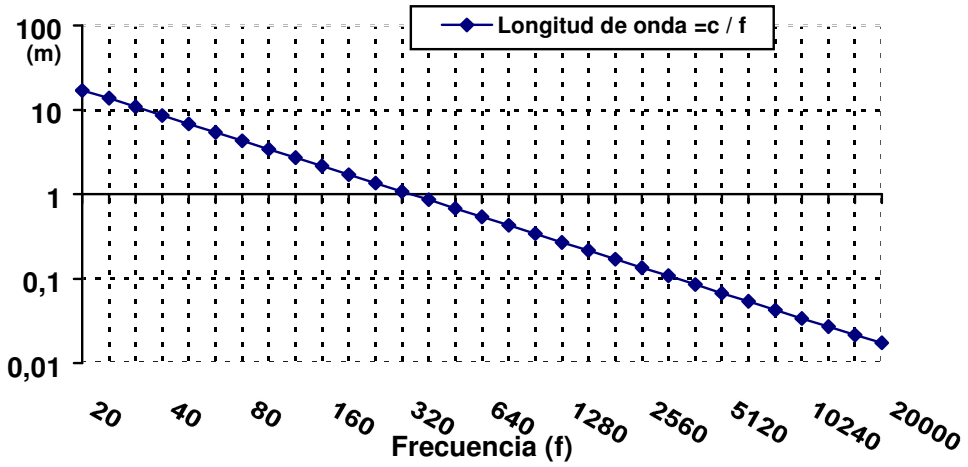
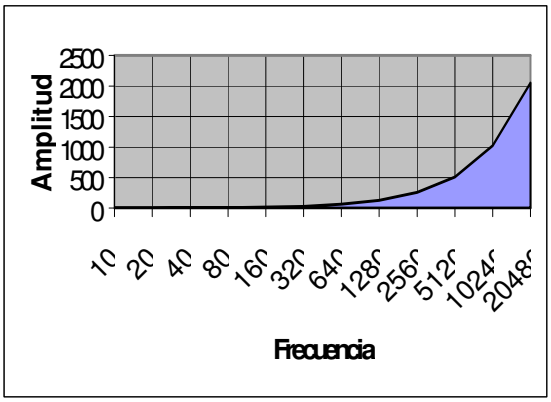
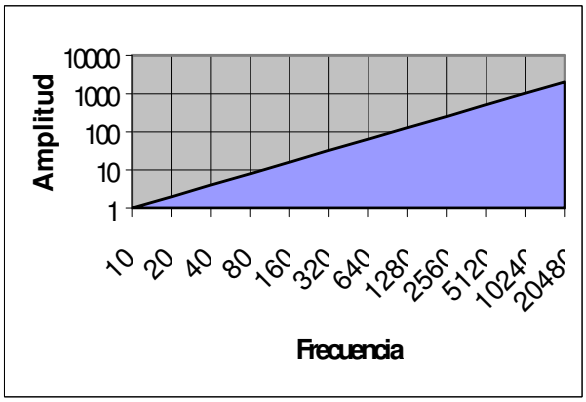
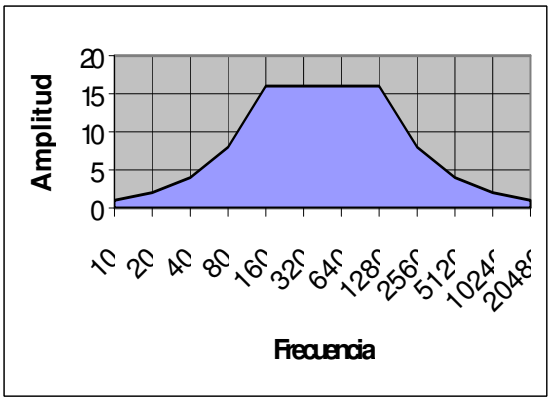


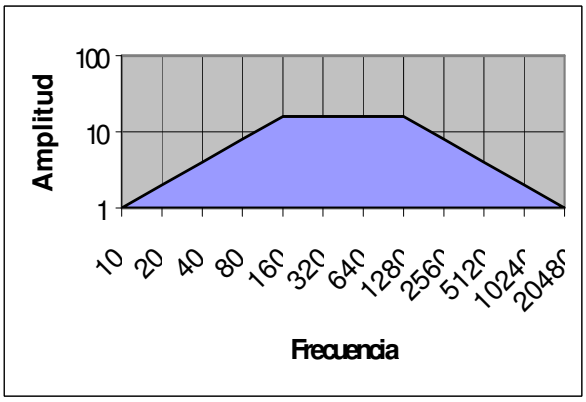
Figura 1.2.b. *Longitud de onda del sonido*

¿Qué diferencias existen entre ambos gráficos? Si observamos el eje vertical, en la figura 1.2.b vemos que la amplitud varía en múltiplos de 10, y se asigna el mismo espacio de 0'1 a 1 que de 10 a 100. Y la función que en el gráfico 1.2.a aparece como una curva, ahora se representa como una recta. Para comprender esto, vamos a explicar cómo funciona la percepción del oído humano. Si, por ejemplo, oímos un sonido a un volumen determinado, para tener la sensación auditiva de que el sonido ha doblado su volumen, el sonido debería tener en realidad *4 veces* el volumen original. Y para volver a tener doble sensación auditiva de la que ahora percibiríamos, necesitaríamos *8 veces más volumen*. Y luego 16, 32, etc… siempre el doble *de lo que ya teníamos*, para doblar la sensación auditiva. Eso es una función logarítmica. Es aquella en la que la progresión se realiza mediante múltiplos de un número, denominado base. Si hablamos de*l doble de lo que teníamos*, la base es 2. En el gráfico 1.2b se usa como base el número 10, que es la base utilizada normalmente en sonido. Por eso los valores de los ejes progresan en potencias de 10 (0'1, 1, 10…). Los gráficos logarítmicos se utilizan habitualmente en el campo de la acústica y el sonido. Esto se debe a que el oído, tal y como acabamos de explicar, reacciona a los estímulos de una forma logarítmica y no lineal, como podríamos pensar en un primer momento. En las siguientes 4 gráficas tenemos el resultado de observar gráficas con escalas logarítmicas en el eje de amplitudes, siendo el eje de frecuencias logarítmico. Cada vez que se dobla la frecuencia, se dobla la amplitud. En lineal se observan curvas de pendiente cada vez más pronunciada y en logarítmico se ven como rectas. El efecto que se consigue es comprimir la amplitud: los niveles bajos se amplían y los altos se reducen en la representación logarítmica.





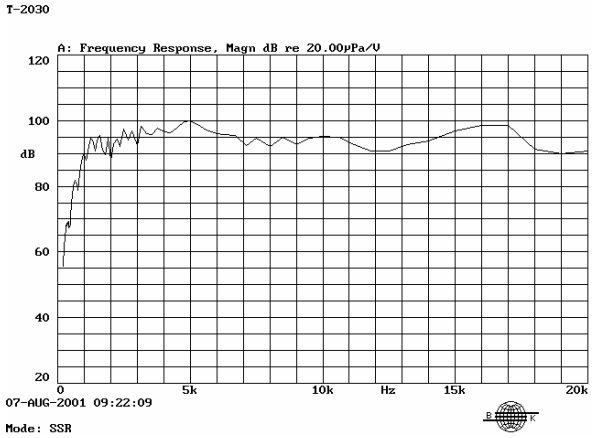


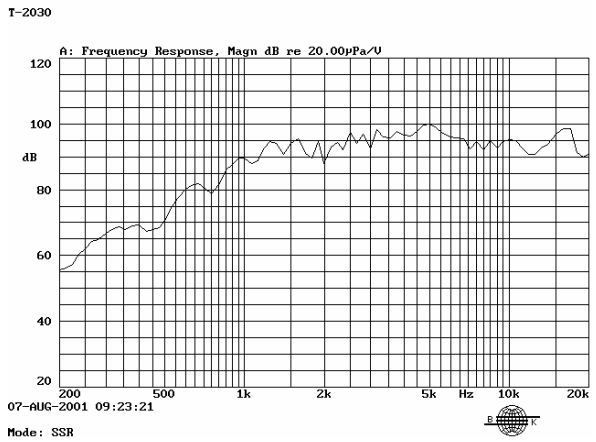


Figuras 1.3.a, b, c y d. *Amplitud lineal y logarítmica.*

Lo mismo ocurre a la hora de percibir la frecuencia. Cuando oímos sonido, si pasamos de 20 a 40 Hz, tenemos la misma sensación de cambio frecuencial que de 200 a 400 Hz o de 2000 a 4000. Podríamos decir que según vamos subiendo en frecuencia, nos vamos volviendo más insensibles a los cambios de frecuencia. Podemos distinguir un cambio de 100 a 102 Hz, pero no podemos distinguir un cambio de 1000 a 1002 Hz, sino de 1000 a 1020 Hz. Por eso se utiliza también una escala logarítmica en el eje de frecuencias.

De hecho, en las siguientes figuras 1.4.a y b, podemos ver el efecto engañoso de representar de forma lineal el eje de frecuencias al mostrar la curva del tweeter 2030:





Figuras 1.4.a y b. *Eje de frecuencias lineal y logarítmico.*

En la figura 1.5 tenemos la respuesta del Power 12" Competition con amplitud lineal y logarítmica:

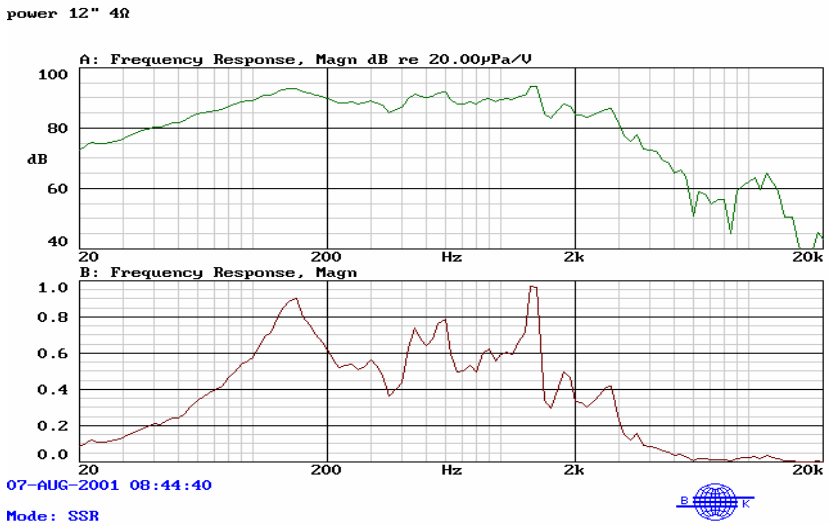


Figura 1.5. *Respuesta en frecuencia del 12"Competition con amplitud en escala logarítmica y lineal.*

En el gráfico 1.6 podemos ver la respuesta en frecuencia del altavoz 10G200 con ambos ejes en logarítmico. Obsérvese que hay la misma distancia de 20 a 200 Hz, que de 200 a 2kHz, que de 2kHz a 20kHz. Cada vez que subimos un orden de magnitud, es decir, multiplicamos por diez, se dice que hemos subido *una década*. Por ejemplo, el rango de

frecuencias de audio tiene 3 décadas, como acabamos de mencionar: de 20 a 200, de 200 a 2000 y de 2000 a 20000 Hz. Otro concepto muy utilizado es *la octava*, que se define como el rango de frecuencias comprendido entre una frecuencia dada y el doble de dicha frecuencia. Por ejemplo, de 50 a 100 Hz hay una octava, pero de 100 a 200 Hz también hay una octava. Cuanto más vamos subiendo en frecuencia, más grandes son las octavas desde un punto de vista lineal, y constantes desde un punto de vista logarítmico y psicoacústico.

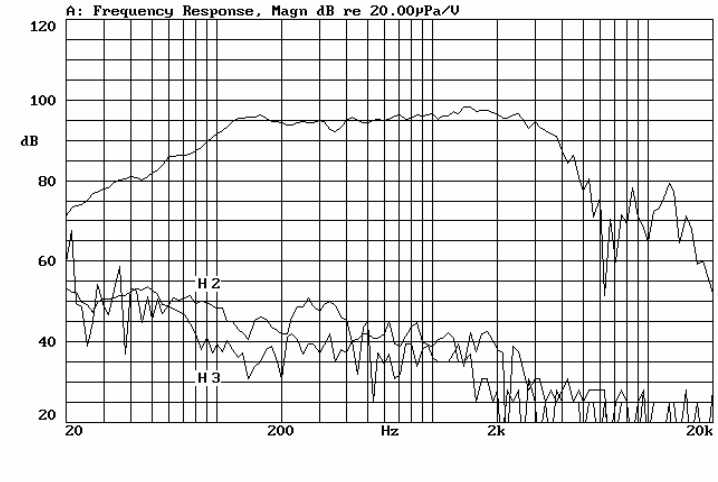


Figura 1.6. *Respuesta 10G200*

A continuación, una vez comprendida la representación logarítmica, vamos a definir formalmente los conceptos de presión sonora, decibelio y S.P.L., que son las unidades en que se mide la amplitud sonora en acústica y sonido:

Presión sonora: Al aplicar una fuerza sinusoidal a las partículas de aire, esta se comprimen y se expanden alternadamente, lo que se refleja en pequeñas variaciones de la presión atmosférica. Estas variaciones se miden en unidades llamadas Pascal (1 Pascal = 1 Newton/m^2) . Además se tiene que 10^5 Pascal = 1 atmósfera. El mínimo sonido que se puede percibir es de $2x10^{-5}$ Pascal denominado *umbral de audición*, el sonido más leve capaz de distinguir el ser humano. Por arriba, la presión sonora máxima que podemos soportar sin daños permanentes para nuestros oídos ronda los 65 Pascales, y se denomina *umbral del dolor* A partir de estas presiones, la escucha ya no es segura y nuestro sistema auditivo puede sufrir daños irreparables.

Decibelio: Equivale a *la décima parte (0.1) del Belio, unidad logarítmica de comparación entre magnitudes.* Se utiliza el logaritmo en base 10, y es esencialmente una unidad comparativa, es decir, nos indica cuán mayor o menor es una medida en dB respecto a un valor de referencia. Se utiliza la décima parte porque se observó que hacía falta más resolución para manejar las cifras de una forma cómoda. Como ya hemos dicho, en sonido se suele utilizar como referencia $2\cdot10^{-5}$ Pa. Esta unidad surge por dos razones:

1) Los órdenes de magnitud que es capaz de oír el ser humano es muy amplio, desde $2 \cdot 10^{-5}$ Pa hasta 100 Pa de presión sonora. Tales márgenes hacen muy engorrosos los cálculos y las comparaciones. Al utilizar el logaritmo, estamos comprimiendo este margen en unas cifras más manejables.
2) El oído humano funciona de una forma muy similar a la logarítmica, lo cual hace que el uso de este tipo de unidad sea más adecuado que una unidad lineal.

Recordemos que el logaritmo en base 10 de un número, es el valor al que hay que elevar 10 para obtener dicho número. P ej:

$\text{Log}_{10}(10) = 1$ Belio, ya que $10^1 = 10$.
$\text{Log}_{10}(1000) = 3$ Belios, ya que $10^3 = 1000$.
$\text{Log}_{10}(0.001) = -3$ Belios, ya que $10^{-3} = 0.001$.

Observemos que estamos representando un margen de un millón (de 1000 a 0.001) entre 3 y –3, margen que es estrecho en exceso. Por eso se decidió usar su décima parte, entonces estaríamos entre 30 y –30 dB, un margen mucho más manejable y adecuado:

$10 \cdot \text{Log}_{10}(10) = 10$ deciBelios, ya que $10^1 = 10$.
$10 \cdot \text{Log}_{10}(1000) = 30$ deciBelios, ya que $10^3 = 1000$.
$10 \cdot \text{Log}_{10}(0.001) = -30$ deciBelios, ya que $10^{-3} = 0.001$.

<u>Nivel de presión sonora</u> (*SPL del inglés Sound Pressure Level*):
Como ya hemos visto, nos interesa utilizar los deciBelios para expresar valores de presión sonora. ¿Cómo se hace esto concretamente? En la definición de logaritmo, hemos dicho que era una unidad *comparativa*, es decir, nos sirve para expresar la diferencia existente entre dos valores dados, sin tener que usar cifras muy engorrosas. Por tanto, una medida en deciBelios siempre debe tener un valor de referencia, respecto al cual comparamos. En acústica, se decidió tomar como valor de referencia el valor del umbral de audición, medida mundialmente conocida, y de la cual todos tenemos una idea (*el silencio*). Por tanto, las presiones sonoras en acústica se expresan en decibelios dividiendo el valor lineal entre este valor de referencia, aplicando el logaritmo en base 10 al cociente resultante y multiplicando finalmente por 20. Definido de una forma más formal, el nivel de presión sonora es una medida que relaciona el valor eficaz de la presión acústica con el mínimo audible promedio.

$$SPL = 20 \cdot \log \frac{P_{rms}}{P_0}, siendo\ P_0 = 2 \cdot 10^{-5}\ Pa$$

Yendo a un ejemplo más aplicado, si por ejemplo observamos la curva de respuesta que tenemos a continuación en la figura 1.8, vemos que en el eje Y tenemos valores de 20 a 120 dB, y en el margen superior vemos la referencia de esos dB "re 20.00µPa", o sea, los $2 \cdot 10^{-5}$ Pa de que hablábamos.

¿Cuántos deciBelios se corresponden con el umbral de audición? Veámoslo:

$$SPL = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\left(2 \cdot 10^{-5}\right)}{\left(2 \cdot 10^{-5}\right)}\right) = 10 \cdot \log_{10}(1) = 10 \cdot 0 = 0dB$$

Por tanto el umbral de audición se corresponde con 0dB. Esto es lógico, si pensamos que este valor lo estamos usando como referencia. Si pensamos en la figura 1.8, que representa la respuesta del 10G200, se representan valores de presión sonora de 20 a 120 dB. Estos niveles de presión sonora se corresponden con $2 \cdot 10^{-4}$ Pascales y 20 Pascales respectivamente. Efectivamente:

$$SPL = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\left(2 \cdot 10^{-4}\right)}{\left(2 \cdot 10^{-5}\right)}\right) = 20 \cdot \log_{10}(10) = 20 \cdot 1 = 20dB$$

Y el margen superior de la gráfica sería:

$$SPL = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P^2}{P^2{}_{ref}}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\left(2 \cdot 10\ \right)^2}{\left(2 \cdot 10^{-5}\right)^2}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(1 \cdot 10^{12}\right) = 10 \cdot 12 = 120dB$$

Así, un margen de **100000 unidades** lo hemos comprimido en un margen de **100** unidades.. A continuación tenemos un gráfico con algunos niveles de referencia de sonidos habituales en nuestra vida diaria (fig. 1.7):

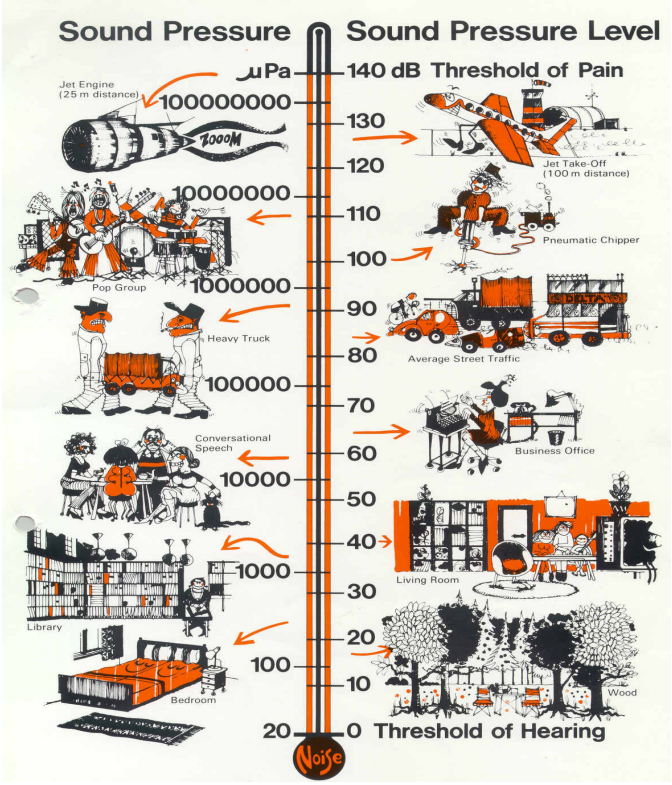


Figura 1.7. *Niveles de presión sonora*

Para aclarar un poco el mecanismo de la audición, vamos a apuntar unos conceptos básicos de psiocacústica.

Margen audible: margen de frecuencias que el ser humano puede percibir, que es de 20 a 20 kHz. Este margen es sólo una referencia, ya que varía según la edad, salud, sexo y exposiciones al ruido, entre otros factores. Lo que sí nos ocurre a todos es que no oímos con igual sonoridad unas frecuencias que otras. En la figura 1.8 vemos cómo varía la curva de respuesta del oído según la frecuencia y el nivel sonoro. Ahora que ya tenemos claros los conceptos básicos de deciBelio, escala logarítmica, décadas y octavas, vamos a observar y comentar en profundidad dicho gráfico. En esta gráfica tenemos a la frecuencia en el eje horizontal y la presión sonora en el eje vertical. Cada curva se corresponde con la sensibilidad del oído humano para diferentes niveles de presión sonora. Si observamos el gráfico a primera vista, vemos que los niveles en graves y agudos indicados por las curvas son mayores que a medias frecuencias. Esto es así porque somos menos sensibles a esos márgenes de frecuencias. Pensemos en una radio o reproductor de música. Cuando lo escuchamos a muy bajo volumen, prácticamente sólo oímos la voz de la música, ya que es la zona de frecuencias a la que somos más sensibles. Según vamos subiendo el volumen, ya empezamos a oír el bajo y la batería, en los graves, y los platos flautas, violines o demás sonidos agudos que pueda contener la canción que estemos oyendo en ese momento.

Volviendo a la gráfica 1.8, vemos que en cada curva está indicado el nivel de presión sonora al que se realizó la medida, tomando siempre como referencia una frecuencia de 1000 Hz. Por ejemplo, si observamos la curva de 60 dB, vemos que a 1kHz, el nivel de presión sonora en el eje vertical se corresponde efectivamente con 60 dB. Si en esta misma curva, nos fijamos en los 80 Hz, vemos que la curva nos indica un nivel de 70 dB. Esto quiere decir que para tener la misma sensación sonora que a 1000 Hz y 60 dB, a 80 Hz necesitamos 10 dB más, o sea 70 dB. ¿Qué nos muestran estas curvas, entonces? Nos dicen el nivel de presión sonora necesario a cada frecuencia para tener la misma percepción sonora que a 1000 Hz.

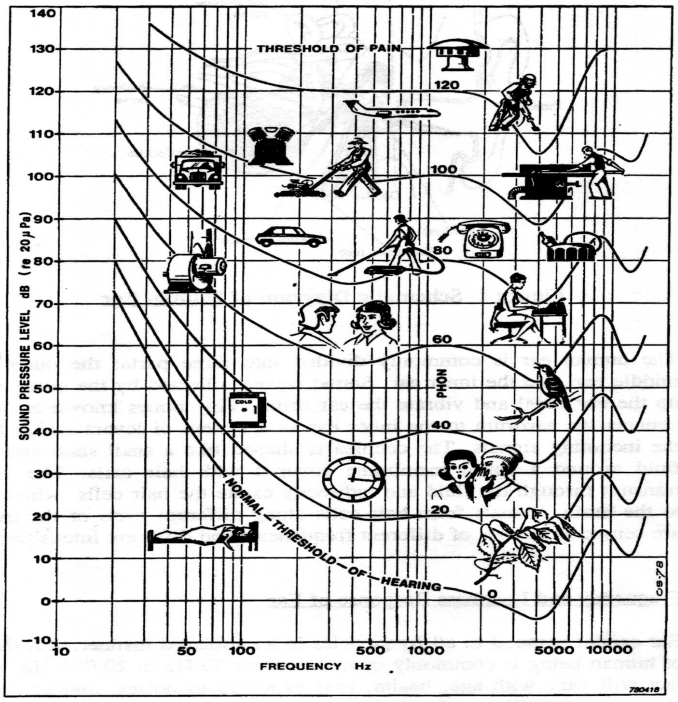
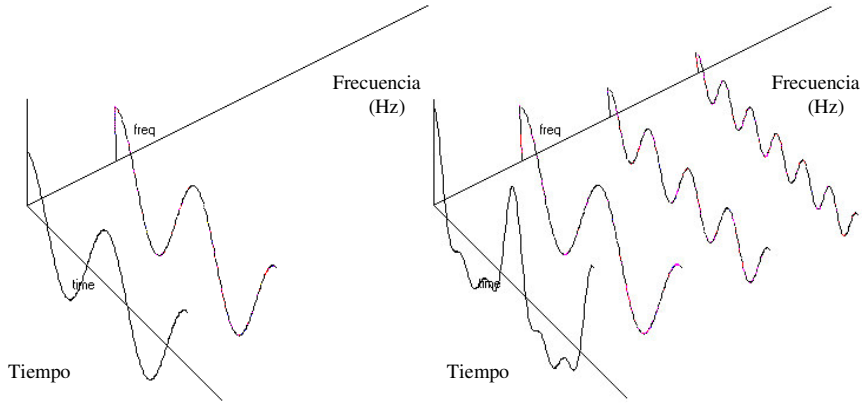


Figura 1.8. *Respuesta del oído*

Observando el gráfico en general, podemos observar que cuanto más alto es el nivel, la curva de sensibilidad varía, haciéndose más lineal en frecuencia. Claramente, se observa una región de máxima sensibilidad alrededor de 5kHz. En este margen de frecuencias es donde tenemos las consonantes, y por tanto, la inteligibilidad de la voz humana. Por eso somos más sensibles a esta región. También podemos ver que tenemos poca sensibilidad en bajas y altas frecuencias.

Timbre: Cualidad del sonido que nos permite distinguir una fuente sonora de otra cuando emiten sonidos de igual frecuencia fundamental y amplitud. Cuando dos instrumentos musicales tocan la misma nota, podemos distinguir perfectamente un violín de un piano. Esto se debe al *timbre* de cada uno. Hay muy pocos casos en los que

un cuerpo vibre a una única frecuencia fundamental. Siempre suele ir acompañada de armónicos, que son múltiplos de esa frecuencia fundamental, sumados a ella en diferentes proporciones y que dotan a la fuente emisora de un sonido característico. Para ilustrar mejor estos conceptos, fijémonos en las siguientes figuras, 1.9.a y b.



Figuras 1.9.a y b. *Visión de tiempo y frecuencia*

En este esquema en tres dimensiones, tenemos las claves para entender la dualidad tiempo-frecuencia. Tenemos dos formas de observar una señal: en el dominio del tiempo, que sería el eje de la izquierda y en el dominio de la frecuencia, que sería el eje del fondo. Entonces, si tenemos un tono puro como en la figura 1.6.a, este tono se corresponde con una única frecuencia fundamental, que en el dominio temporal vemos como una onda senoidal. Pero en frecuencia, como efectivamente se trata de una *única frecuencia* fundamental, en un analizador de frecuencias tan sólo veríamos una única línea, a la frecuencia a la que vibra la señal que estamos viendo, tal y como observamos en el eje de frecuencias de dicha figura. Si por ejemplo tenemos una fuente que vibra en tres frecuencias (figura 1.9.b), en el tiempo veríamos una forma de onda suma de los tres armónicos como la que está dibujada en el eje temporal de dicha figura. Pero si lo viéramos en frecuencia, simplemente veríamos tres rayas espectrales en las frecuencias que conforman esta vibración. Observemos también que según cada armónico es más grave (frecuencias bajas), es decir, evoluciona más lentamente en el tiempo, su raya espectral aparece más próxima del origen del eje de frecuencias, donde está el 0 Hz.

A continuación mostramos la forma temporal y frecuencial de tres instrumentos musicales dando el mismo tono (figuras 1.10 a 1.15). Obsérvese que la frecuencia fundamental, que la marca el paso por cero de la señal, es la misma para los tres, pero su contenido armónico es bastante diferente. Incluso la amplitud de los armónicos suele ser mayor que la nota fundamental. En este caso la nota es un sol de la 3ª octava, que equivale a una frecuencia de 196 Hz. Todas las gráficas contienen tres períodos de esta frecuencia fundamental. Los picos que se observan en la frecuencia se corresponden con los tonos que forman la onda en el tiempo. Como se puede observar, no es fácil deducir qué frecuencias contiene la señal viendo simplemente la forma de la señal en el

tiempo. Por eso resulta de gran interés la representación en frecuencia. En ella se nos revela información sobre la señal que de otro modo sería imposible de apreciar en el tiempo.

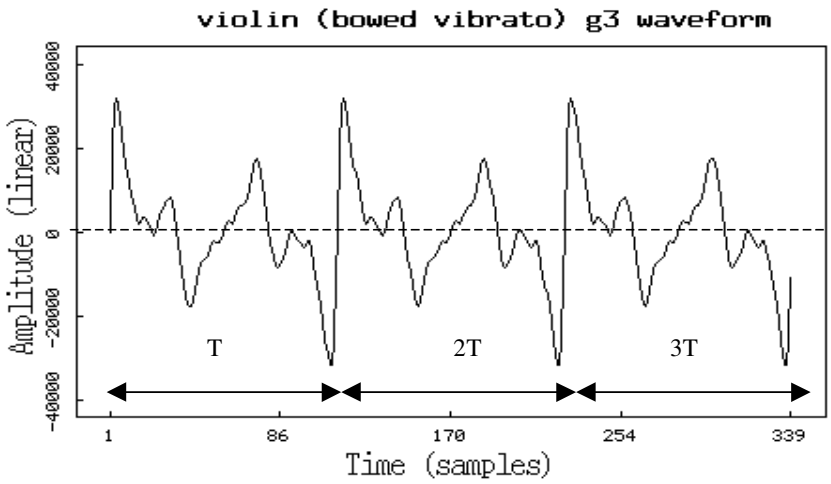


Figura 1.10. *Nota Sol 3ª octava de un violín en el tiempo (196 Hz)*

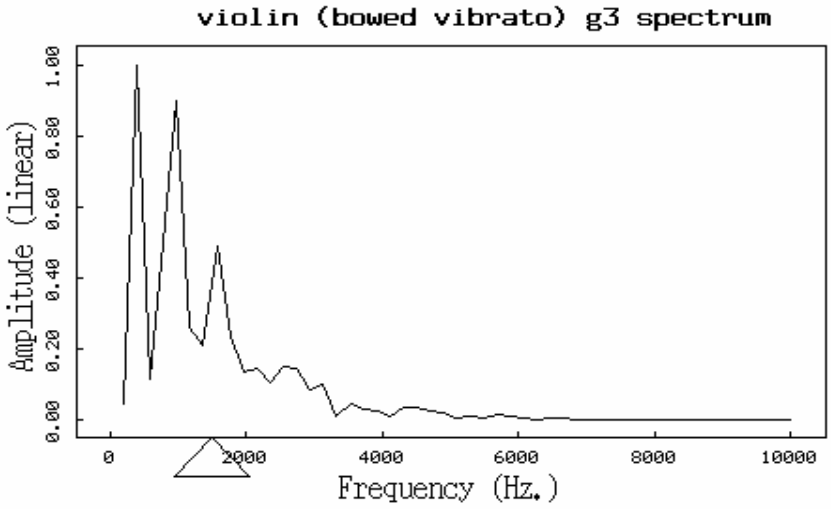


Figura 1.11. *Nota Sol 3ª octava de un violín en la frecuencia*

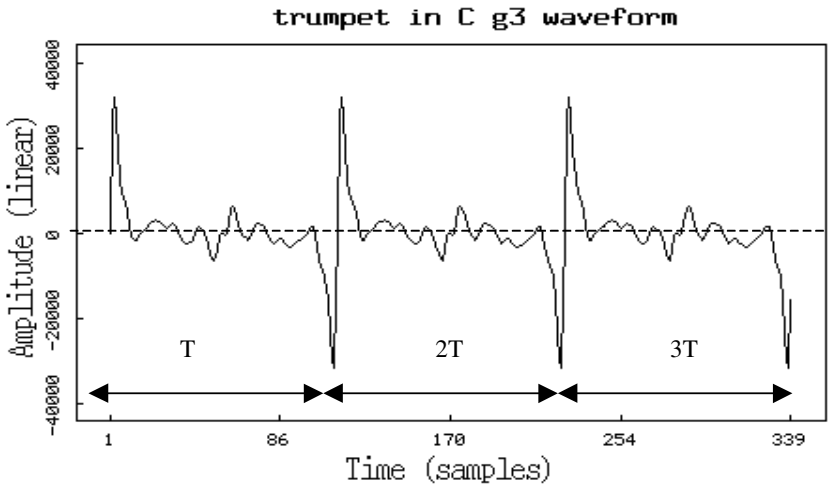


Figura 1.12. *Nota Sol 3ª octava de una trompeta en el tiempo (196 Hz)*

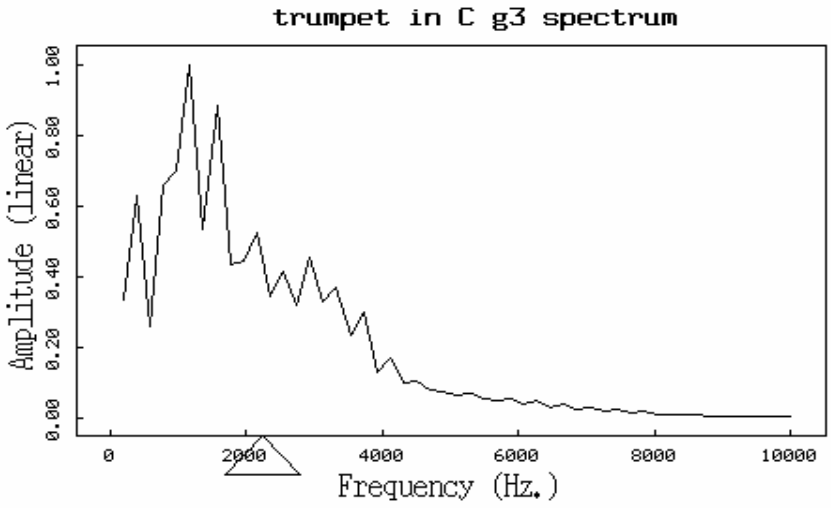


Figura 1.13. *Nota Sol 3ª octava de una trompeta en la frecuencia*

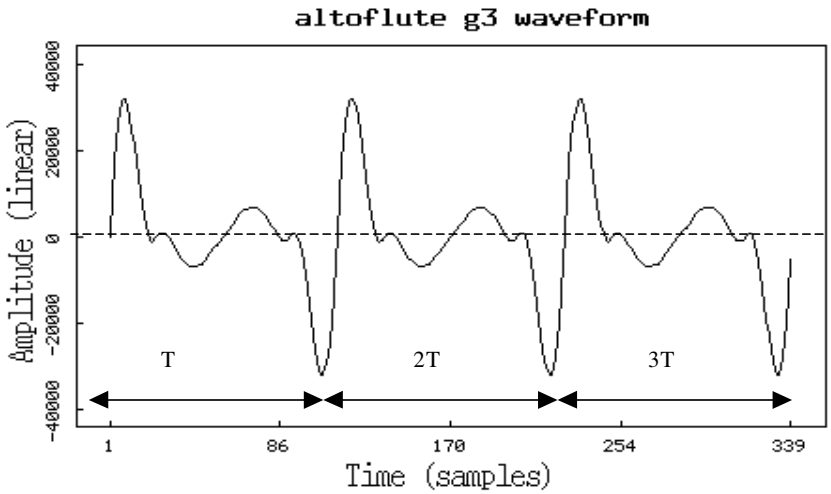


Figura 1.14. *Nota Sol 3ª octava de una flauta en el tiempo (196 Hz)*

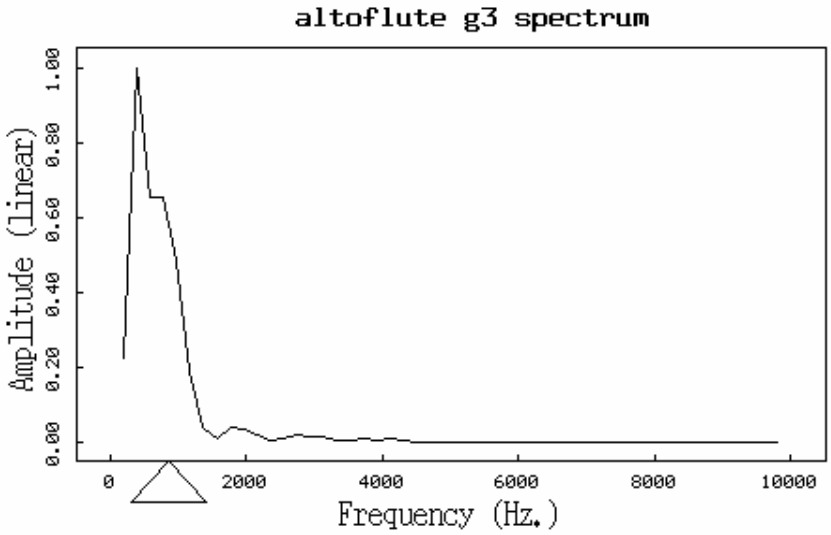


Figura 1.15. *Nota Sol 3ª octava de una flauta en la frecuencia*

2. EL ALTAVOZ ELECTRO-DINÁMICO

Una vez definidos los conceptos básicos de acústica necesarios, pasamos a describir en esta sección el funcionamiento del altavoz electro-dinámico. Partiendo de su definición general como transductor, nos adentraremos en el análisis de los componentes del altavoz (sección 2.2), las especificaciones técnicas relativas al funcionamiento del conjunto del altavoz (sección 2.2) y los parámetros más útiles y menos entendidos del altavoz: los parámetros de Thiele-Small (sección 2.3).

2.1. Definición general como transductor

Un **transductor** se define como ***un dispositivo que transforma un tipo de energía en otro tipo***. El transductor que más nos interesa es el altavoz electro-dinámico o de bobina móvil, que se define como un transductor electro-mecánico-acústico. Por su definición, este tipo de transductor transforma la energía eléctrica que se le entrega en energía mecánica (movimiento). A su vez, dicha energía mecánica, en el caso de producirse en el aire, va a crear ondas sonoras, produciéndose una segunda transformación en energía acústica.

En el aspecto electro-mecánico, tenemos una bobina sumergida en un campo magnético uniforme y permanente, producido por el imán. Si una corriente eléctrica atraviesa dicha bobina, se producirá una fuerza transversal que la moverá. Por otro lado, bajo el punto de vista mecánico-acústico, si adherimos un cono a esta bobina en movimiento, dicho cono va a producir ondas sonoras, es decir, energía acústica.

Al desplazarse el cono al ritmo que le marca la señal eléctrica, se transmite la vibración a las partículas de aire vecinas. Esta vibración se transmite de unas partículas a otras hasta llegar al tímpano de nuestro oído, donde percibimos finalmente el sonido (figuras 2.1 y 2.2).

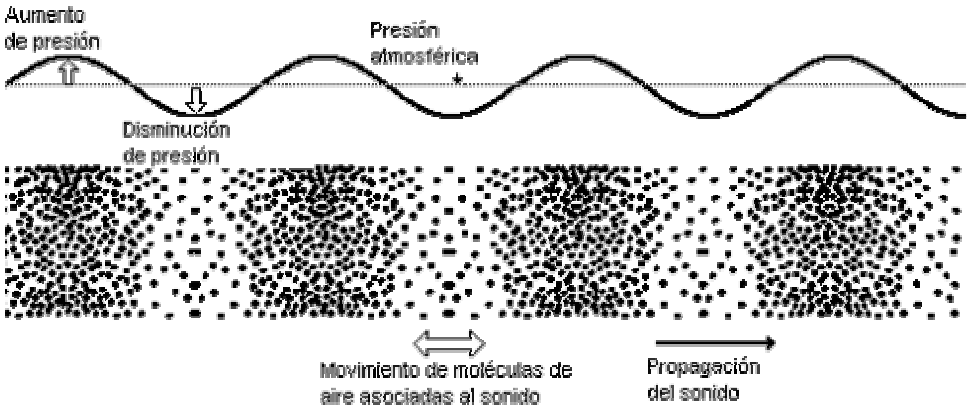


Figura 2.1 *Vibración del aire*

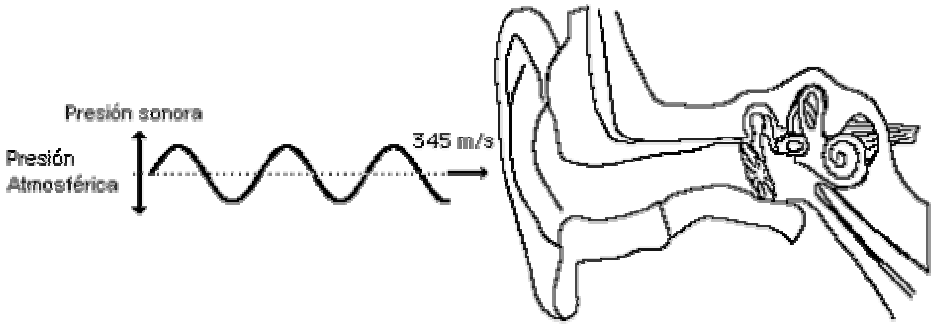


Figura 2.2. Onda de presión

2.2. Caracterización de las partes del altavoz

2.2.1. El conjunto móvil

El conjunto móvil se compone de varios elementos (ver figura 2.3):

- **Cono:** constituye la superficie radiante del altavoz. Idealmente el cono ha de ser lo más rígido posible, de modo que toda su superficie vibre como una unidad.
- **Suspensión y centrador:** ambos son elementos flexibles que controlan el desplazamiento del cono, de forma que éste sólo se pueda desplazar en una única dirección axial. La suspensión va fijada a la parte posterior del cono, formando un conjunto denominado membrana, mientras que el centrador se fija al punto de unión entre el cono y la bobina.
- **Bobina:** se trata del elemento motriz del conjunto móvil.
- **Tapita:** su función principal es proteger al entrehierro de la acumulación de partículas extrañas.

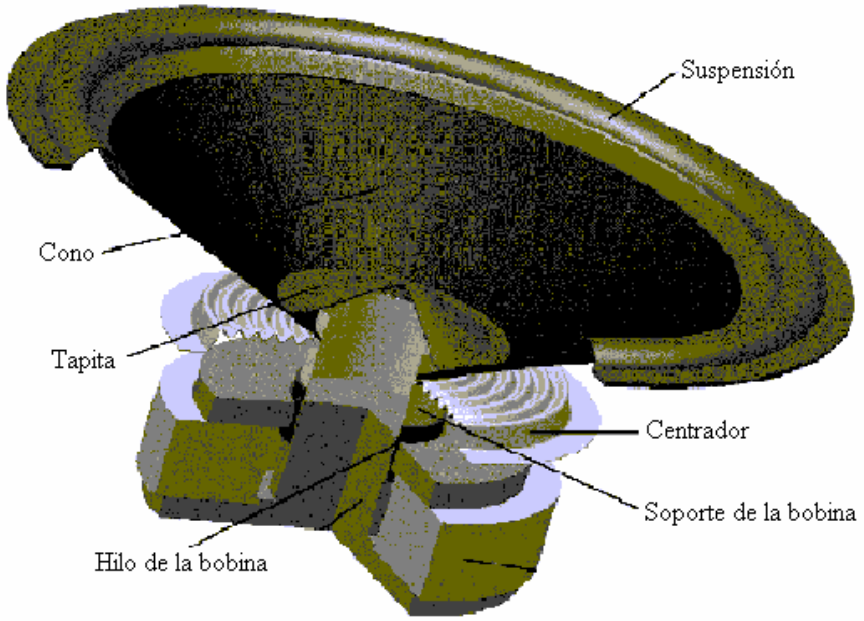


Figura 2.3. *Sección de un altavoz convencional.*

A la hora de cuantificar las características mecánicas del conjunto móvil se definen tres parámetros conocidos como:

- **Masa mecánica (Mms):** representa el peso total de la bobina, la membrana y la masa de aire que ve ésta. Su unidad es el kg. La masa móvil es un parámetro fundamental, ya que es un factor involucrado en el rendimiento del altavoz (el rendimiento es la relación entre la potencia acústica que entrega el altavoz y la potencia eléctrica que se le aplica – ver sección 2.3.4). Así, el rendimiento es inversamente proporcional a la masa móvil: a mayor masa móvil, menor rendimiento. Además, su efecto sobre la respuesta en frecuencia es determinante, sobre todo en frecuencias medias y altas. En la figura 2.4 se aprecia esta influencia, podemos ver como el hecho de aplicar un tratamiento a la membrana que incrementa su peso, reduce el nivel de presión obtenido sobre todo en frecuencias altas.
- **Elasticidad mecánica (Cms):** representa la elasticidad del conjunto centrador-suspensión. Se mide en μm/N. Una elasticidad elevada significaría una combinación de centrador y suspensión muy flexible, mientras que una elasticidad baja correspondería a una combinación rígida.
- **Resistencia mecánica (Rms):** representa las pérdidas mecánicas que provocan el centrador y la suspensión al limitar el desplazamiento de la membrana. Su unidad es el kg/s.

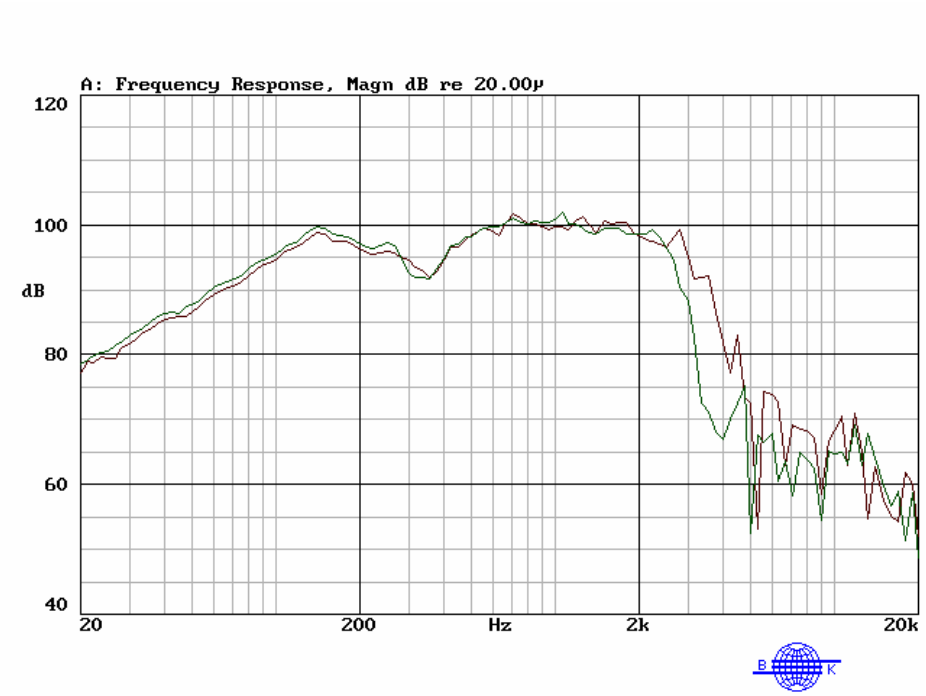


Figura 2.4. *Efecto del aumento de la masa móvil sobre la respuesta en frecuencia del altavoz: curva marrón - 92 gr; curva verde – 103 gr.*

Uno de los parámetros característicos del altavoz es la frecuencia de resonancia, que depende directamente de los valores de elasticidad y masa mecánica. El fenómeno físico de la frecuencia de resonancia se observa como un máximo de velocidad del conjunto móvil a dicha frecuencia, de forma que entregando la misma potencia al altavoz que para el resto de frecuencias el conjunto móvil se desplaza más rápidamente.

Al contrario de lo que se pueda llegar a creer, el hecho de que tengamos un máximo de velocidad ***no*** *implica que el desplazamiento tenga que ser máximo*. Esto se puede observar en la figura 2.5, dónde aparecen representados el desplazamiento y la velocidad del conjunto móvil del 12"BR70 en función de la frecuencia. Como vemos, el máximo del desplazamiento está en 10 Hz, mientras que el máximo de velocidad (o frecuencia de resonancia) se encuentra en torno a los 45 Hz. El hecho de que estos parámetros sean variables con la frecuencia se debe a las limitaciones impuestas por la elasticidad y la masa del conjunto móvil. Para poder entenderlo cabe distinguir dos zonas en la frecuencia:

- **Entre 10 y 45 Hz (por debajo de la frecuencia de resonancia):** si intentamos reproducir un tono de 20 Hz, estamos obligando al conjunto móvil a oscilar a un ritmo de 20 ciclos/s, lo que corresponde a un período de 50 ms. Por tanto, el conjunto móvil debe desplazarse desde el pico máximo al pico mínimo de la onda en 25 ms. Si doblamos la frecuencia a reproducir, inyectando una señal de 40 Hz, en este caso el período es de 25 ms y el tiempo que debe tardar en ir del máximo al mínimo es de 12,5 ms; es decir, la mitad de tiempo que para 20 Hz. Por tanto, si recordamos la expresión que relaciona espacio (desplazamiento), velocidad y tiempo:

  $$x = v \cdot t$$

  Siendo x el desplazamiento, v la velocidad y t el tiempo. Si el conjunto móvil debe recorrer el mismo espacio en la mitad de tiempo, la velocidad deberá ser el doble. Sin embargo, dado que el sistema de suspensiones tiene cierta rigidez, actúa como freno y, por tanto, la velocidad que en realidad alcanza el conjunto móvil es menor de la que debería ser, así como el desplazamiento. De esta manera, en la figura 2.5 vemos como entre 10 y 45 Hz la velocidad aumenta a un ritmo menor del ideal y el desplazamiento disminuye con la frecuencia.

- **A partir de 45 Hz (por encima de la frecuencia de resonancia):** Conforme aumenta la frecuencia y va disminuyendo la amplitud del desplazamiento, el efecto de freno de las suspensiones se va atenuando. Sin embargo, al ir exigiendo oscilaciones cada vez más rápidas, entra en juego un segundo factor: el conjunto móvil no puede mover su masa a un ritmo tan rápido. De este modo, la velocidad empieza a disminuir con la frecuencia y contribuye a reducir el desplazamiento cada vez más.

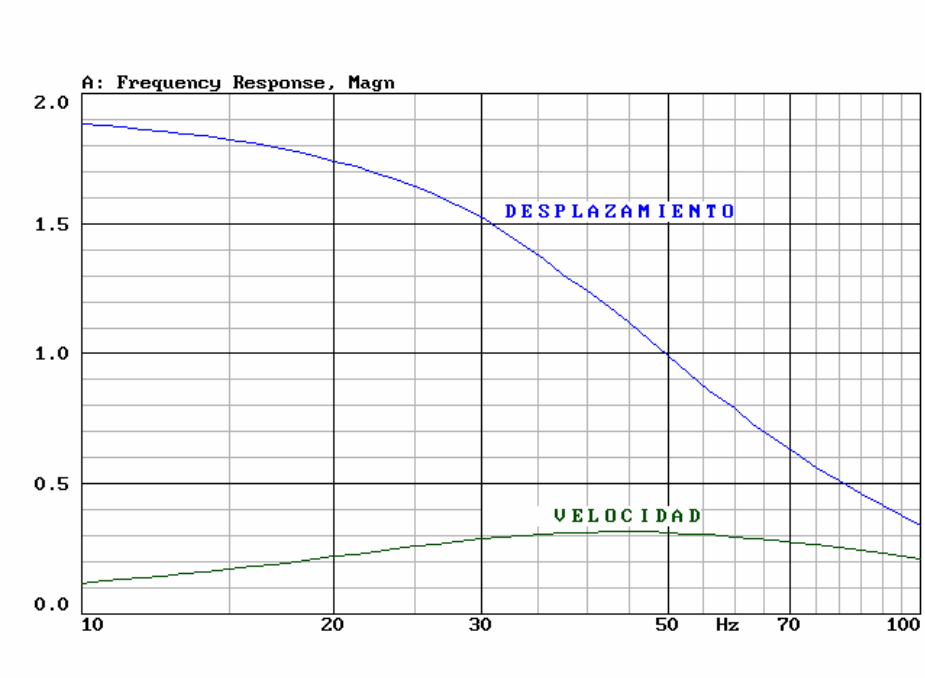


Figura 2.5. *Desplazamiento y velocidad del conjunto móvil del 12"BR70 en función de la frecuencia.*

Si comparamos la curva de velocidad del conjunto móvil de este ejemplo con un conjunto móvil de distintas características mecánicas (mayor elasticidad y masa – ver figura 2.6) vemos como se cumple lo explicado hasta ahora: en la primera zona el conjunto más elástico se desplaza más rápidamente, mientras que en la segunda zona, el conjunto más ligero es el que tiene una mayor velocidad. Por tanto, la frecuencia de resonancia representa la transición entre estas dos zonas: una primera zona controlada por la elasticidad y otra segunda regulada por la masa móvil.

La importancia de la frecuencia de resonancia se debe a que, al constituir una zona de transición, es inestable por naturaleza y por tanto, no nos interesa desde el punto de vista práctico. Así, dado que el rango de frecuencias es mucho menor por debajo de la frecuencia de resonancia que por arriba, esta frecuencia viene a marcar la frecuencia mínima del rango de reproducción del altavoz.

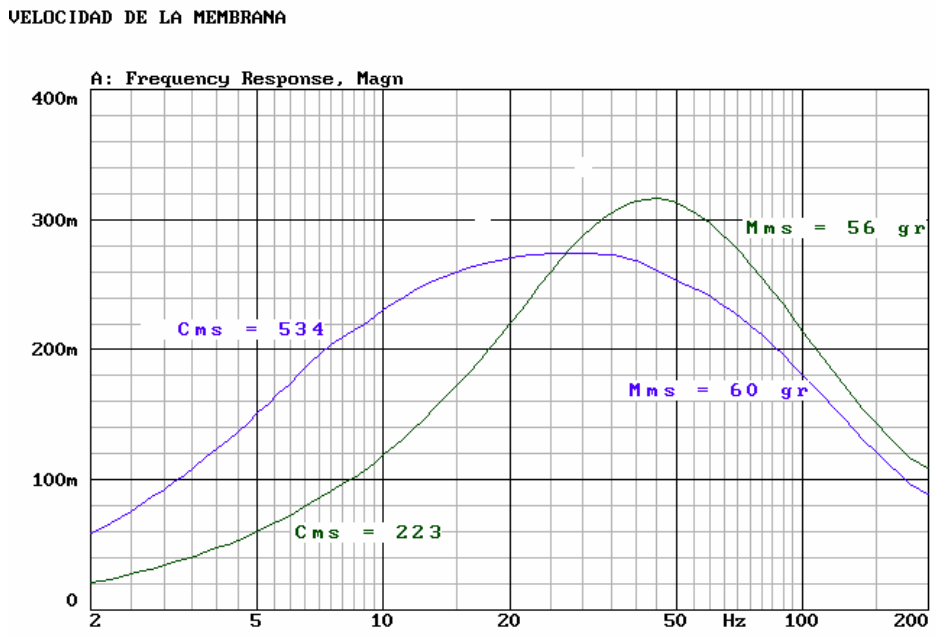


Figura 2.6. *Comparación entre las curvas de velocidad de dos conjuntos móviles: curva verde – 12"BR70; curva azul – 12"POWER.*

La dependencia del valor de la frecuencia de resonancia respecto a los parámetros mecánicos se produce de la siguiente manera:

- A mayor peso del conjunto móvil obtenemos una frecuencia de resonancia más baja, y viceversa.
- A mayor elasticidad del conjunto móvil obtenemos una frecuencia de resonancia más baja, y viceversa.

Como ya hemos avanzado, la frecuencia de resonancia limita el funcionamiento del altavoz en frecuencias graves. En la figura 2.7 podemos ver un ejemplo del efecto que produce la variación de la frecuencia de resonancia; en este caso se ha utilizado una simulación de la respuesta en frecuencia del altavoz 18"LX60 montado en caja bass-reflex. La curva amarilla corresponde a un altavoz de serie, cuya frecuencia de resonancia se sitúa en 27 Hz, mientras que la curva naranja representa el comportamiento del mismo modelo si introducimos algunas variaciones: utilizamos un centrador más rígido y una bobina más ligera, lo que supone un aumento de la frecuencia de resonancia, que pasa a ser 47 Hz. En la gráfica se observa como la respuesta del altavoz se desplaza hacia frecuencias más altas.

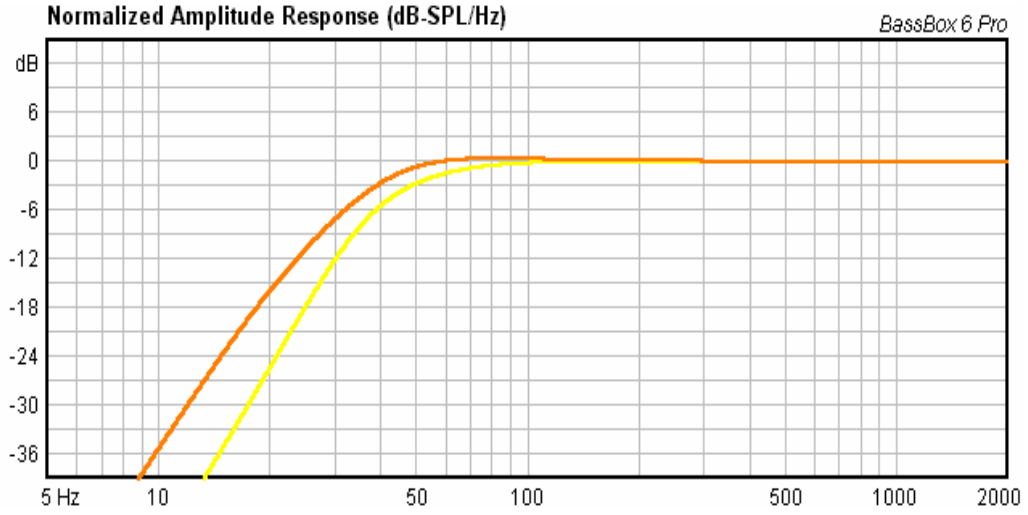


Figura 2.7. *Efecto de la variación de la frecuencia de resonancia sobre el comportamiento del altavoz: curva amarilla –fs 27 Hz; curva naranja - fs 47 Hz.*

De esta manera, un altavoz destinado a una aplicación de graves debe tener una frecuencia de resonancia mucho más baja que uno destinado a reproducir frecuencias medias. Por ejemplo, el 18"LX60 (graves) tiene una frecuencia de resonancia de 27 Hz, mientras que el 8"M100 (medios) está en torno a los 94 Hz.

2.2.2. El conjunto magnético. El factor de fuerza: Bl

El parámetro que caracteriza la capacidad de transformación de la parte eléctrica a la parte mecánica del transductor se conoce como factor de fuerza o Bl. Por su propia definición se deduce que se trata de un factor determinante del rendimiento del altavoz: a mayor Bl, mayor rendimiento. Su nombre viene dado directamente por los factores que determinan su valor, es decir:

$$Factor\ de\ Fuerza = B \times l \qquad [en\ N/A]$$

dónde B es el flujo magnético (medido en Tesla) que existe en el entrehierro y l es la longitud del hilo de la bobina (en metros). Para entender mejor los factores que influyen en la obtención del Bl, haremos un breve análisis de los elementos que lo condicionan:

- **El sistema magnético:** formado por imán, perno y anilla de campo (ver figura 2.8). Produce un campo magnético B en el entrehierro, en el cual está inmersa la bobina. Dada la definición del Bl, a mayor B, mayor rendimiento.

Los dos tipos de imán que se utilizan normalmente son (ver tabla comparativa 2.1):

- **Ferrita:** es el tipo de imán que más se utiliza. Sus principales características son: coste bajo, resistencia a la corrosión y propiedades magnéticas de grado

bajo-intermedio con buena estabilidad. Por lo que respecta a las propiedades magnéticas, existe un indicador de la calidad del imán que se conoce como producto de energía, que en el caso de imanes de ferrita suele estar entre 1 y 4 Megagauss Oersted. En el caso del comportamiento respecto a la temperatura, existe una temperatura límite, conocida como temperatura de Curie, a partir de la cual el imán pierde sus propiedades magnéticas de forma permanente. En el caso de los imanes de ferrita ronda los 450ºC.

- **Neodimio:** es un tipo de material difícil de encontrar en la tierra que se está imponiendo en los últimos tiempos debido a sus ventajas respecto a los imanes de ferrita, las cuales son: altas prestaciones magnéticas (con valores de producto de energía entre 25 y 40 MGOe) que permiten utilizar imanes de poco peso y volumen reducido mejorando el flujo obtenido con imanes de ferrita. Sin embargo, presentan algunas desventajas: coste alto, susceptibilidad frente a la corrosión (precisan de un esmalte protector) y sensibilidad a la temperatura (el valor de temperatura de Curie está en torno a los 300ºC) que puede ocasionar pérdidas de flujo irreversibles. Como ejemplos de aplicaciones de este tipo de imán, tenemos el modelo 115”Nd/W, que con unas prestaciones similares al 15”G400 (modelo con imán de ferrita), tiene la mitad de peso: 5.3 kg frente a 10.4 kg. Si comparamos el 102 Nd con el 10”G150, aunque la diferencia de peso no es tan espectacular (3.7 kg frente a 4.6 kg), casi se triplica el rendimiento (8.6% frente a 3%).

	Ferrita	**Neodimio**
Coste	Bajo	Alto
Resistencia a la corrosión	Buena	Mala
Propiedades magnéticas	Grado bajo-medio: *Producto de energía* entre 1 y 4	Grado alto: *Producto de energía* entre 25 y 40
Estabilidad de las propiedades magnéticas	Alta: *Tª de Curie* 450ºC	Baja: *Tª de Curie* 300ºC

Tabla 2.1. *Comparación entre los dos tipos de imán más utilizados en altavoces: ferrita y neodimio.*

- **La bobina:** se trata de hilo conductor devanado sobre un cilindro rígido. En la figura 2.8 se aprecia como la bobina se encuentra repartida de forma equivalente a ambos lados de la anilla de campo, con el objetivo de que el aprovechamiento del flujo magnético sea óptimo. La longitud del hilo conductor se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$$

dónde r es el radio de la bobina y n es el número de espiras. Por tanto, a mayor radio de la bobina y mayor número de espiras, mayor longitud de hilo, y por tanto, mayor rendimiento. Sin embargo, la longitud del hilo no puede ser todo lo grande que queramos, ya que el incremento de la longitud del hilo lleva asociado un incremento de la resistencia eléctrica y del peso de la bobina, lo que comporta una disminución del rendimiento (en la sección 2.3.4 dedicada al estudio del rendimiento, se volverá a incidir en estos aspectos). Concretamente, el valor de la resistencia eléctrica de la bobina viene dado por:

$$R_E = \frac{k \cdot l}{S}$$

dónde k es la resistividad del material del hilo (en ohmios x m), l la longitud del hilo (en metros) y S la sección del hilo (en m^2).

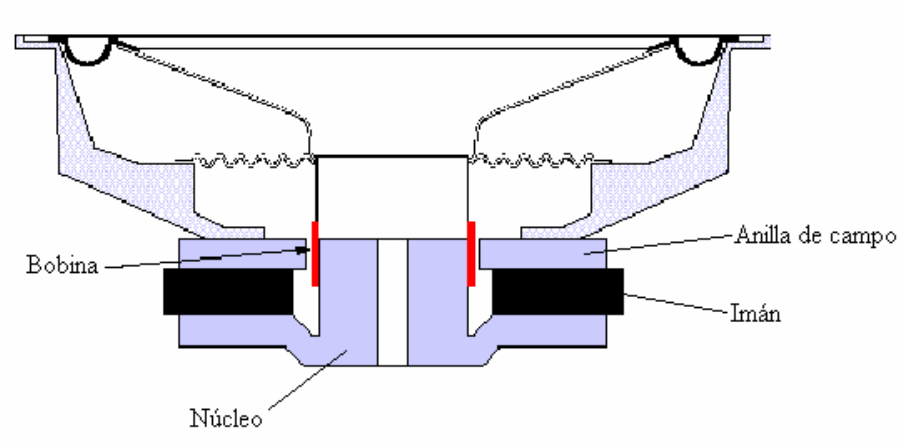


Figura 2.8. *Sistema magnético del altavoz.*

El tipo de material del hilo es determinante tanto para el valor de resistencia alcanzado como para el peso de la bobina, por lo que es un factor a tener en cuenta en el diseño. Los materiales más utilizados son el cobre y aluminio. En la tabla 2.2 podemos ver una comparación de las características de estos materiales. A partir de esta tabla, se deduce que para idénticas dimensiones de hilo, por una parte, la resistencia será mayor en el caso del aluminio, y por otro lado, el peso será mayor en el caso del cobre.

	Cobre	Aluminio
Resistividad (ohms x m)	0.0172 x 10e-6	0.0283 x 10e-6
Densidad (kg/m^3)	8700	2700

Tabla 2.2. *Comparación entre las características de los materiales más utilizados para hilo de bobina.*

2.3. Características Generales

2.3.1 Impedancia

Consideremos un circuito sencillo, un generador de frecuencia conectado en serie a una carga, que iremos cambiando. En el primer caso, la carga es una resistencia eléctrica de 6 ohmios. Si el generador suministra una tensión de 20 V, la resistencia disipará una potencia de 50 W.
Este resultado viene dado por la siguiente expresión:

$$W = \frac{V^2}{R}$$

dónde W es la potencia (en vatios), V es la tensión eléctrica (en voltios) y R es la resistencia eléctrica (en ohmios).
Sea cual sea la frecuencia de la señal que se aplique a la resistencia, la potencia disipada se mantendrá constante, ya que **una resistencia tiene un valor constante para todas las frecuencias**.

En el segundo caso, la carga es una bobina del modelo 12”LX60. Este elemento tiene una naturaleza compleja, se puede descomponer en dos elementos: una resistencia y una inductancia. La parte resistiva se comporta como la resistencia eléctrica del primer caso, pero el nuevo elemento, la inductancia, tiene un comportamiento variable con la frecuencia: al aumentar la frecuencia, su “resistencia” aumenta. Debido a su naturaleza variable con la frecuencia, en lugar de resistencia recibe el nombre de impedancia. La expresión que da la impedancia de la inductancia viene dada por

$$Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

dónde f es la frecuencia y L es la inductancia (en henrios). La misma inductancia varía con la frecuencia, tal como podemos observar en la figura 2.9.

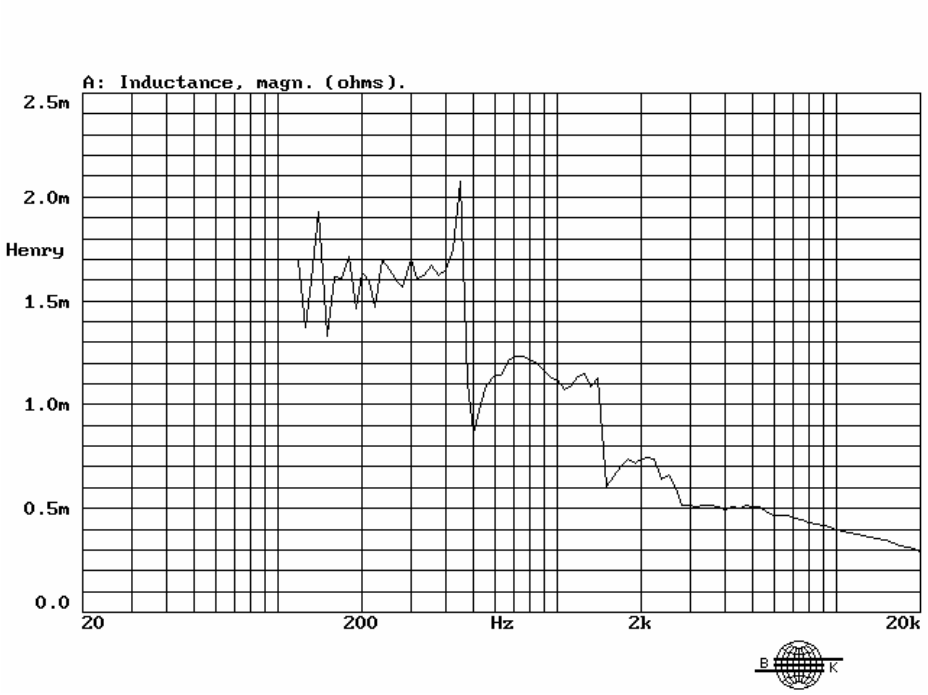


Figura 2.9. *Curva de inductancia de la bobina del modelo 122 Nd.*

Por tanto, en el caso de la bobina la impedancia total viene dada por la combinación de los dos elementos, resistencia e inductancia. En la figura 2.10 se muestra como varía la impedancia de la bobina del modelo 12”LX60 en función de la frecuencia.

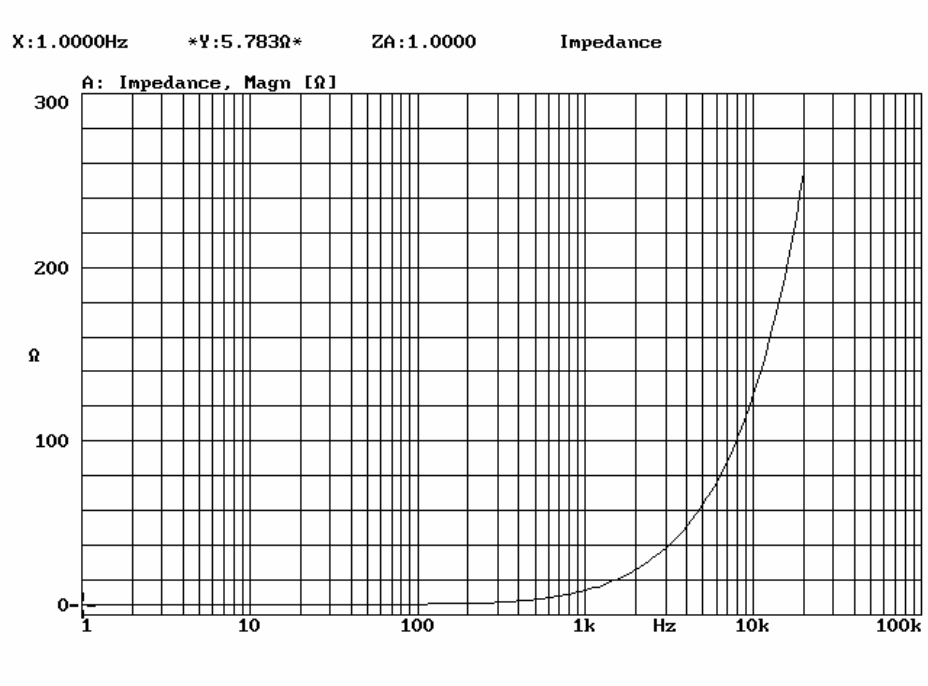


Figura 2.10. *Curva de impedancia de la bobina del modelo 12”LX60.*

En la curva del ejemplo se ve claramente el efecto de la combinación de los dos elementos: a 0 Hz, la impedancia es la resistencia de la bobina, mientras que conforme aumenta la frecuencia la impedancia aumenta debido al efecto de la inductancia. El hecho de que la curva esté desplazada hacia arriba 5.8 ohmios, se debe al efecto de la resistencia. Debido a la variación con la frecuencia de la impedancia, la potencia disipada por la bobina cambia de forma consecuente: dado que para cada frecuencia tenemos un valor de impedancia, la potencia real se obtiene tomando ese valor de impedancia.

En el tercer caso, la carga es un altavoz modelo 12"LX60, cuya curva de impedancia aparece en la figura 2.11. Los cambios observados en la curva vienen dados porque en el altavoz existe una impedancia adicional a la puramente eléctrica de la bobina originada por los nuevos elementos añadidos a ésta (membrana, suspensión y centrador). Estos elementos están caracterizados mecánicamente por los parámetros *Rms, Mms y Cms*, como ya se ha visto en la sección 2.2. Estos tres parámetros determinan la impedancia mecánica del altavoz, que representa la oposición del conjunto móvil al movimiento. De esta forma, a mayor impedancia mecánica, menor velocidad de la membrana. La impedancia mecánica (Z_{ms}) se mide en ohmios mecánicos y viene dada por la siguiente expresión (simplificada con fines didácticos):

$$Z_{ms} = R_{ms} + f \cdot M_{ms} - \frac{1}{f \cdot C_{ms}}$$

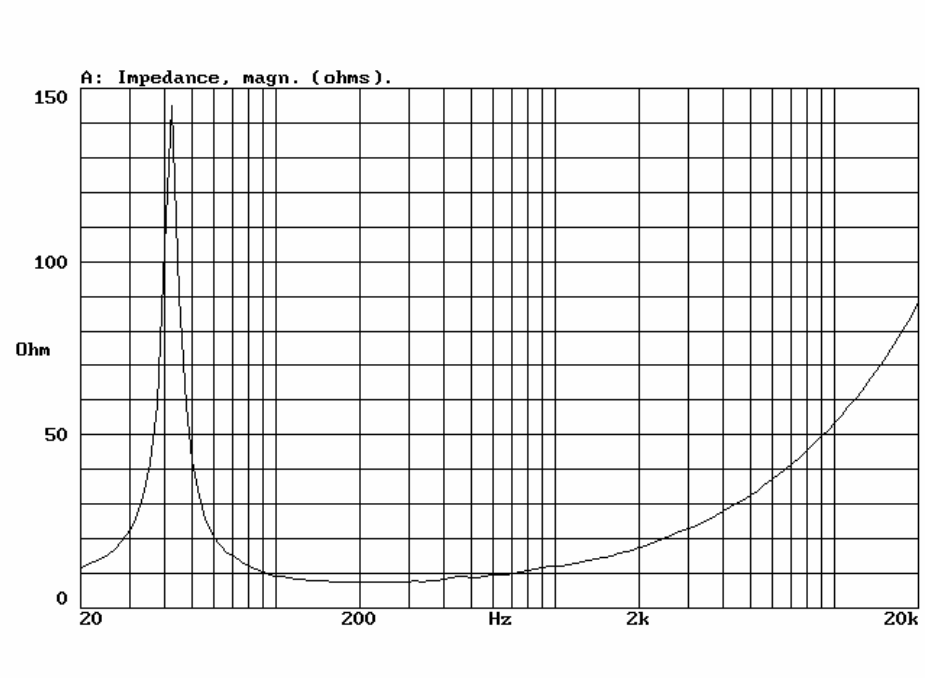


Figura 2.11. *Curva de impedancia del altavoz 12"LX60.*

Sin embargo, no podemos concluir que la impedancia medida en bornes del altavoz es la suma de la impedancia eléctrica del hilo de la bobina y la impedancia mecánica del conjunto móvil, ya que son dos magnitudes que pertenecen a ámbitos distintos: eléctrico y mecánico. Es necesario trasladar la impedancia mecánica al ámbito eléctrico, paso que podemos entender si tenemos en cuenta que el altavoz es un transductor reversible, es decir actúa simultáneamente como altavoz y micrófono. Esta característica se manifiesta de la siguiente forma:

- Si aplicamos un tono producido por un generador de señal en bornes del altavoz, la corriente que pasa a través del hilo de la bobina produce una fuerza mecánica transversal oscilatoria (acompasada con las variaciones de la onda eléctrica que estamos introduciendo), que se traduce en un desplazamiento de la bobina, y a su vez de la membrana.

- Sin embargo, el propio movimiento de la bobina induce una corriente eléctrica de signo contrario a la corriente aplicada. De esta forma, la corriente inducida tiende a contrarrestar la corriente aplicada al altavoz, incrementando así la impedancia eléctrica. Este incremento representa el efecto de la impedancia mecánica sobre la parte eléctrica, y se conoce como impedancia del movimiento (Z_{mov}). Su valor viene dado por:

$$Z_{mov} = \frac{(Bl)^2}{Z_{ms}}$$

dónde Z_{ms} es la impedancia mecánica del conjunto móvil y Bl es el factor de fuerza, como ya se ha visto.
Una forma sencilla de ver este fenómeno en la práctica es hundir la membrana con la mano y medir con un multímetro la resistencia eléctrica en bornes del altavoz: ésta se incrementará rápidamente.

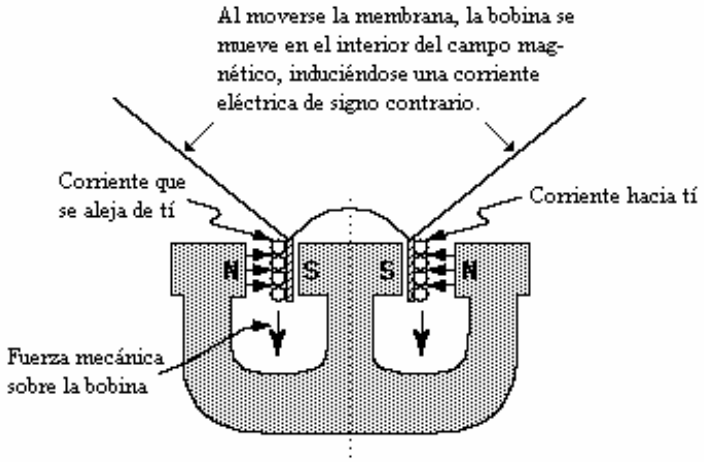


Figura 2.12. *Funcionamiento del altavoz como transductor reversible.*

Existe otro factor en la impedancia del altavoz que se añade a los mencionados conocido como R_{ed} o resistencia debida a las corrientes de Foucault. Su origen se debe al hecho de que al estar la bobina inmersa en un campo magnético se inducen una serie de corrientes eléctricas de signo contrario al de la corriente inyectada al altavoz, cuyo efecto se cuantifica como una inductancia, es decir, cómo un incremento de la impedancia del altavoz con la frecuencia. En la figura 2.13 se puede ver la combinación de resistencia eléctrica de la bobina y resistencia debida a corrientes de Foucault para el caso del 12"LX60.

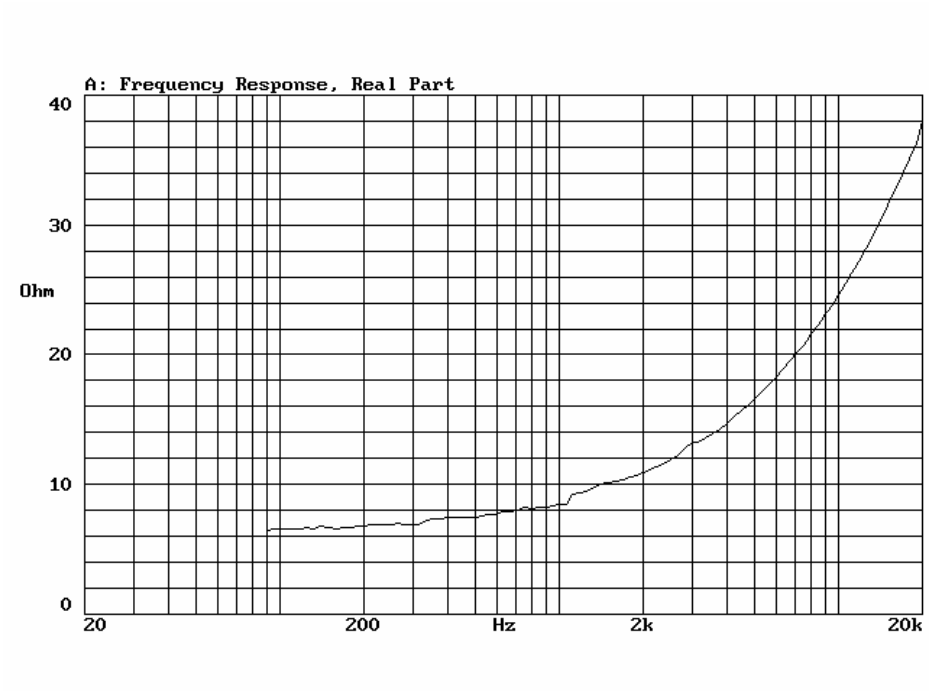


Figura 2.13. *Curva de resistencia eléctrica, Re + Red, del altavoz 12"LX60.*

Por tanto, una vez definidos todos los factores que intervienen en la impedancia del altavoz, podemos concluir que la impedancia medida en bornes del altavoz (figura 2.11) viene dada por:

$$Z_{total} = R_e + R_{ed} + Z_L + Z_{mov}$$

dónde R_e es la resistencia de la bobina, R_{ed} es la resistencia debida a corrientes de Foucault, Z_L es la impedancia debida la inductancia de la bobina y Z_{mov} es la impedancia del movimiento.

Si observamos la figura 2.11 veremos que en la curva de impedancia del altavoz aparece un pico, donde la impedancia es máxima, que corresponde a la frecuencia de resonancia. Este pico se produce debido a que en esta frecuencia tenemos un mínimo de impedancia mecánica, ya que la parte determinada por la masa y la elasticidad se anula. Este mínimo de la impedancia mecánica trae como consecuencia que el conjunto móvil

se desplace con la máxima velocidad y que obtengamos un máximo de la impedancia del movimiento, y consecuentemente, de la impedancia del altavoz.

Dada la naturaleza variable con la frecuencia de la impedancia del altavoz, la potencia aplicada también variará con la frecuencia, por lo que se hace necesario definir un criterio que nos permita hablar de un valor de potencia única aplicada, independientemente del rango de frecuencias que se aplique al altavoz. Este criterio es la impedancia nominal del altavoz, que se define como el valor mínimo de impedancia tras el pico de la frecuencia de resonancia. Existen tres impedancias nominales de uso generalizado: 4, 8 y 16 ohmios. Sin embargo, la definición es aproximada, ya que se pueden encontrar altavoces especificados como 8 ohmios cuya impedancia mínima no coincide con la impedancia nominal. Como ejemplos, podríamos citar el modelo 21”L45 con una impedancia mínima de 8.7 ohmios y el modelo 18”G550 con 7 ohmios, siendo ambos ejemplos de casos extremos, ya que dentro del margen definido por estos dos valores encontraríamos la práctica totalidad de altavoces con impedancia nominal de 8 ohmios.

Por tanto, enlazando con el inicio de la sección, dado un altavoz de impedancia nominal Z (ohmios), si le aplicamos una tensión V (voltios), estaremos aplicando una potencia W (potencia) dada por:

$$W = \frac{V^2}{Z}$$

2.3.2. Potencia admisible

Ya hemos visto como se define la potencia aplicada al altavoz en función de su impedancia nominal y de la tensión aplicada; si ésta última varía con el tiempo, como es el caso de una señal musical, la potencia variará a cada instante, tal como se aprecia en el ejemplo mostrado en la figura 2.14. Por tanto, la potencia instantánea no es un criterio válido para definir la potencia admisible por un altavoz, debido a su rápida variabilidad. De esta forma, la potencia admisible se define a partir de la potencia RMS o continua:

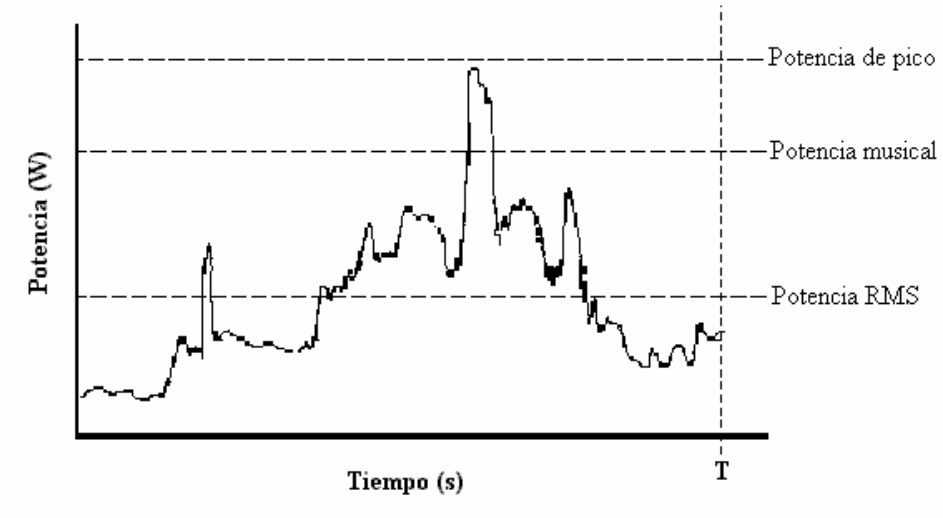


Figura 2.14. *Variación de la potencia respecto al tiempo de una señal musical.*

- **Potencia RMS o continua:** se define como la potencia admisible por el altavoz cuando se aplica una señal de tensión eficaz V durante un periodo de tiempo T lo suficientemente largo. Por tanto,

$$W_{RMS} = \frac{V_{RMS}^{2}}{Z_{\text{nominal}}} \quad \text{(para un periodo de tiempo T)}$$

Pero, ¿Qué es el valor eficaz de una señal? Éste se define, para un intervalo de tiempo T, como el valor de la altura que tendría un área rectangular equivalente al área determinada por la envolvente de la señal. Así, en la figura 2.14 podemos ver como la línea punteada inferior correspondería a la potencia eficaz o RMS: el área delimitada por esta línea y el eje de tiempo es equivalente al área formada por la envolvente de la potencia instantánea y el eje de tiempo.

El problema que aparece a la hora de caracterizar la potencia RMS de un altavoz utilizando música, es que para saber qué potencia RMS estamos aplicando hemos de conocer el valor de tensión que tiene la señal para cada instante comprendido dentro del intervalo del ensayo. Teniendo en cuenta que el intervalo de tiempo tiene que ser de un mínimo de 2 horas para que el ensayo sea válido, se hace evidente lo inadecuado de la música como señal para determinar la potencia RMS del altavoz.

Además, el contenido frecuencial de una señal musical es muy irregular, tal como vemos en la figura 2.15, y por si no fuera poco depende del tipo de música. Por ello,

tanto por sus características temporales como frecuenciales, **la música no es adecuada para caracterizar la potencia RMS del altavoz.**

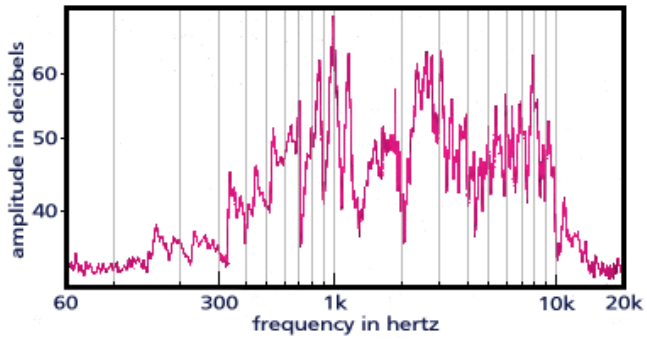


Figura 2.15. *Variación de la amplitud respecto a la frecuencia de una señal musical.*

La señal que utilicemos debe tener:

- **En el dominio del tiempo:** cierta uniformidad o periodicidad para que se pueda calcular el valor eficaz en un corto periodo de tiempo, de forma que sepamos a ciencia cierta que éste va a ser representativo para todo el intervalo de tiempo del ensayo.

- **En el dominio de la frecuencia:** una amplitud constante para cada banda de octava. Es decir, en un eje de frecuencia logarítmico ha de tener un espectro plano. De este modo, excitaremos al altavoz de forma uniforme en toda su banda pasante.

La señal que cumple estas dos características se conoce como ruido rosa, siendo su contenido frecuencial el representado en la figura 2.16. Una vez entendido el concepto de potencia eficaz y la diferencia entre la música y el ruido rosa, cabría preguntarnos: ¿Cómo se determina la potencia máxima admisible de un altavoz? En Beyma, se sigue la norma AES2-1984 (*AES Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement*) que define el proceso de prueba de altavoces de la siguiente manera:

- El altavoz se monta radiando libremente alejado de estructuras u objetos adyacentes.
- Se aplica una señal de ruido rosa filtrada correspondiente al rango de frecuencias del altavoz, con un factor de pico de 6 dB, durante dos horas.
- La potencia aplicada se calcula con la expresión $W=V^2/Z$, donde V es la tensión RMS aplicada al altavoz y Z es la impedancia nominal.
- La potencia aplicada se incrementa en intervalos constantes. La potencia máxima RMS será aquella que el altavoz pueda aguantar sin sufrir ningún cambio irreversible en sus propiedades.

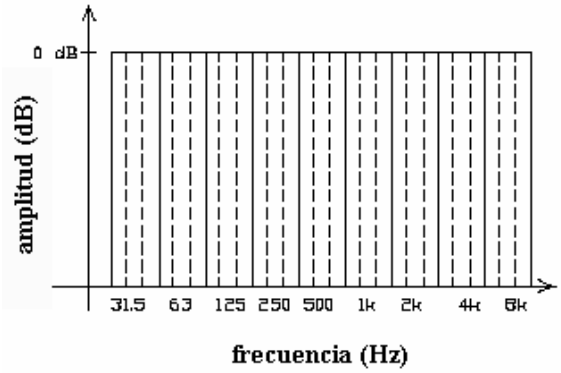


Figura 2.16. *Contenido frecuencial del ruido rosa.*

- **Potencia de programa o musical:** se trata de una convención adoptada por los fabricantes de altavoces definida a partir de la W_{RMS} como:

$$W_{musical} = 2 \times W_{RMS}$$

  El sentido que tiene es que en la práctica podemos utilizar un amplificador de potencia superior a la W_{RMS} del altavoz, ya que al aplicar señal musical, el valor de potencia RMS de ésta siempre es mucho menor al de la potencia que pueda llegar a proporcionar el amplificador. Esto se entiende fácilmente si volvemos a observar la figura 2.14: si consideramos que el amplificador es capaz de entregar una potencia equivalente a la potencia musical, aunque tengamos pasajes musicales de corta duración dónde se entregue dicha potencia, el resto del tiempo el nivel será mucho menor, y por tanto, también lo será la potencia RMS entregada.

  Este criterio, en lugar de facilitar las cosas sólo ha logrado causar confusión y por tanto, vale la pena dejarlo un poco de lado y pensar siempre en términos de potencia RMS.

- **Potencia de pico:** se define como la potencia máxima admisible aplicada en un corto período de tiempo. En la figura 2.14, correspondería a la línea punteada superior. También se define un parámetro relacionado con la potencia de pico conocido como factor de pico, que consiste en la relación entre la potencia máxima y la potencia media. Como ejemplo, la música clásica suele tener un factor de pico en torno a los 25 dB, mientras que para música rock el factor de pico ronda los 9 dB.

Por último, es conveniente hacer un breve análisis de los factores que determinan la potencia que puede soportar un determinado altavoz. En la mayor parte de los casos, lo que determina el final de la vida útil del altavoz es que se ha sobrepasado uno de estos dos límites: el límite mecánico o el límite térmico de la bobina. El límite mecánico viene dado por dos indicadores:

- **Xmax**: se trata del límite mecánico recomendado para un funcionamiento **óptimo** del altavoz (asegurando que los niveles de distorsión se mantienen dentro de límites aceptables). Se define como el **máximo desplazamiento de pico** que puede tener la bobina sin que se salga del rango de funcionamiento lineal. Este parámetro se obtiene de la siguiente forma:

$$X_{\max} = \frac{A - H}{2}$$

dónde A es el ancho de bobinado y H es la altura de la anilla de campo. El X_{max} limita la potencia admisible del altavoz en frecuencias bajas, que es donde se produce el mayor desplazamiento de la bobina. Así en la figura 2.17 vemos como en el caso del 12"LX60 el X_{max} limita la potencia admisible por debajo de la nominal (600 W) por debajo de 50 Hz (curva naranja), siendo la disminución de la potencia progresiva con la frecuencia, ya que el desplazamiento aumenta de la misma manera. Si aumentamos el X_{max} de los 9 mm del altavoz de serie a 18 mm (curva amarilla), el límite frecuencial de potencia debido al X_{max} baja hasta casi los 40 Hz, donde la potencia admisible empieza a decrecer de idéntica forma al ejemplo anterior.

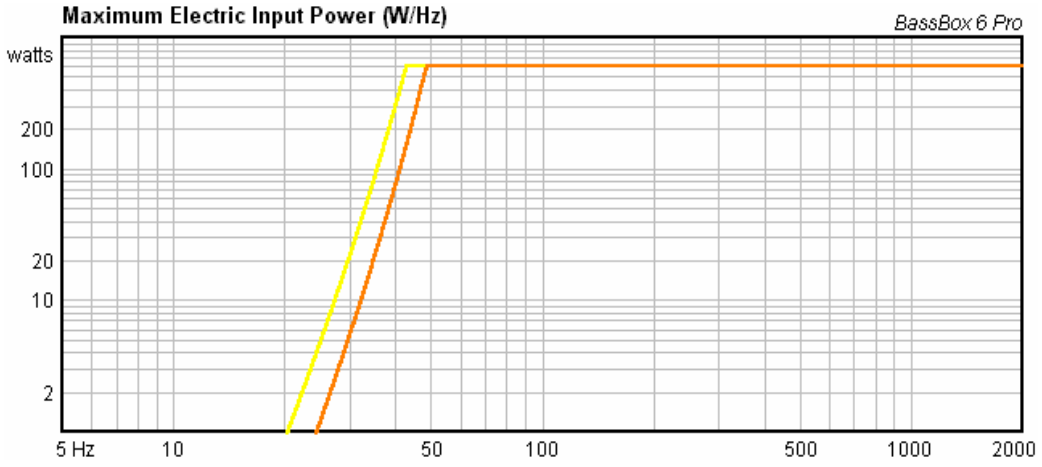


Figura 2.17. *Efecto del incremento del Xmax sobre la potencia admisible en frecuencias bajas en el modelo 12"LX60: curva naranja – 12"LX60 de serie, Xmax 9 mm; curva amarilla – 12"LX60 con Xmax 18 mm.*

- **Xdamage:** este indicador representa el **máximo desplazamiento pico a pico** que puede llegar a tener la bobina sin llegar a **destruirse;** ya sea por golpeo de la bobina contra el núcleo del conjunto mecánico y/o que la bobina llegue a salirse por completo del entrehierro por arriba. Por ejemplo, en el caso del 12"K200, éste tiene un Xmáx de 4.5 mm (desplazamiento de pico), mientras que el Xdamage alcanza los 32 mm (de pico a pico).

Sin embargo, la principal limitación a la que hacemos frente en la realidad es la máxima temperatura que puede llegar a alcanzar la bobina sin que sufra ninguna alteración que

le impida seguir moviéndose de forma controlada. Este valor de temperatura máxima viene dada por el comportamiento que presenten los materiales que componen la bobina frente a la temperatura. Así, a partir del límite térmico en el que no se garantizan las propiedades del hilo de la bobina y del soporte donde se adhiere, así como de los diversos adhesivos que se utilizan, el altavoz deja de funcionar en un periodo de tiempo breve. Para entender todos los factores que influyen en la obtención de una temperatura determinada, y por tanto, en la potencia máxima del altavoz, es conveniente distinguir dos casos:

- **Caso estático:** consideremos una bobina que no está montada en altavoz alguno cuya temperatura inicial corresponde a la temperatura ambiente. Si se le aplica una señal eléctrica, se provocará un incremento de su temperatura respecto a la temperatura ambiente proporcional a la potencia de la señal aplicada. El incremento de la temperatura será mayor o menor en función de la superficie total de hilo conductor. Así, a mayor superficie, mayor disipación y por tanto, menor incremento de temperatura. En la figura 2.18 podemos ver un ejemplo claro de la influencia de la superficie de bobinado sobre la temperatura alcanzada; se muestran los resultados de tres ensayos estáticos de las bobinas de los modelos 18”G550, 15”G400 y 10”B300, cuyas características son:

  - **18”G550:** diámetro de bobina 114 mm, ancho de bobinado 25 mm.
  - **15”G400:** diámetro de bobina 100 mm, ancho de bobinado 22 mm.
  - **10”B300:** diámetro de bobina 77 mm, ancho de bobinado 21mm.

  En la figura queda claro como a mayor superficie de bobinado, mayor es la temperatura alcanzada.

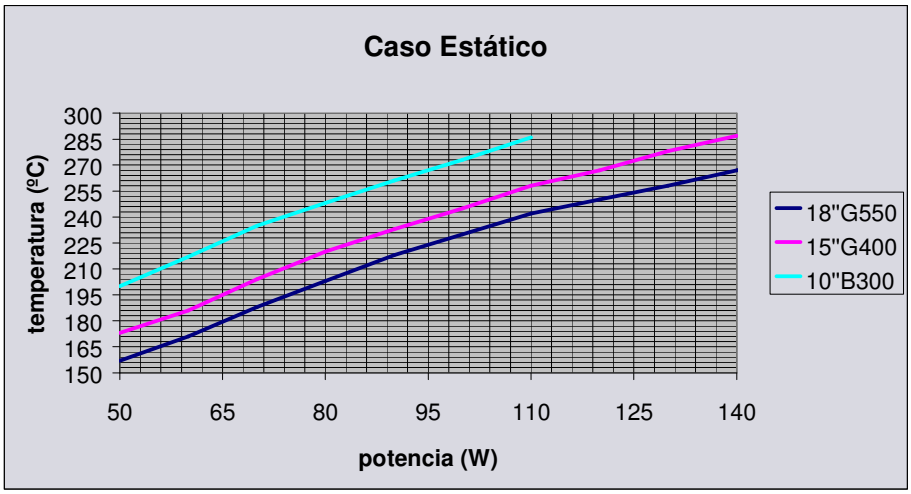


Figura 2.18. *Incremento de la temperatura de la bobina con la potencia aplicada para tres bobinas de tres modelos distintos.*

- **Caso dinámico:** cuando se monta la bobina en el altavoz y se somete a éste a la prueba de potencia admisible, entran en juego factores adicionales a los del caso estático que modifican por completo la temperatura alcanzada por la bobina. En primer lugar, la bobina está en movimiento, por lo que parte del calor que alcanza la bobina se disipa en el desplazamiento en forma de aire caliente que se expulsa por las salidas previstas para ello en el conjunto mecánico. Además, otra parte del calor se disipa a través de las superficies de la anilla de campo y del núcleo que están próximas a la bobina, que a su vez, transmiten el calor al conjunto de las piezas polares, al imán y a la carcasa. Éstos a su vez, disipan el calor al ambiente, de forma que todo este proceso de disipación trae como consecuencia que la bobina alcance una temperatura mucho menor que en el caso estático. Así, en la figura 2.19, dónde tenemos el incremento de la temperatura con la potencia aplicada en el caso del altavoz modelo 15”G400, se observa como en el caso dinámico se alcanza la misma temperatura a 400 W que la que se alcanzaba en el caso estático para 65 W. Por tanto, el diseño del conjunto mecánico es vital para reducir la temperatura alcanzada por la bobina, y así conseguir que el altavoz aguante una potencia mayor.

  En la figura 2.20 podemos ver la sección del altavoz 21”L45, que nos permite observar en detalle los mecanismos de disipación del conjunto mecánico. Por un lado, la bobina disipa calor en el entrehierro, como ya se ha visto y por otro, la cavidad de aire que queda debajo de la tapita actúa como una bomba expulsando el aire caliente por la cavidad central que tiene el núcleo, reduciendo la temperatura que alcanza la bobina.

  Uno de los fenómenos más importantes relacionados con la disipación de calor es la compresión de potencia, fenómeno que se produce por el hecho de que el calentamiento de la bobina produce un incremento de su resistencia eléctrica, y por tanto, una disminución de la potencia aplicada al altavoz y del nivel de presión sonora que entrega éste. De esta manera, la compresión de potencia se define como:

$$PC = SPL_{teórico} - SPL_{real}$$

  es decir, cómo la diferencia entre el nivel de presión que se obtendría si no se produjese el incremento de la resistencia con la temperatura y el que se obtiene realmente como consecuencia de dicho incremento. En la figura 2.21 podemos ver las pérdidas por compresión de potencia en el caso del altavoz 15”G400; se observa como a la potencia máxima (400 W) las pérdidas por compresión alcanzan los 4 dB, lo que significa que la respuesta en frecuencia del altavoz estará 4 dB más baja que en la medida de catálogo, realizada aplicando 1 W. Por tanto, queda patente la importancia del diseño del altavoz en cuanto a disipación de calor, ya no sólo por aumentar la potencia máxima admisible, sino por disminuir la pérdida de sensibilidad debida a la compresión de potencia.

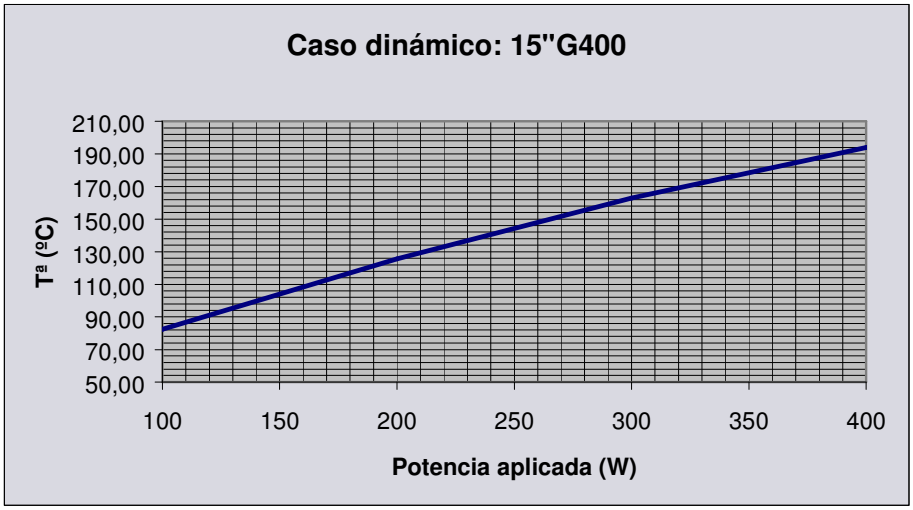


Figura 2.19. *Incremento de la temperatura de la bobina respecto a la potencia aplicada en el caso del altavoz 15"G400.*

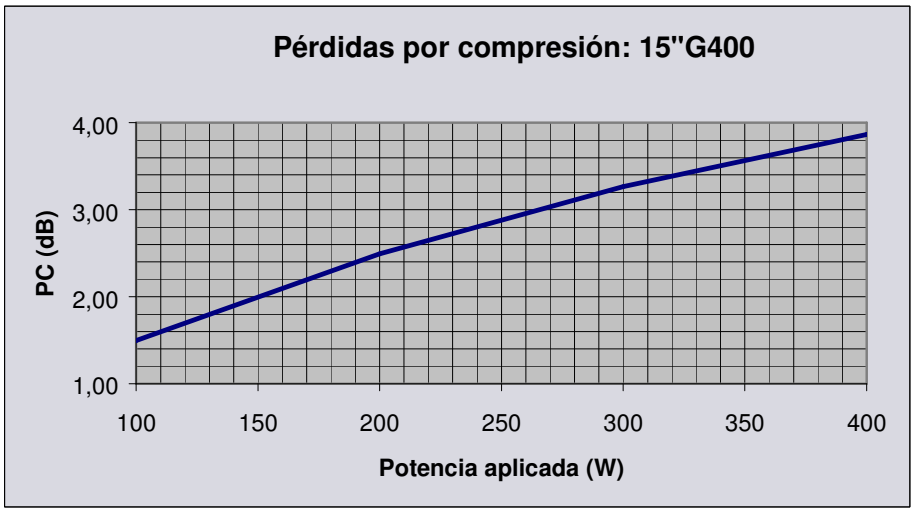


Figura 2.21. *Pérdidas por compresión de potencia en función de la potencia aplicada en el caso del altavoz 15"G400.*

Como reflexión final en torno a la potencia admisible sería conveniente explicar porque existe una diferencia tan grande entre la potencia admisible de un altavoz de graves y la de un altavoz de agudos (tweeter o motor de compresión). Por ejemplo, en el caso de un altavoz de graves como el 15"G400 su potencia máxima es 400 W, mientras que en el caso de un tweeter como el T-2030, su potencia es de 15 W. Esta diferencia se fundamenta en tres factores inherentes al rango frecuencial al que está destinado cada uno: la distribución frecuencial de energía de la música, el tamaño de la membrana y el desplazamiento exigido a la membrana.

a) Distribución frecuencial de energía de la música

Una de las características comunes a toda la música es que existe mucha más energía en frecuencias graves y medias que en frecuencias altas, es decir, la mayor parte de la información se encuentra en la parte baja del espectro (ver figura 2.15). Por tanto, el altavoz destinado a reproducir este rango frecuencial debe admitir mucha más potencia que un altavoz diseñado para reproducir las frecuencias altas. Además, en el caso de tweeters y motores de compresión, en que la sensibilidad suele ser mucho mayor que en el caso del altavoz de graves, se precisa atenuar la señal destinada al altavoz de agudos, con lo cual la proporción de potencia eléctrica que le llega es mucho menor todavía.

b) Tamaño de la membrana

Es un hecho conocido que la membrana de un altavoz de graves es mucho mayor que la de un tweeter. El hecho de que la bobina tenga que mover una membrana de gran superficie condiciona que el diámetro de la bobina sea grande. De este modo, la superficie de bobinado también es grande, y, como hemos visto la potencia eléctrica que admite la bobina es mayor. El hecho de que la membrana de graves tenga que ser mucho mayor que la membrana de agudos se debe a tres factores:

- **Vibración de la membrana:** la membrana vibra como una unidad hasta cierta frecuencia, a partir de la cual las diferentes zonas de su superficie vibran de forma independiente, interfiriéndose entre sí. Esta frecuencia límite está relacionada con el tamaño de la membrana a través de la longitud de onda: cuando la longitud de onda empieza a ser menor que el diámetro de la membrana, la membrana deja de vibrar como un todo. Recordemos que la longitud de onda es grande para frecuencias bajas (para 20 Hz, 17.3 m) y pequeña para frecuencias altas (para 20 kHz, 17.3 mm). Por tanto, a mayor superficie de la membrana, más baja será esta frecuencia límite. Por ello, en un tweeter la superficie es mucho menor que en el caso de un altavoz de graves, ya que está destinado a reproducir frecuencias altas.

- **Acoplamiento de la membrana con el aire:** cuando la membrana vibra provoca variaciones de presión en el medio circundante. El grado de transferencia de la vibración de la membrana al aire es proporcional al diámetro de la membrana y a la frecuencia. Es decir, a frecuencias bajas (grandes longitudes de onda) el acoplamiento será peor que a frecuencias altas (longitudes de onda pequeñas), y las membranas de gran superficie se adaptarán mejor que las de superficie pequeña. Por tanto, en el caso del altavoz de graves, donde la adaptación empeora a causa del rango de frecuencias a reproducir, se debe mejorar el acoplamiento incrementando la superficie del diafragma. En el caso de un tweeter, como la adaptación mejora a causa de las frecuencias a reproducir, se puede utilizar una membrana más pequeña.

- **Directividad:** cuando la longitud de onda es grande respecto al diámetro de la membrana, el altavoz radia aproximadamente de forma omnidireccional. Es decir, radia en todas direcciones por igual. Cuando la longitud de onda es menor que el diámetro de la membrana, el altavoz empieza a hacerse directivo. Es decir, radia con un haz cada vez más estrecho. En el caso de un altavoz de graves, nos interesa que

el altavoz radie sobre una zona lo suficientemente ancha, por lo que el tamaño de la membrana ha de ser considerable, de forma que empiece a hacerse directivo por encima de la frecuencia máxima del rango de trabajo. En el caso del tweeter, al trabajar en frecuencias altas, lógicamente el diámetro de la membrana ha de ser menor. Este aspecto se tratará en profundidad en la secciones 4 y 5, dedicadas exclusivamente al tweeter y al motor de compresión, respectivamente.

c) Desplazamiento de la membrana

Dado que en frecuencias graves se exigen grandes desplazamientos de la membrana, necesitamos que la bobina tenga un ancho de bobinado lo suficientemente grande para poder conseguir estos desplazamientos, como ya se ha visto en esta misma sección cuando se ha tratado el límite mecánico de la potencia del altavoz. Al utilizar un ancho de bobinado grande, aumenta la superficie de bobinado, y por tanto, la potencia admisible.

2.3.3 *Respuesta en frecuencia*

La respuesta en frecuencia define la banda útil de trabajo o utilización de cualquier transductor, no sólo de un altavoz. Este concepto también es aplicable a cualquier sistema que al ser excitado produce una respuesta. La magnitud de esta respuesta puede ser eléctrica (p. ej., un amplificador), acústica (caso del altavoz) o de otra naturaleza (mecánica, p. ej.).
Centrándonos en el caso del altavoz, dependiendo de la aplicación para la que se haya diseñado, no toda la respuesta en frecuencia puede ser banda útil de trabajo por razones diversas y que detallaremos más adelante.

La respuesta en frecuencia de un altavoz es una medida de cómo reproduce el altavoz un cierto margen de frecuencias o *ancho de banda (en inglés, se denomina BandWidth (B.W.))*. Para ello, introducimos una señal de igual amplitud en las frecuencias de interés y medimos con un micrófono la salida del altavoz. Un altavoz ideal tendría una respuesta como la de la figura 2.22:

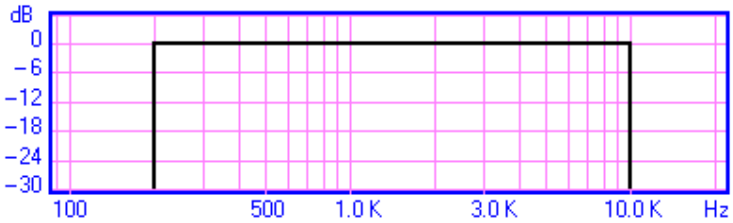


Figura 2.22. *Respuesta ideal*

Esto es, tendríamos que la respuesta del altavoz es la misma para todas las frecuencias que es capaz de reproducir. Esto no ocurre en el mundo real, sino que siempre tenemos variaciones en la respuesta, y unas pendientes de caída en frecuencias graves y agudas debido a las limitaciones físicas de los componentes y el principio de funcionamiento de un altavoz electrodinámico. A todo esto, se suma el hecho de que en la banda

pasante la respuesta tampoco es totalmente plana, debido a los materiales que se emplean y como están unidos entre sí.
En cuanto a tweeters y motores de compresión, la definición de ancho de banda se vuelve una cuestión más ambigua, ya que queda supeditado al tipo y tamaño de bocina que se les puede acoplar, además de la atenuación que se les suele aplicar. Así, un motor al que se le acopla una bocina con un tamaño de boca importante tendrá una frecuencia de corte inferior más baja que este mismo motor con una bocina de tamaño menor (p. ej. El caso de un motor CP800 con una bocina TD720 o una TD360). Así mismo, un tweeter determinado lo podremos utilizar desde una frecuencia de trabajo más baja cuanto más atenuado esté, sin temor a dañarlo. Por ejemplo, el AST 09 desde 3500 Hz con una atenuación de 3dB o desde 5000 Hz sin atenuación.

Es por ello, que existen altavoces diseñados para cubrir un cierto margen de frecuencias del espectro audible, en lugar de tener un único altavoz que reproduzca todo el espectro sonoro, cosa que es muy difícil de conseguir, por no decir imposible. De una forma genérica, podríamos dividir el sonido en tres rangos de frecuencia:

a) ***Frecuencias graves:*** *De 20 a 1000 Hz*
b) ***Frecuencias medias:*** *De 1000 a 5000 Hz*
c) ***Frecuencias agudas:*** *De 5000 a 20000 Hz*

Los márgenes exactos son variables y dependen del interés de quien los define, pero serán muy parecidos a estos que acabamos de definir. Existe una extensa y variada gama de modelos de altavoces que intentan cubrir desde un único rango de frecuencias de los tres mencionados hasta los que intentan cubrir los tres.
Por ejemplo, a continuación mostramos la respuesta genérica de un altavoz de medios (figura 2.23):

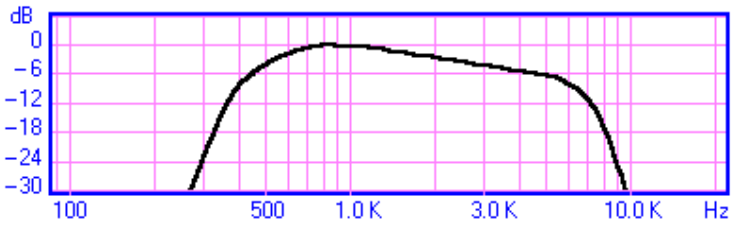


Figura 2.23. *Respuesta genérica altavoz de medios*

Según las normas DIN, la respuesta de altavoz está limitada en su zona baja a la frecuencia de resonancia y en la superior, a la frecuencia donde la caída respecto a la presión media es de –10dB. Si el altavoz fuese de graves y estuviese en una caja, sería más exacto definir su frecuencia de corte por abajo como aquella a la cual la respuesta cae 3 dB respecto a la media. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta norma no tiene en cuenta cómo radia el altavoz fuera de su eje principal, es decir, *su dispersión*. Un altavoz de gran diámetro de membrana puede seguir radiando en el eje hasta frecuencias medias, pero radiar muy poco fuera de éste, llevándonos a una evaluación errónea del comportamiento real del altavoz. En el siguiente punto se verá esto más claramente al relacionar la dispersión con la sensibilidad. Como pequeño ejemplo, si nos fijamos por ejemplo en el 18LX60, vemos que en catálogo se le asigna un

"frequency range" desde 25 a 1000 Hz. Pero si observamos la respuesta en frecuencia y aplicamos la norma DIN, el ancho de banda sería hasta los 3 kHz. Pero esto sería erróneo, debido a la poca dispersión que tiene este altavoz en esas frecuencias. Si hiciésemos una caja con este 18" y un tweeter desde los 3000 Hz, se apreciaría una falta de potencia sonora en medias frecuencias.
Volviendo a la gráfica 2.23, podemos ver que el ancho de banda de este altavoz ideal estaría entre 400 y 7000 Hz aproximadamente. En un caso real, nuestro 6B30/P tiene un ancho de banda de 50 a 12000 Hz, que es la zona de frecuencias en la que la respuesta del altavoz no cae más de 10 dB respecto al nivel de presión medio en la región de máxima sensibilidad. En la figura 2.23, distinguimos tres zonas diferentes en la respuesta del altavoz 6B30/P, generalizable a todos los tipos de altavoz electrodinámico:

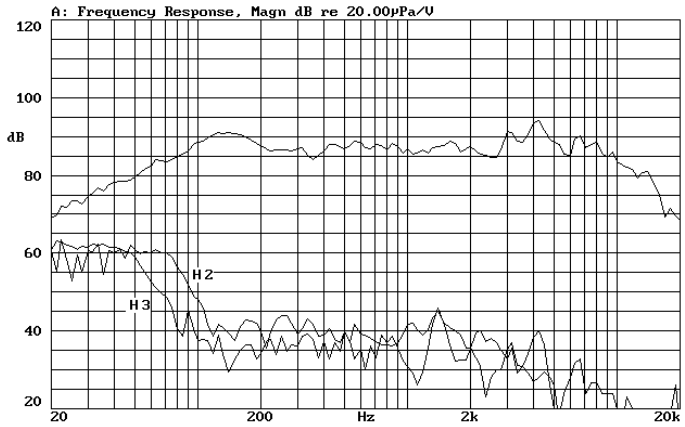


Figura 2.23. *Respuesta altavoz 6B30/P*

- Una primera zona dominada por la Elasticidad, es decir, la elasticidad de suspensión y centrador, que impiden que el cono se desplace sin límite y que provoca que el altavoz reproduzca con menor amplitud las frecuencias más graves.
- Una zona intermedia más o menos plana, denominada *banda pasante* e indicada como el rango de frecuencias para el que el altavoz es más adecuado. Esta zona está dominada por la masa móvil.
- Y una tercera zona de caída, en la cual el altavoz ya no es capaz de mover el cono a la velocidad suficiente como para reproducir las frecuencias cada vez más altas con una amplitud constante, por lo que la respuesta empieza a caer.

Estas tres zonas son comunes a todos los altavoces electrodinámicos, e inherentes a su propio principio de funcionamiento.

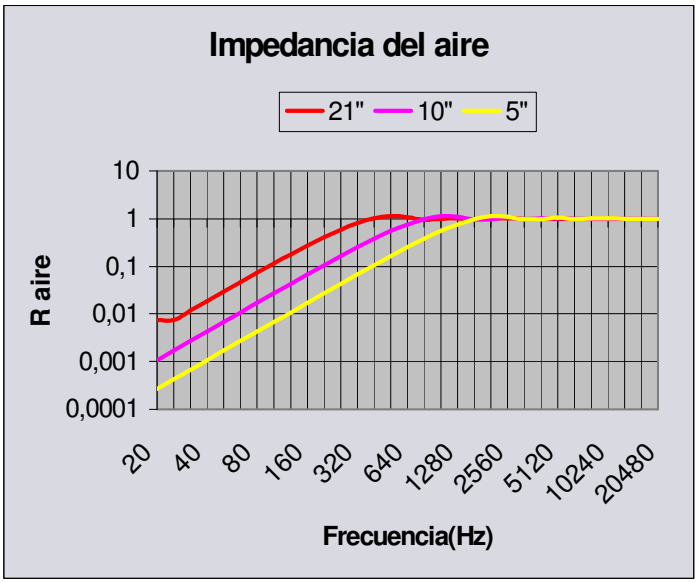


Figura 2.24. *Impedancia del aire en función del diámetro de la membrana*

En la figura 2.24 podemos observar un hecho muy curioso que explica por qué necesitamos altavoces de gran superficie de radiación. En esta figura tenemos representada la impedancia que ofrece el aire a la membrana del altavoz en función de su diámetro. En ella podemos observar claramente cómo el aire ofrece mayor impedancia a mayor diámetro. Esto hace que el altavoz empiece a ser más eficiente radiando a partir de una frecuencia más baja (recordemos el ejemplo de golpear un papel o una pared). Por eso interesa construir altavoces de gran superficie.

2.3.4. Diferencia entre Sensibilidad y Rendimiento

Existe una cierta confusión entre sensibilidad y rendimiento, por ser medidas muy similares. Vamos a intentar distinguir estos dos parámetros entre sí. *La sensibilidad* es un parámetro pensado desde el punto de vista del receptor. *Indica el valor medio de presión sonora en el rango de frecuencias del altavoz a una determinada distancia (1m) con una potencia eléctrica fija (1W*). El *rendimiento* es un parámetro pensado para caracterizar la eficacia de la fuente como transductor. Nos dice la *relación que existe entre vatios eléctricos entregados a la fuente y vatios acústicos producidos por esta.* Ambas magnitudes están muy relacionadas. En general, un altavoz con sensibilidad mayor que la de otro también tendrá un mayor rendimiento. Por tanto, podemos decir que la sensibilidad depende del rendimiento, pero también de las características de dispersión del altavoz. La dispersión es un dato importante en el sentido de que la sensibilidad se mide en el eje, es decir, enfrente del altavoz. Pero no nos dice cómo radia en el resto de direcciones. Por tanto, si nos fijamos solamente en la sensibilidad como dato de referencia para comparar un altavoz con otro, podemos estar haciendo una valoración errónea. Por otro lado, la mayor parte de pruebas de escucha se suelen

hacer en el eje de los altavoces, por lo que la sensibilidad se puede convertir en el factor más influyente a la hora de decidirse entre varios altavoces. Es significativo que un modelo de gran tamaño (un 15") diseñado para reproducir bajas frecuencias, pueda proporcionar una respuesta en medios mucho más alta que uno de tamaño inferior (como un 8") en el eje, cuando fuera del mismo la caída será notablemente mayor para el 15" que para el 8". Y no es menos cierto que a pesar de esto, muchas aplicaciones y fabricantes recurren antes al 15" que al 8", en casos en los que se supone que deberían decantarse por el 8". Igualmente, un altavoz de menor eficiencia que otro puede presentar un nivel de presión sonora más alto, incluso fuera del eje, que otro con una eficiencia mayor. Este caso lo tenemos si comparamos un altavoz cuya respuesta en frecuencia se limita a la zona de baja frecuencia, como sería p. ej. El 15B100, y otro de amplia gama como el 10AG, que tiene un rendimiento muy inferior al 15B100, pero una respuesta en frecuencia mucho más amplia.
Son diferentes puntos de vista del mismo concepto: la calidad del altavoz como transductor.

Siguiendo con el 6B30/P como ejemplo, vemos que su sensibilidad es de *"90 dB 2.83V @ 1m @ 2∏"*. Estos valores quieren decir que este altavoz, cuando le entregamos 1W de potencia eléctrica (2.83 $V_{r.m.s.}$ sobre 8 Ω), radiando montado en un bafle infinito (2∏), nos entrega una presión sonora media de 90 dB en su banda pasante a un metro de distancia en una cámara anecoica. Por tanto, la sensibilidad es la presión sonora que obtenemos del altavoz con 1W de potencia eléctrica en las condiciones descritas. Siempre hay que ajustar la potencia con la impedancia nominal del altavoz, para no dar una sensibilidad errónea. Sabiendo que $W = V^2 / Z$, podemos ajustar la tensión al valor adecuado. Si nos fijamos una vez más en la respuesta en frecuencia (figura 2.23), se observa que la media de presión sonora en la banda pasante está alrededor de los 90 dB. Por ello la sensibilidad nos da una idea aproximada de la presión que obtendremos con el altavoz. Por otro lado, vemos que el rendimiento es del 0'4%. Ya hemos dicho que el rendimiento es la relación existente entre vatios eléctricos entregados y vatios acústicos producidos. En el caso de un altavoz electrodinámico, se puede relacionar este parámetro con las características físicas del mismo que lo determinan mediante la siguiente sencilla ecuación:

$$\eta = \frac{P_{ACÚSTICA}}{P_{ELÉCTRICA}} = \mathrm{K} \cdot \frac{(S_D \cdot B \cdot l)^2}{M_{MS} \cdot R_E}$$

donde

$K = 5.44 \cdot 10^{-2}$
S_D = superficie de la membrana del altavoz (m^2)
B = Densidad de flujo magnético en el entrehierro (Tesla)
l = longitud de la bobina en metros (m)
M_{MS} = Masa móvil del altavoz, incluida la carga de aire (Kg)

Es fácil deducir observando la fórmula que cuanto mayor sea la masa del cono y la resistencia eléctrica de la bobina, menor será el rendimiento. Así mismo, cuanto mayor

sea la superficie de la membrana, más potente sea el imán y mayor sea la longitud de la bobina, mayor será el rendimiento obtenido con el altavoz.
Los rendimientos típicos en altavoces electrodinámicos van desde el 0'5% al 4%.
Este rendimiento es denominado *de referencia*, ya que está referido a la zona de frecuencias en la que la membrana vibra como una unidad radiante, denominada *zona de pistón.* Esta zona viene limitada por el diámetro de la membrana. Como ya veremos más adelante, a partir de la frecuencia cuya longitud de onda coincide con dicho diámetro, el altavoz deja de radiar como una unidad, y el rendimiento varía con la frecuencia, dejando de ser un valor representativo del altavoz como unidad.
Resumiendo, la sensibilidad nos dice qué nivel de presión sonora obtenemos del altavoz a 1W @ 1m en el eje, y el rendimiento nos dice qué proporción de los vatios eléctricos que le aplicamos se convierten en vatios acústicos.

2.3.5 Distorsión

En el sentido más general existe distorsión cuando la señal que sale de un dispositivo (por ejemplo, un altavoz) no es la misma que la que entró. La distorsión es otra medida de calidad de uso generalizado y suele ser dada por el fabricante. Hay diferentes tipos de distorsión: de amplitud, de fase y distorsión armónica total (THD).

1.- **Distorsión de amplitud**. Se da cuando la señal a la salida del altavoz no guarda la misma relación de amplitud entre las distintas frecuencias que la señal de entrada. Por ejemplo, a la entrada la señal tiene 10 dB de diferencia entre la banda de octava de 1000 Hz y la de 2000 Hz, pero a la salida la diferencia es de 20 dB; se ha producido distorsión de amplitud. Por tanto, podríamos decir que la respuesta en frecuencia del altavoz es una representación de la distorsión de amplitud. Un amplificador, por el hecho de elevar el nivel de la señal, no produce distorsión de amplitud, ya que eleva el nivel de todas las bandas de frecuencia en un número de decibelios para todas igual.

2.- **Distorsión de fase**. Se da cuando a la salida no se conserva la relación de fase entre las diferentes frecuencias de entrada. Este tipo de distorsión se da en todos los altavoces y es muy difícil eliminarla.

3.- Distorsión armónica total THD o **total harmonic distorsion**. Esta distorsión se produce por la aparición de armónicos de la señal original. Un armónico es una señal de frecuencia múltiplo de otra original. Si a la entrada tenemos un tono puro de frecuencia 1 KHz, sus armónicos aparecerán como tonos puros de frecuencia 2 KHz, 3 KHz, 4KHz... Cuando hay distorsión armónica, los armónicos simplemente aparecen pese a no ser deseados. La distorsión armónica o THD se mide en porcentaje. El porcentaje representa la parte del total de la energía a la salida, que pertenece a los armónicos.

A continuación se muestra una representación del espectro de salida de un aparato con distorsión armónica (figura 2.25). A la entrada del aparato sólo se le conecta un tono puro de f = 1 KHz. Así es como se suele medir la THD.

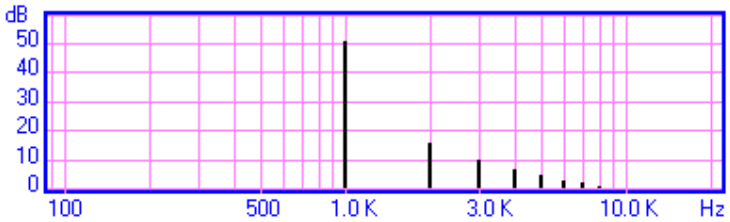


Figura 2.25. *Distorsión Armónica Total (THD)*

Algo parecido es lo que se vería en un analizador de espectro. Una vez se obtiene esta gráfica, se mide la energía de todos los armónicos (en dB), se compara con el tono puro original y se calcula el porcentaje que representa del total. Cuanto mayor nivel tiene los armónicos, mayor es la distorsión armónica y peor sonará el altavoz. Si intentamos representar la distorsión armónica para todas las frecuencias de la respuesta de un altavoz de la misma forma que en la figura 2.25, o tendríamos que hacer un montón de gráficos para cada frecuencia de interés, o se haría un gráfico muy confuso y engorroso. Es mucho más cómodo representar el nivel de cada armónico de interés para cada frecuencia como una línea continua por debajo de la curva de presión sonora emitida por el altavoz, tal y como aparece en nuestro catálogo.
Si volvemos a la respuesta del 6B30/P (figura 2.23), vemos dos curvas, denominadas H2 y H3, correspondientes al nivel de amplitud del segundo y tercer armónico. Estos armónicos son, como su propio nombre indica*, el segundo y tercer múltiplo de la frecuencia fundamental*. Se incluyen estos dos armónicos porque suelen ser los que el altavoz reproduce con mayor amplitud y nos dan una idea de lo "limpio" que suena el altavoz.
De esta forma, podemos observar el nivel de ambos armónicos para cada frecuencia. Por ejemplo, si nos fijamos en los 100 Hz, la curva H2 nos indica el nivel de presencia del segundo armónico (200 Hz) y la curva H3 el nivel del tercer armónico (300Hz) que el altavoz reproduce al introducir un tono puro de 100 Hz. En los 200 Hz de la curva de respuesta, H2 sería el nivel de los 400 Hz y H3 el de los 600 Hz, etc.

2.3.6 *Respuesta Temporal*

Como ya vimos en el punto 1.1, la frecuencia es la inversa del tiempo ($f=1/t$). Existe un proceso matemático denominado *Transformada de Fourier*, que nos permite pasar de la respuesta en frecuencia a la respuesta temporal y viceversa. Ambas respuestas nos proporcionan información diferente sobre el altavoz. La respuesta frecuencial nos dice cómo responde el altavoz para cada frecuencia de una forma estática o estacionaria: le aplicamos un tono y vemos qué respuesta obtenemos a su salida en cuanto a nivel, distorsión, etc. La respuesta temporal nos informa de las características *transitorias* del altavoz: cómo y en cuánto tiempo reacciona el altavoz cuando aplicamos una señal en sus bornes En la figura 2.26 podemos observar esta dualidad *tiempo-frecuencia (recordemos también las figuras 1.9.a y b).* El equivalente en el tiempo a una respuesta en frecuencia plana ideal debería ser un pulso muy estrecho, de ancho temporal

idealmente nulo. Esto querría decir que el altavoz reaccionaría a una señal a su entrada al instante (figura 2.27). Si seguimos con el ejemplo del altavoz ideal, una respuesta transitoria tendría una duración, para el ancho de banda de sonido, de:

$$\Delta T = \frac{1}{AnchodeBanda} = \frac{1}{20000 - 20} = 50 \mu segundos$$

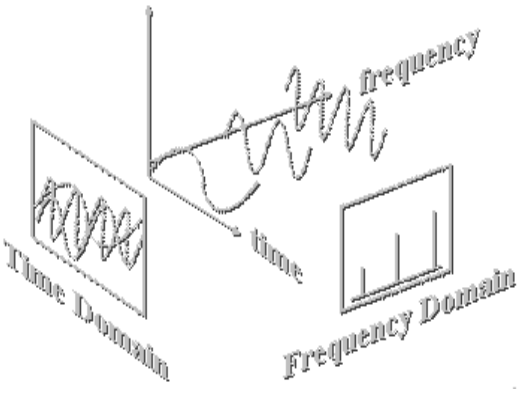


Figura 2.26. *Dualidad Tiempo-Frecuencia*

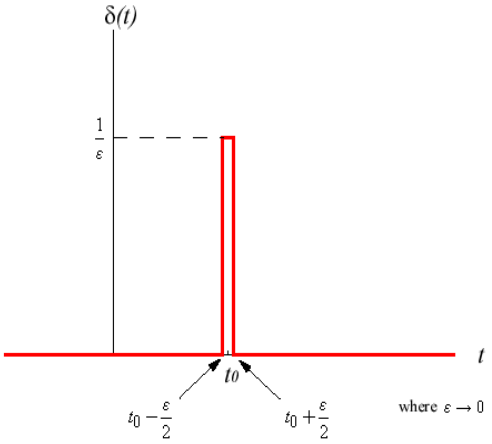
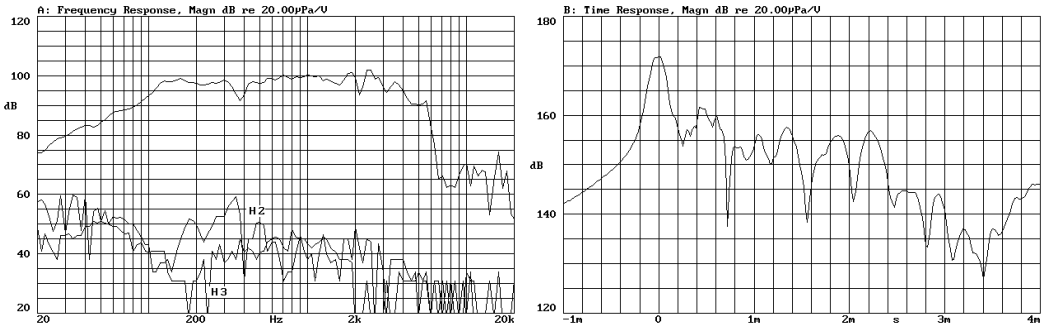


Figura 2.27. *Impulso Ideal*

Evidentemente, no existe un altavoz que responda tan rápido a una señal. Si tomamos como ejemplo la realidad, podemos observar alguna respuesta temporales de catálogo y compararla con el ancho de banda del altavoz (figuras 2.28 y 2.29):

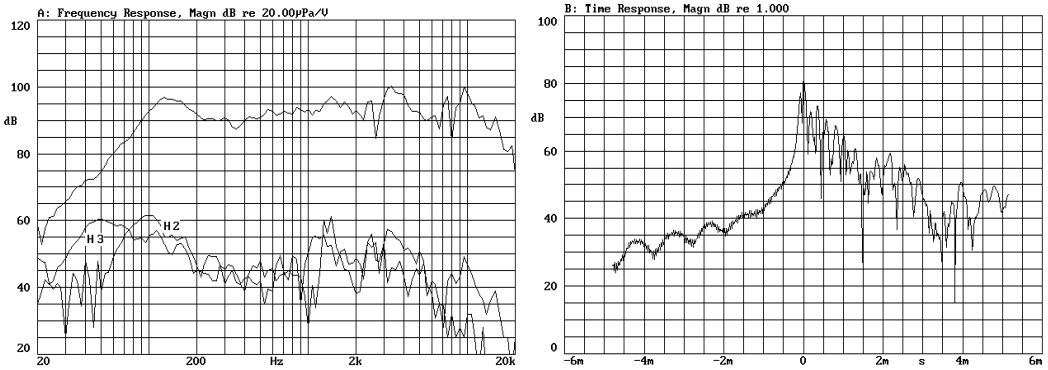


Figuras 2.28 y 2.29. *Respuesta frecuencial y temporal del 12M300*

Este altavoz tiene un ancho de banda de 30-5000 Hz. Si observamos su respuesta temporal, el primer pico vemos que dura desde 0 ms. a 0.2 ms. Efectivamente,

$$\Delta T = \frac{1}{AnchodeBanda} = \frac{1}{5000 - 30} = 0.2 mseg.$$

Cuanto más nos alejemos del caso ideal, es decir, la respuesta del altavoz es menos lineal en frecuencia y tiene mayor distorsión, la respuesta impulsional tiene muchos más picos y la diferencia entre el primer pico de la respuesta temporal y el segundo es menor. Por ejemplo, como en las figuras 2.30 y 2.31 donde podemos observar la respuesta temporal y frecuencial del 8AG/1N. Se ve claramente que la respuesta en frecuencia (fig. 2.30) es mucho más irregular que la del 12M300, correspondiéndose con una respuesta temporal con muchos picos.



Figuras 2.30 y 2.31. *Respuesta frecuencial y temporal de un 8" de baja calidad*

2.3.7 *Respuesta de fase*

La fase de una señal, definida de una forma genérica, nos indica el instante en el que comienza la señal dentro del ciclo de dicha señal. La fase varía de 0 a 360 grados (fig 2.32).

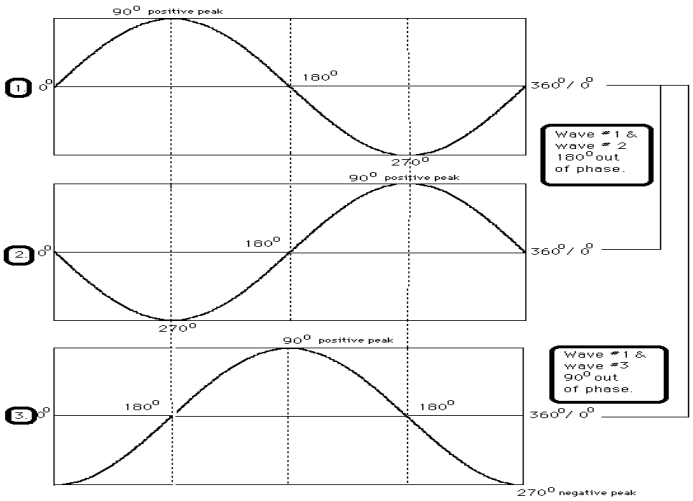


Figura 2.32. *Diferentes fases de señales*

Si tenemos dos señales *de igual frecuencia y amplitud*, diremos que están en fase si coinciden sus ciclos positivos y negativos. Cuando esto ocurre, la combinación de ambas señales doblaría la amplitud total. Si por el contrario, el ciclo positivo de una coincide con el ciclo negativo, al combinarlas se cancelarían mutuamente. Entonces se dice que están en oposición de fase. Entre estos dos casos extremos tenemos todos los casos intermedios (figura 2.33).

En un altavoz electrodinámico, mientras la longitud de onda de la frecuencia a reproducir es mayor que el diámetro del cono del altavoz, toda la membrana vibra al unísono, como una única unidad radiante. Podemos decir que todos los puntos del cono están vibrando *en fase,* a la vez. Pero en el momento en que la longitud de onda es menor que el diámetro del cono, éste empieza a vibrar con diferente fase a lo largo de su superficie, produciéndose aumentos y disminuciones en la vibración de la membrana. Dependiendo de su tamaño, densidad y rigidez, tendremos diferentes comportamientos.

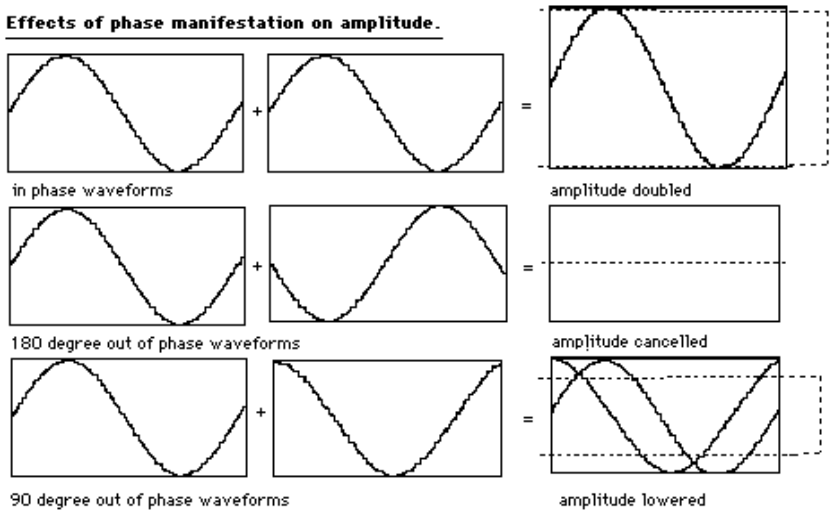
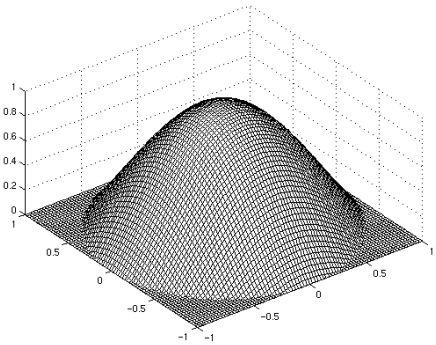
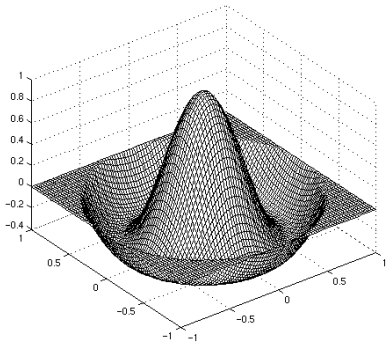


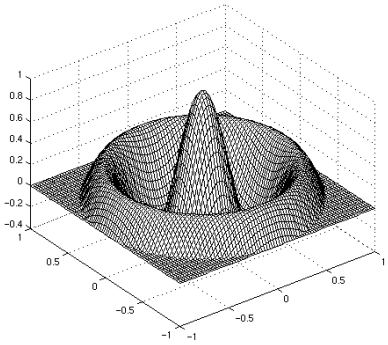
Figura 2.33. *Efectos de la fase entre señales*

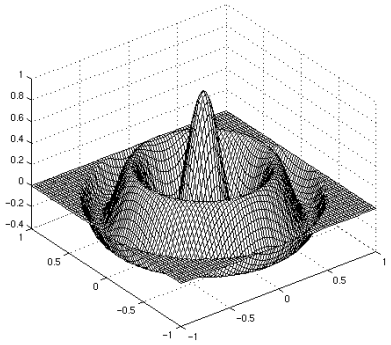
En general, toda membrana tiene unas frecuencias para las cuales, ésta vibra de una forma característica. Qué frecuencias son depende del caso concreto porque, como ya hemos mencionado, nos va a influir el material de que esté hecha la membrana, su forma, su densidad, rigidez,… Estas frecuencias se denominan *frecuencias modales de vibración*, ya que para cada una de esas frecuencias la membrana vibra de una forma característica. En los siguientes gráficos (fig. 2.34-2.37), podemos ver los primeros modos de vibración naturales de una membrana, esto es, la manera en que vibra una membrana para sus primeras frecuencias modales:





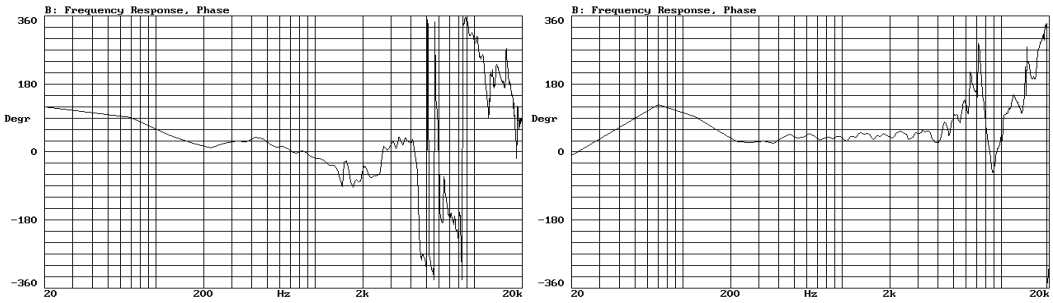
Figuras 2.34 y 2.35. *Modos 1º y 2º de vibración*



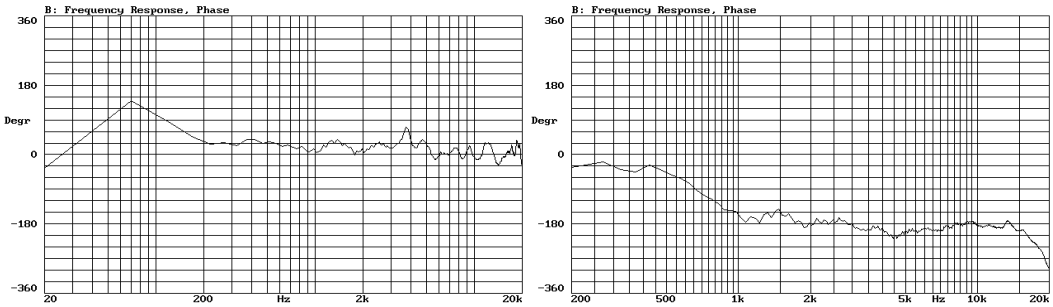


Figuras 2.36 y 2.37. *Modos 3º y 4º de vibración*

En el catálogo, la medida de fase nos indica con qué diferencia de fase va a reproducir el altavoz cada frecuencia respecto a la fase de la señal de entrada (fig. 2.38 a 2.41). Podemos observar cómo en baja frecuencia la respuesta de fase es prácticamente lineal en todos los casos, y cómo al ir disminuyendo el diámetro de la membrana, la irregularidad de la fase va aumentando en frecuencia. En el caso de que el diámetro de la membrana sea considerable, en el momento en que la longitud de onda es menor que el diámetro del altavoz, la fase comienza a comportarse de una forma errática, como vemos en el caso de un 21" (fig. 2.38). Según vamos disminuyendo diámetros, la fase se comporta de manera lineal a frecuencias cada vez más altas (fig. 2.39), hasta llegar a tener una fase prácticamente lineal (fig. 2.40 y 2.41).



Figuras 2.38 y 2.39. *Fases de un 21" y un 12"*



Figuras 2.40 y 2.41. *Fases de un 5" y un Tweeter*

2.4. Parámetros de Thielle-Small

Recordemos que, cuando se estudió la impedancia del altavoz, en la frecuencia de resonancia teníamos un pico más o menos pronunciado y acampanado. La altura del pico viene determinada por las pérdidas que todo sistema mecánico tiene (calor, rozamiento, fricción…). Estas pérdidas las representamos mediante resistencias. En la resonancia, se anulaban las partes de la impedancia debidas a la masa y la suspensión, quedando tan sólo la resistencia. Idealmente, si no tuviésemos pérdidas, las resistencias no existirían y el pico tendría una altura infinita. Como no es esto lo que ocurre en la realidad, se definen unos parámetros denominados *factores de calidad del altavoz*. Estos factores cuantifican en una cifra las pérdidas del altavoz a la hora de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y acústica. El valor de cada Q nos indica qué cantidad de pérdidas tenemos y de qué tipo son, según qué pérdidas se tienen en cuenta a la hora de definir cada factor de calidad. Sabiendo esto, al ver estos números podemos hacernos una idea de cuánto y cómo se aleja el altavoz del caso ideal. Como un altavoz tiene unas pérdidas eléctricas y otras mecánicas, se definen dos factores de calidad:

Q_{ES}: factor de calidad a la frecuencia de resonancia del altavoz f_S teniendo en cuenta únicamente la resistencia eléctrica R_E del altavoz. Cuanto *menor* es, *menos* pérdidas tenemos debidas a la bobina. Suele tener valores entre 0.3 y 1.5

$$Q_{ES} = \frac{2\pi \cdot f_S \cdot M_{MS} \cdot R_E}{(B \cdot l)^2}$$

Q_{MS}: factor de calidad a la frecuencia de resonancia del altavoz f_S teniendo en cuenta únicamente la suma de resistencias no eléctricas. Cuanto *mayor* es, *menores* son las pérdidas por las partes mecánicas del altavoz (suspensión, cono, etc). Suele tener valores entre 10 y 3.

$$Q_{MS} = \frac{1}{2\pi \cdot f_S \cdot C_{MS} \cdot R_{MS}}$$

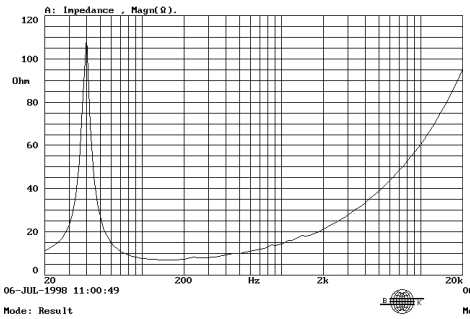
Ambos factores se unen para poder dar un factor de calidad Q total del altavoz, en el que están incluidas todas las resistencias y por tanto, todas las pérdidas:

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} \cdot Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}}$$

Este factor Q total es el que nos va a servir de guía para evaluar qué tipo de caja es más adecuado para el altavoz que tenemos, o viceversa, qué altavoz necesitamos para el diseño que queremos llevar a cabo. Cuanto *menor* es, *menores pérdidas* tiene el altavoz. Suele tener valores entre 0.2 y 1.

Hay que tener cuidado a la hora de comparar altavoces entre sí mediante los factores de calidad. Si los altavoces que estamos comparando no son del mismo tipo, es decir, diámetro, resistencia eléctrica y aplicación, estaremos cometiendo un error de evaluación, al igual que ocurría con el rendimiento y la sensibilidad. No podemos comparar un 12LX60 con un 12AG100, puesto que uno está especialmente diseñado para baja frecuencia mientras que el 12AG100 es tipo Full-Range, con una banda pasante muchísimo más amplia. Tiene que quedar muy claro que estos parámetros son útiles a la hora de calcular la caja más adecuada para obtener la respuesta que deseemos en baja frecuencia. No nos indican nada del funcionamiento del altavoz en media y alta frecuencia.

A continuación mostramos dos gráficas de impedancia, una la del 18G550 (fig. 2.42) y otra la del 18G50 (fig. 2.43), para comprender gráficamente el concepto de factor de calidad:



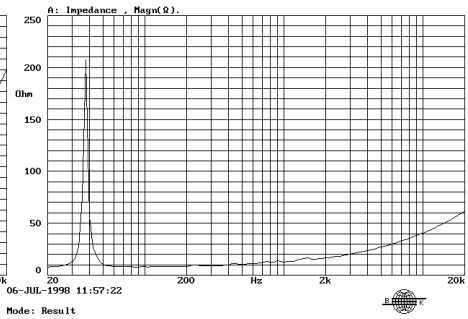


Figura 2.42. *(18G550)*
Qms= 8.875, Qes= 0.385, Qts = 0.37

Fig 2.43. *(18G50)*
Qms= 12.05, Qes= 0.325, Qts = 0.325

Como podemos observar, la altura del pico del 18G50 es mayor que la del 18G550, lo cual concuerda con un Qms mayor, es decir, el 18G50 tiene menores pérdidas mecánicas. Esto no quiere decir que sea mejor, sino que es más adecuado para un tipo de caja diferente. Hay que tener en cuenta que, dado el margen de valores en el que se mueve el Qts (0.2-1), las diferencias de décimas e incluso de centésimas entre altavoces de un mismo tipo marcan una diferencia notable.
El valor de Q_{TS} también se ve reflejado en la pendiente de la respuesta en frecuencia, en la zona de graves. Para dos altavoces de similares características, cuanto menor es Q_{TS}, mayor nivel tiene la pendiente y viceversa. Esto lo podemos observar en la siguiente figura 2.44, de dos altavoces muy parecidos:

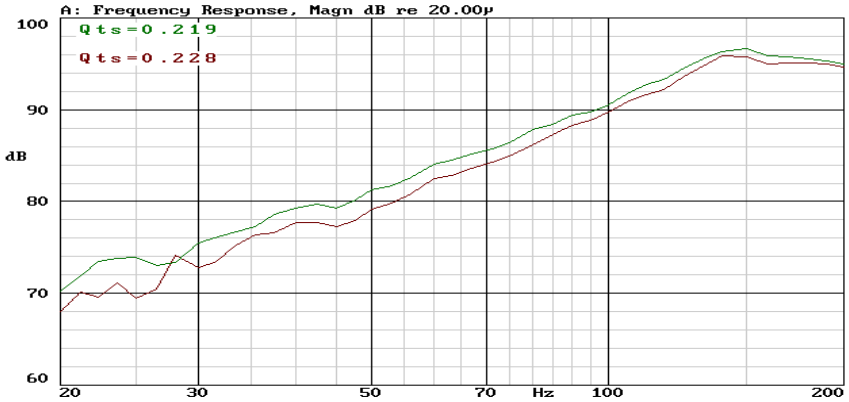


Figura 2.44. *Efecto de Qts*

3. EL TWEETER

Ya hemos visto que el altavoz electrodinámico de baja frecuencia es muy poco eficiente en alta frecuencia, debido al peso y tamaño de la membrana. Por eso se crearon los tweeters o altavoces de agudos. Tienen el mismo principio de funcionamiento que el altavoz de baja frecuencia, pero tienen un tamaño de membrana muy reducido para poder radiar la parte más alta del espectro. Sigue siendo un sistema de radiación directa, ya que el diafragma se sigue colocando en contacto directo con el aire. En la figura 3.1 tenemos el esquema genérico de un tweeter.

3.1. Partes de un tweeter

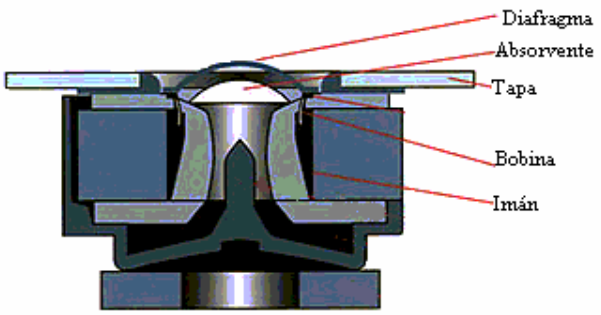


Figura 3.1. *Esquema genérico de un tweeter.*

Vemos que en esencia es muy similar al de un altavoz de graves. La membrana se denomina cúpula, pues ésa es la forma que tiene. Se fabrica con esta forma con la finalidad de que radie lo menos directivamente posible. Ya sabemos que según va aumentando la frecuencia, el sonido se vuelve cada vez más directivo y cubre menos área de escucha. Al darle forma de cúpula, el diafragma tenderá a radiar ondas esféricas, dando cobertura sonora a más área que si fuera plano o cónico. El material debe ser lo más ligero y rígido posible, para radiar con mayor eficiencia. Se utilizan muchos materiales, desde plástico de diversos tipos a aluminio, además de telas tratadas, titanio y un largo etcétera.

La cúpula tiene una suspensión, que suele ser del mismo material, aunque se le pueden poner suspensiones de otros materiales. Entre cúpula y suspensión, vemos que está la bobina sumergida en el campo magnético producido por el conjunto magnético, exactamente igual que en el altavoz de baja frecuencia. La bobina suele ser mayoritariamente de hilo de aluminio, al ser más ligero que el cobre.

Detrás de la cúpula se suele colocar material absorbente, para evitar interferencias entre la radiación trasera y delantera de la cúpula.

Lleva una tapa para facilitar su colocación, protegerlo y ayudar a mejorar la radiación de la cúpula. Se pueden ver tweeters con tapa plana, hasta las formas más exóticas imaginables. No existe un criterio claro sobre cuál es la forma óptima que debe tener la tapa para optimizar la radiación.

3.2. Tweeters de cinta

Vamos a comentar en qué consiste este tipo de tweeteres y sus características principales, ya que también es de tipo electromagnético, pero la configuración de sus partes es bastante diferente al altavoz electrodinámico convencional.
Un radiador acústico ideal sería aquel que cumpliese estos tres requisitos:

a) Toda su superficie debe vibrar en fase.
b) Debe tener una masa comparable a la carga de aire sobre la que radia.
c) Sus frecuencias de resonancia deben quedar fuera de su banda de trabajo.

Para conseguir alcanzar estos requisitos, el elemento radiante debe estar sometido a una fuerza mecánica uniforme en amplitud y fase en toda su superficie. Los altavoces de cinta (ribbon loudspeakers) cumplen estos tres requisitos.

Un altavoz de cinta consta de una lámina conductora flexible y ligera, inmersa en un campo magnético uniforme. Está apoyada por cada lado, pero sin llegar a estar tensa para reducir resonancias en la banda pasante. Para evitar que se alabee o flexione en el entrehierro esta lámina está ondulada transversalmente (figura 3.2).

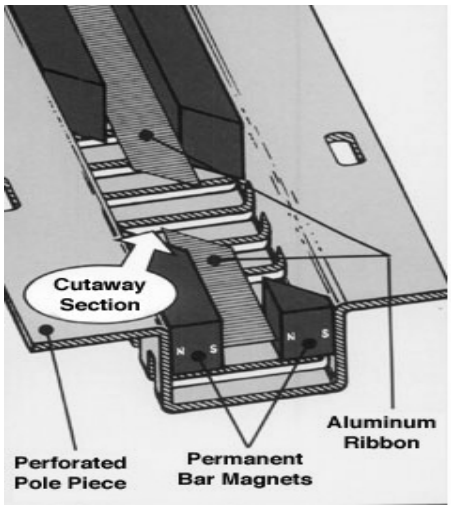


Figura 3.2. *Esquema genérico de un tweeter de cinta*

Las dimensiones de la cinta determinan su rango de frecuencias, sensibilidad y potencia admisible; suele ser de radiación directa aunque puede llevar una bocina para controlar la directividad.

En la figura 3.3 podemos ver un esquema de un transductor de cinta básico. Al pasar una corriente eléctrica por la lámina, dicha corriente origina un pequeño campo magnético, que interactúa con el campo magnético permanente transversal a la lámina, producido por los imanes situados a los lados de la cinta. Esta interacción originará una fuerza que moverá la lámina hacia delante, transmitiéndose dicho movimiento al aire.

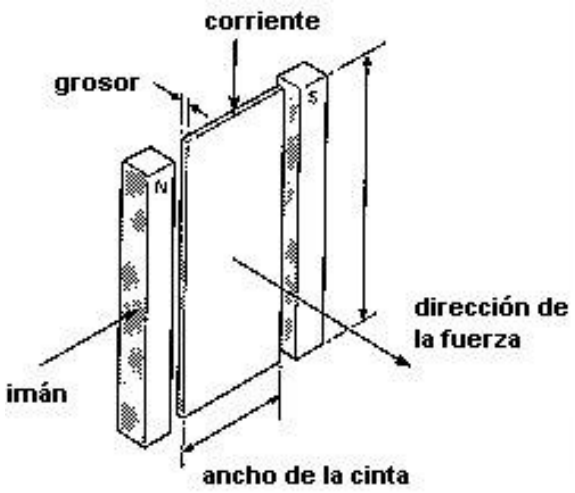


Figura 3.3. *Esquema básico de un transductor de cinta*

La eficiencia del tweeter depende especialmente del campo magnético B, siendo determinante la separación entre los imanes donde se sitúa la lámina. Por tanto, interesa que dicha lámina sea lo más estrecha posible, pero también debe poder disipar una potencia adecuada. Como siempre, hay que llegar a un compromiso. El material más utilizado para este tipo de tweeters de cinta es el aluminio.

También se puede imprimir un hilo plano en un diafragma de tela u otro material muy ligero, en forma de espiral. Incluso se puede imprimir el hilo por ambas caras. De este modo, el hilo está más próximo a los imanes, siendo el campo magnético más intenso. Estos tweeters admiten muy poca potencia, y por ello están prácticamente dirigidos al campo del Hi-Fi y de Car. Nuestro modelo de la serie digital DSR-93 incorpora un tweeter de este tipo.

3.3. Parámetros acústicos de los tweeters.

3.3.1. Rango de frecuencias

El rango de frecuencias que suelen cubrir los tweeters depende mucho de la cúpula, según su tamaño y el material de que esté hecha. En general, se puede decir que cuanto más pesada y menos rígida sea la cúpula, menor rango de alta frecuencia alcanzará. Y por supuesto del material y número de vueltas de la bobina, ya que el peso de la bobina nos limitará en alta frecuencia. Pero para dar una idea, suele ir de los 2 o 3 kHz hasta cerca de los 20kHz. Por abajo, nos limita el ancho de bobina, que es muy estrecho y no permite grandes desplazamientos. Al tener un diámetro muy pequeño, de una o dos pulgadas, la membrana del tweeter no tiene ni margen de desplazamiento ni suficiente área como para llegar muy abajo en frecuencia. En la parte alta, ya hemos dicho que nos limita sobre todo el peso de la masa móvil, cúpula y bobina, además de la rigidez. Como ejemplo, baste ver el caso del MC-115, con una cúpula relativamente grande, de 2'5 pulgadas, fabricada en tela plastificada, muy poco rígida. Es más bien un altavoz de medios, aunque su estructura es la de un tweeter. Este altavoz llega hasta 12.500 Hz., pero con un ángulo de dispersión muy amplio y uniforme, debido a esta configuración tipo tweeter. En cambio el 2010 o 2030 tienen cúpulas y bobinas más pequeñas y ligeras. Y la cúpula es de materiales más rígidos, lo que les permite llegar hasta los 20000 Hz.

3.3.2. La dispersión.

Se suelen dar parámetros ya conocidos como son la impedancia nominal, la sensibilidad y el rango de frecuencias. Pero el parámetro característico de los tweeters es el ángulo de dispersión (o simplemente dispersión), que nos indica el área que el tweeter es capaz de cubrir de una manera uniforme. Esta área o zona se denomina zona de cobertura. Se considera que el tweeter cubre un ángulo de manera uniforme hasta el ángulo para el cual el nivel de presión sonora es de –6dB respecto al nivel en el eje, como vemos en la figura 3.4. En la sección 4 veremos con más profundidad esta definición, que puede ser ambigua en algún caso, pero ahora nos basta con la definición formal. Es un dato muy importante para diseñar un sistema de sonido, ya que nos permite calcular qué zona vamos a poder cubrir con el tweeter. Cuanto más amplio sea este ángulo, mayor área cubrimos. Es importante evaluar correctamente la combinación de rango de frecuencias, sensibilidad y dispersión. Por ejemplo, el tweeter T2030 tiene una sensibilidad de 95 dB frente a 92 db en el T2010, pero este último tiene una mayor dispersión, 80º frente a 60º en el T2030. Todo depende de la aplicación para la que necesitemos el tweeter.

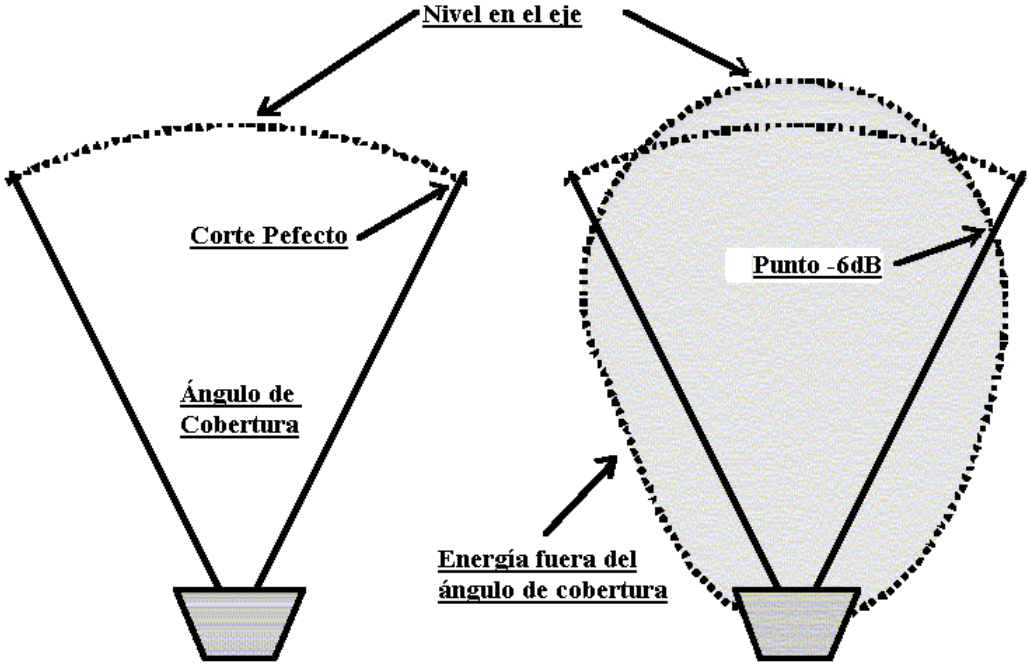


Figura 3.4. *Ángulo de cobertura de una fuente*

3.4. Potencia. Límites y mejoras.

3.4.1. Límites mecánicos. La importancia del filtrado

¿Qué puede ocurrir si introducimos una señal eléctrica con frecuencias graves en un tweeter? La bobina va a intentar reproducir todas las frecuencias que contiene la señal. Como las frecuencias graves exigen un gran desplazamiento, la bobina se saldrá del campo y lo más frecuente es que el hilo de la bobina, al ser muy delgado, se rompa en el punto de soldadura con los terminales, dejando inservible el tweeter. Por eso es muy importante filtrar las frecuencias graves de la señal, para que el tweeter reproduzca el ancho de banda para el cual ha sido diseñado sin que se dañe. Para realizar este filtrado se utilizan unos circuitos eléctricos denominados cross-overs o separadores de frecuencias, como dicen en el mundo del Car Audio. Hay que aclarar que aunque solemos denominar filtros a los cross-overs, no dejan de ser una categoría dentro de los filtros, término mucho más amplio, en el que también entran los ecualizadores y muchos más tipos. Analizaremos estos circuitos en la sección 7. Baste saber por ahora que son circuitos capaces de separar una señal en bandas de frecuencia, para enviar a cada altavoz el contenido espectral para el que está destinado. Así evitamos señales eléctricas que obliguen al tweeter a un desplazamiento excesivo. Esta frecuencia de corte por abajo afecta en cuanto a potencia admisible. Cuanto más alta sea la frecuencia de corte por abajo, mayor potencia podrá disipar el tweeter, al hacerlo trabajar con un ancho de banda menor.

3.4.2. Límites térmicos. El uso de ferrofluido.

El comportamiento térmico de los tweeters es similar al de los altavoces de baja frecuencia. Cuanto más ancho de bobinado y más diámetro de bobina, mejor disipación térmica y mayor potencia admisible. De todas formas, la potencia eléctrica que necesita un tweeter para igualar acústicamente una unidad de graves suele ser mucho menor que la potencia eléctrica que necesita dicha unidad de graves (ver sección 2.3.2). De hecho, en muchas ocasiones incluso hay que atenuar el tweeter por su excesiva sensibilidad. Por ello, esta menor admisión de potencia eléctrica debido a su reducido tamaño no suele ser un problema.

Sin embargo, si se quiere aumentar la potencia admisible de un tweeter, podemos mejorar la disipación térmica de la bobina introduciendo en el entrehierro un líquido denominado ferrofluido. Esta sustancia se compone de partículas magnéticas en suspensión, por lo que el ferrofluido queda atrapado en el entrehierro debido a la atracción magnética del campo (ver figura 3.5). Dado que este fluido es 5 veces mejor conductor del calor que el aire, la disipación de calor de la bobina a las partes mecánicas mejora ostensiblemente, consiguiendo una potencia admisible mayor.

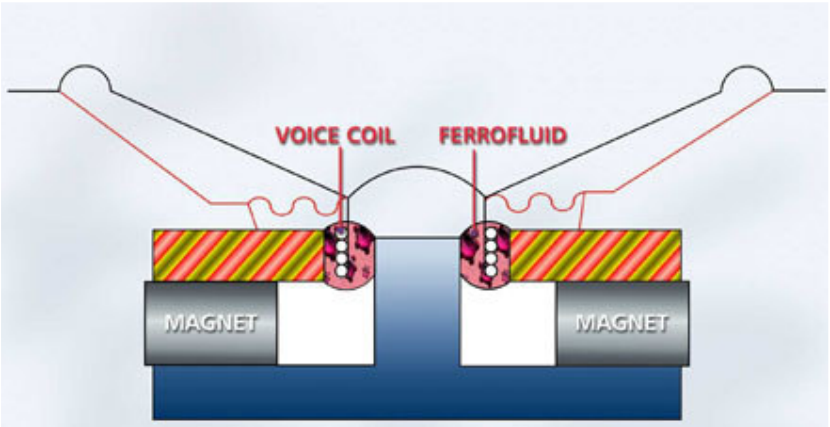


Figura 3.5. *Ubicación del ferrofluido en el entrehierro.*

4. SISTEMAS DE RADIACIÓN INDIRECTA

Los sistemas que se han visto hasta ahora se denominan de "radiación directa", ya que la membrana del altavoz está acoplada directamente al aire. Sin embargo, existe un tipo de sistemas denominados como de "radiación indirecta" en los que se intercala un dispositivo entre la membrana y el aire, cuya finalidad es acoplar la impedancia del aire a la del altavoz. Este acoplador es lo que comúnmente se conoce como bocina. De un modo general, la bocina es un tubo de sección transversal progresivamente creciente. El extremo

estrecho se denomina garganta y es el que se acopla al altavoz, mientras que el extremo ancho recibe el nombre de boca y actúa como superficie radiante (ver figura 4.1).

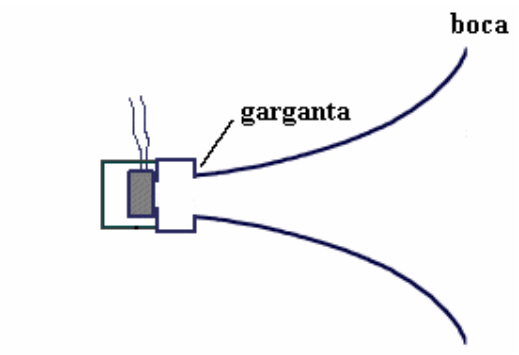


Figura 4.1. *Sección típica de una bocina.*

Para entender la ventaja que nos proporciona este tipo de sistemas frente a los de radiación directa podemos pensar en una analogía mecánica: si tomamos un pañuelo de papel e intentamos golpearlo, la eficiencia del golpe es muy pobre, ya que la poca resistencia que ofrece el pañuelo a nuestra mano hace que la fuerza que empleamos se desperdicie. Si intentamos golpear una superficie rígida como una pared, dado que nos ofrece más resistencia, nuestra fuerza se aprovecha por completo y conseguimos un impacto satisfactorio. De algún modo, podríamos decir que en el segundo caso la adaptación de impedancias es mejor.

En el caso del altavoz la adaptación de impedancias está determinada por la relación existente entre la superficie de la membrana del altavoz y la del medio circundante (el aire): al ser menor la superficie de la membrana respecto a las dimensiones del medio, la adaptación de impedancias no es buena. Así en los sistemas de radiación directa, el valor de la resistencia de radiación del aire (R_{MA}) en la zona de trabajo de los mismos vale:

$$R_{MA} = k \cdot f^2 \cdot S_d^{\ 2}$$

Dónde k es una constante, f es la frecuencia y Sd es la superficie de la membrana. Por tanto, a mayor superficie de la membrana, mayor resistencia de radiación del aire, y consecuentemente, mejor acoplamiento de impedancias. Sin embargo, al aumentar la superficie de la membrana aumenta su peso, con la consiguiente disminución del rendimiento, por lo que esta supuesta mejora no sería efectiva. Este inconveniente se subsana en el caso de los sistemas de radiación indirecta, dónde el efecto de la bocina es el de ofrecer una mayor superficie de radiación manteniendo inalteradas las dimensiones de la membrana del altavoz.

Los sistemas de radiación indirecta se utilizan sobre todo en aplicaciones de megafonía, donde la necesidad de un nivel de presión sonora elevado es prioritaria. El principal inconveniente que presentan es que la bocina introduce un alto nivel de distorsión, lo que

restringe la aplicación de este sistema. En aplicaciones dónde el rendimiento se puede sacrificar en favor de una mayor calidad de reproducción, se monta el altavoz con la membrana acoplada directamente al aire (sistema de radiación directa). En la sección 5, donde se trata el tema de los altavoces coaxiales, veremos un ejemplo de un sistema de radiación indirecta de dos vías; con una bocina para el altavoz de graves y otra bocina para el altavoz de agudos.

4.1. Motores de compresión

El motor de compresión es un altavoz destinado únicamente a sistemas de radiación indirecta, es decir, para ser acoplado a una bocina. Por tanto, su diseño está optimizado para esta aplicación, como ahora veremos. En la figura 4.2, podemos ver la sección transversal de un motor de compresión, dónde se distinguen una serie de partes funcionales que veremos en detalle a continuación.

4.1.1. El conjunto móvil

Está formado por un diafragma en forma de cúpula, una suspensión en forma de anillo y una bobina de hilo conductor. El principio de funcionamiento es el mismo que en el caso del altavoz de radiación directa, se trata de un transductor electrodinámico de bobina móvil (ver sección 2.1). En el caso de los motores también se cumple que la masa móvil es un factor que determina tanto el rendimiento como la frecuencia a partir de la cual empieza a caer la respuesta del altavoz. En el ejemplo de la figura 4.3, vemos como afecta el aumento de la masa móvil a la respuesta: un tratamiento que aumenta su peso propicia su caída, siendo ésta mayor en frecuencias altas.

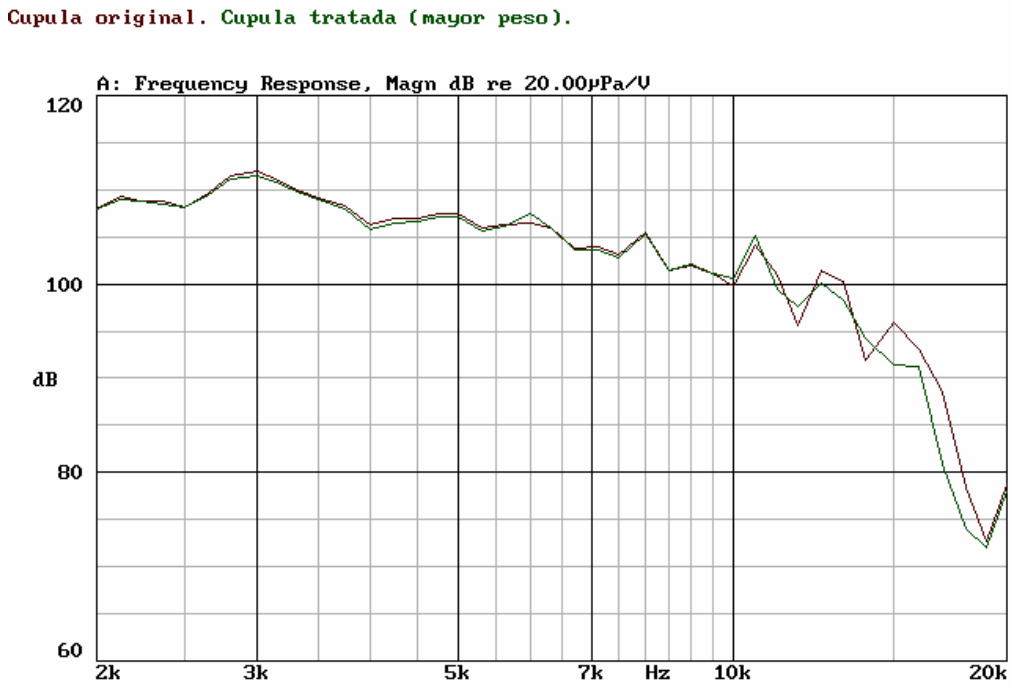


Figura 4.3. *Efecto del aumento de la masa móvil sobre la respuesta en frecuencia del motor de compresión: curva marrón – cúpula sin tratar; curva verde – cúpula tratada (mayor peso).*

Las particularidades de la aplicación a la que el motor de compresión está destinado, hacen que sea necesario comentar los aspectos relevantes de los componentes del conjunto móvil:

- **La cúpula:** idealmente ha de ser lo más ligera y rígida posible para que vibre como una unidad. En la práctica, se utilizan diferentes materiales cuyas características condicionan el funcionamiento en función de su mayor o menor aproximación a la premisa ideal. En los modelos de Beyma se utilizan tres tipos de materiales: poliéster, aluminio y titanio. En la tabla 4.1 aparece una comparación de las características de estos materiales. Las características que aparecen reflejadas son la densidad y el módulo de Young. La densidad nos da una idea del peso que obtendremos dadas las dimensiones de la cúpula: a mayor densidad, mayor peso, lógicamente. Por su parte, el módulo de Young es un indicador de la rigidez del material; es decir, a mayor módulo de Young, más rígido es el material. El módulo de Young se puede definir como la fuerza que se puede ejercer sobre el material sin llegar a deformarlo. Por tanto, de los materiales mostrados en la tabla el más rígido es el titanio, mientras que el más ligero es el poliéster.

Material	**Densidad (kg/m^3)**	**Módulo de Young (10^{10} N/m^2)**
Titanio	4500	11
Aluminio	2700	7
Poliéster	1400	0.5

Tabla 4.1. *Características de diferentes materiales utilizados en cúpulas.*

- **La suspensión:** normalmente suele ser del mismo material que la cúpula, aunque existen diseños cuya suspensión es de otro material. Como ejemplo muy común tenemos la combinación de cúpula de titanio y suspensión de poliéster. En este caso, la unión entre cúpula y suspensión es crítica, ya que es en esta zona dónde se radia en frecuencias altas. De este modo, en la figura 4.4 podemos ver un ejemplo de cómo evoluciona la superficie radiante en función de la frecuencia: a 1.5 kHz la cúpula vibra como una unidad, mientras que a partir de 7.6 kHz la radiación se produce en la parte exterior de la cúpula, siendo la superficie radiante discontinua, es decir, existen zonas de la cúpula que radian independientemente unas de otras.

- **La bobina:** el hilo suele ser de aluminio, ya que con este material se consiguen bobinas más ligeras. El ancho de bobinado es reducido, debido a que la mayor parte de motores de compresión trabajan en la zona de frecuencias medias-altas, dónde los desplazamientos son pequeños. El diámetro de la bobina condiciona la potencia que admite el motor. Así, por ejemplo, en el caso del CP-850/Nd, cuya bobina tiene un diámetro de 100 mm, su potencia admisible es 125 W RMS por encima de 1500 Hz (entre 500 y 1500 Hz es 60 W debido a que en estas frecuencias el desplazamiento es mayor). Sin embargo, en el caso del CP-385/Nd, cuya bobina es de 44.4 mm de diámetro, la potencia es menos de la mitad: 50 W.

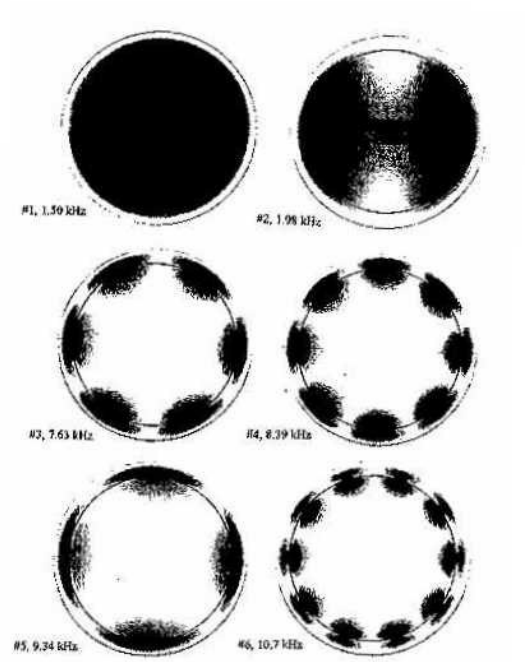


Figura 4.4. *Evolución de la superficie radiante de la cúpula al aumentar la frecuencia desde 1.5 kHz hasta 10.7 kHz (superficie radiante = superficie oscura).*

4.1.2. El conjunto magnético

La filosofía del conjunto magnético es idéntica a la del altavoz de radiación directa, ya que como ya se ha dicho, el principio de transducción es el mismo (ver sección 2.1). De esta manera, el conjunto magnético está formado por un perno o núcleo, una anilla de campo y un imán (ver figura 4.2). Consecuentemente, el conjunto magnético se caracteriza con el mismo parámetro que en el caso de los altavoces de radiación directa: el factor de fuerza o Bl. Por tanto, el Bl es uno de los factores que determinan el rendimiento de un motor de compresión, pero además, adquiere una especial relevancia en lo que respecta a la respuesta en frecuencias altas. Así, en la figura 4.5 se puede apreciar como el pasar de un Bl de 10 a la mitad supone una merma importante del rendimiento, pero que sobre todo ésta es mayor conforme aumenta la frecuencia. De este modo, a 15 kHz las pérdidas son más importantes que a 5 kHz.

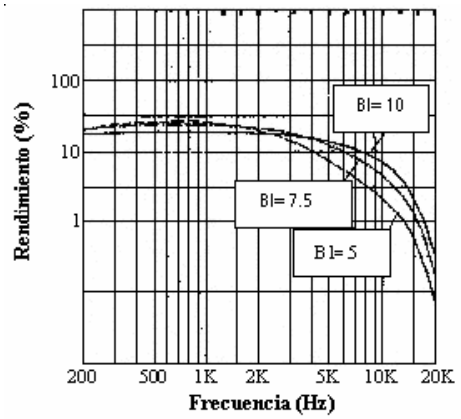


Figura 4.5. *Simulación del efecto de la variación del Bl en la respuesta en frecuencia del motor.*

4.1.3. La cámara de compresión

Lo que se conoce como cámara de compresión es el volumen de aire que queda entre la cúpula y el corrector de fase. Aunque el corrector de fase se tratará en la siguiente subsección (4.1.4), a efectos de entender el funcionamiento de la cámara de compresión, es necesario al menos poder identificar su posición en el motor y conocer el aspecto que ofrece visto desde la cúpula. Si acudimos a la figura 4.10 podemos ver la parte superior de un corrector de fase típico: se trata de una pieza sólida con una serie de ranuras concéntricas que permiten el paso del aire a través del corrector. Pues bien, si tenemos en cuenta que la cúpula está colocada sobre el corrector de fase con una pequeña separación (ver figura 4.2), estamos obligando a que todo el aire contenido en esta cavidad de dimensiones reducidas pase a través de las ranuras del corrector de fase, que ocupan una superficie mucho menor a la ocupada por la cúpula. Este cambio de área brusco es lo que produce el efecto beneficioso de la compresión. Este efecto se traduce en un aumento de la impedancia de radiación del altavoz, como ahora veremos, con el resultado de que se logra una mejor adaptación de impedancias (recuérdese la introducción). Por tanto, el objetivo de la cámara de compresión es idéntico al de la

bocina, lo que ocurre es que la cámara de compresión lo consigue a través de un principio de funcionamiento distinto.

Para entender como se produce este incremento de la impedancia de radiación, es necesario estudiar el comportamiento de una "cámara de compresión" más sencilla, y no un sistema tan complejo como un motor de compresión. Si consideramos una cavidad como la que aparece en la figura 4.6.a, con una sección de entrada S1, una sección de salida S2 y una longitud L, de forma que L es pequeña respecto a la longitud de onda de la onda sonora; el aire en su interior se mueve como una masa única, lo que se traduce en que la impedancia de radiación de la sección de entrada viene dada por:

$$z_1 = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \cdot Z_2$$

Por tanto, si S1 es igual a S2, caso de la figura 4.6.a, la impedancia de entrada es igual a la de salida, con lo que no obtenemos ninguna mejora, pero, si S1 es mayor que S2 (figura 4.6.b) la impedancia de radiación de la sección de entrada aumenta, mejorando la adaptación de impedancias.

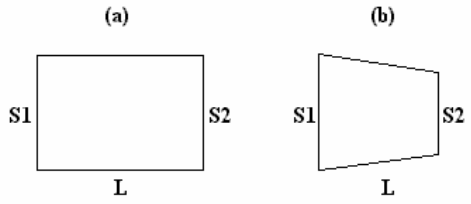


Figura 4.6. *Fundamento de la cámara de compresión.*

Sin embargo, hay que remarcar que este efecto se produce para una banda de frecuencias limitada, ya que cuando la longitud de onda de la onda sonora se hace comparable a la longitud de la cavidad, el aire en el interior de la cavidad deja de moverse como una masa de aire única, y el efecto de la compresión empeora.

Si observamos la respuesta en frecuencia del motor de compresión CP-800/Ti (figura 4.7), veremos como la respuesta es pobre en frecuencias altas. Entre otros muchos factores (masa móvil, factor de fuerza, etc), uno de los que determinan que la respuesta del motor pierda efectividad es la pérdida de eficacia de la cámara de compresión: recordemos que conforme aumentamos la frecuencia la longitud de onda se va haciendo cada vez más pequeña, y por tanto comparable a la longitud de la cámara.

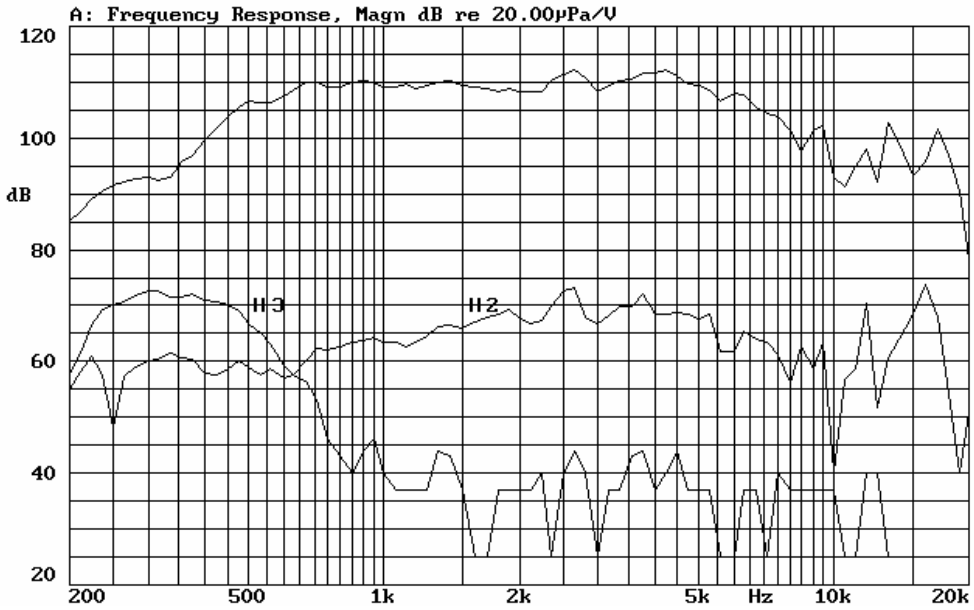


Figura 4.7. *Respuesta en frecuencia del motor de compresión CP-800/Ti acoplado a la bocina TD-460.*

Vamos a ver con un ejemplo práctico como afecta la longitud de la cámara de compresión a a la respuesta de un motor. En este caso, la longitud de la cámara equivale a la distancia entre la cúpula y el corrector: si aumentamos esta distancia con una arandela de papel que eleve el conjunto móvil, estamos aumentando la longitud de la cámara. De esta manera, en la figura 4.8. vemos como el hecho de aumentar esta longitud 6 décimas, precipita la caída de la respuesta, sobre todo a partir de 8 kHz.

Por otro lado, esta distancia también afecta al comportamiento del motor en frecuencias bajas, ya que si la membrana se acerca demasiado al corrector llegará a golpear contra éste, debido a que en estas frecuencias los desplazamientos son mayores. Este golpeo se traduce en un aumento de la distorsión armónica y en una disminución de la respuesta en frecuencias bajas. Por lo que respecta a como afecta la distancia a la distorsión, en las figuras 4.8 y 4.9 vemos un ejemplo claro: en el caso en el que no hay suplemento (la distancia entre corrector y cúpula es menor), tanto el segundo (H2) como el tercer armónico (H3) son más altos; sobre todo en frecuencias bajas.

En el caso de la respuesta, aunque se observa un empeoramiento en frecuencias bajas (entre 200 y 500 Hz) cuando no se suplementa el conjunto móvil, dado el rango de frecuencias dónde se produce, no es destacable.

Por tanto, como conclusión podemos afirmar que a menor distancia entre membrana y corrector, la respuesta mejora en frecuencias altas y empeora en frecuencias bajas, y viceversa.

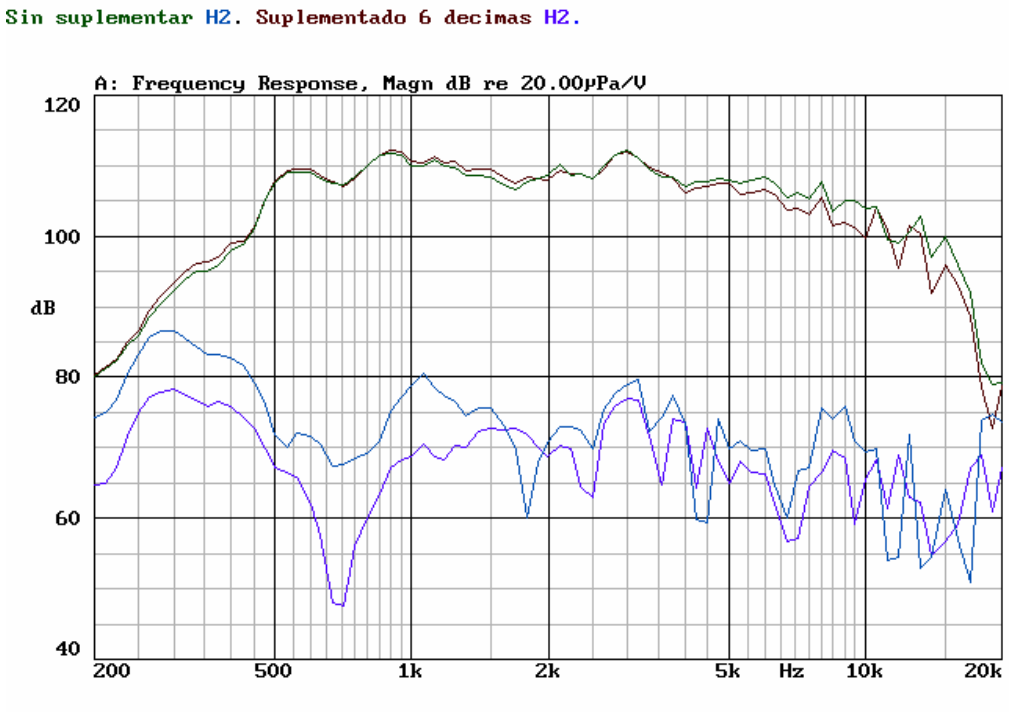


Figura 4.8. *Efecto de la distancia entre cúpula y corrector sobre la respuesta en frecuencia.*

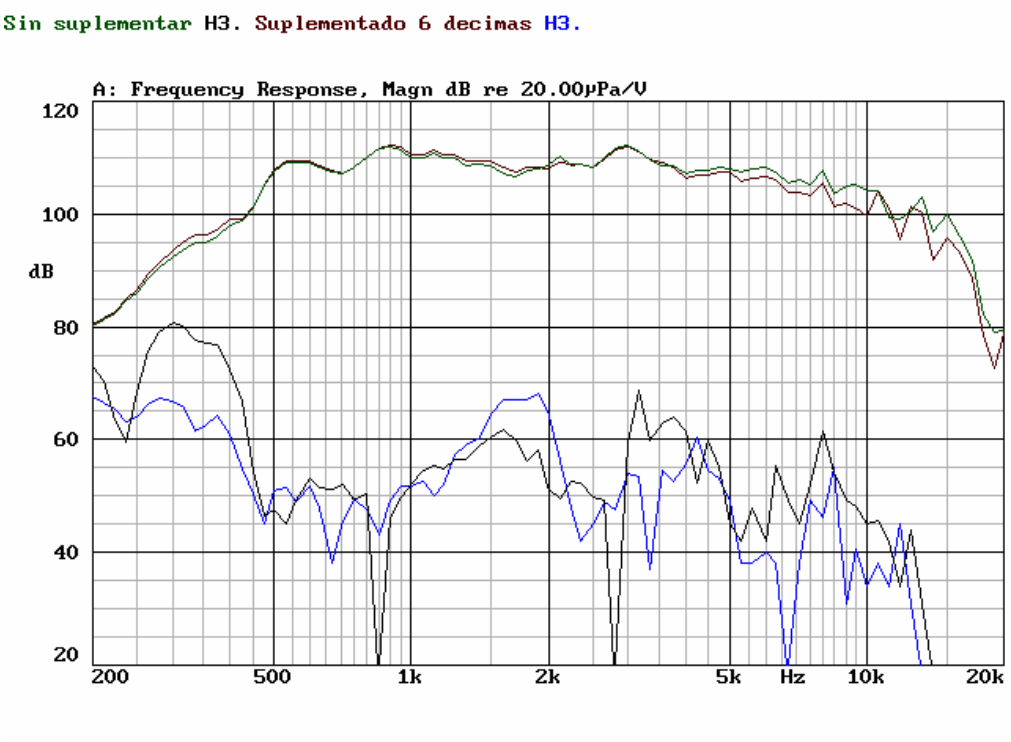


Figura 4.9. *Efecto de la distancia entre cúpula y corrector sobre la respuesta en frecuencia.*

Por último, dado que al hablar de la cámara de compresión hemos hablado de adaptación de impedancias, cabría definir estrictamente dónde empieza la bocina "real", ya que no se trata únicamente de la bocina que acoplemos: la adaptación empieza en el interior del motor de compresión. En el ejemplo de la figura 4.2, podemos ver como la bocina estaría dividida en tres partes: la parte A (cavidad del motor entre el corrector de fase y el vaso adaptador), la parte B (vaso adaptador) y la bocina que acoplemos a la salida del vaso adaptador.

4.1.4. El corrector de fase

El corrector de fase es un dispositivo cuya finalidad es conseguir que las contribuciones de cada parte de la cúpula a la radiación se interfieran de forma positiva, es decir, que estén en fase. Se trata de una pieza sólida a la que se le practican una serie de ranuras que guían el paso de las ondas sonoras desde la membrana hasta la salida de la cámara de compresión. Su forma se adapta en la parte superior a la cúpula y en la parte inferior a la cámara de compresión. De este modo, se garantiza por una parte que la distancia entre la membrana y el corrector de fase se mantiene constante y que se rellena por completo la cámara de compresión (ver figura 4.2). En la figura 4.10 podemos ver un ejemplo de un corrector de fase; en este caso, estamos viendo la parte superior del corrector, la que se adapta a la cúpula del conjunto móvil. Nótese las ranuras concéntricas. El funcionamiento se fundamenta en que en la base del corrector se combinan las diferentes ondas sonoras que vienen de las diferentes zonas de la cúpula, de forma que el corrector asegura que el camino que han recorrido es idéntico, con lo cual se encuentran en fase. Si no existiese el corrector las ondas sonoras interferirían a su libre albedrío en el interior de la cámara de compresión y el resultado a la salida de ésta sería pobre, debido a que se daría una relación de fase arbitraria.

Figura 4.10. *Ejemplo de corrector de fase – vista de la parte superior.*

4.2. La bocina

Volviendo al concepto de altavoz ideal, ¿cuál sería el altavoz ideal respecto al concepto de directividad? Normalmente uno de los requerimientos que se le pide a un sistema de audio es que cubra un área de escucha de manera uniforme. Y en múltiples ocasiones, es de igual importancia que el sonido que el sistema radia fuera del área de escucha

solicitado sea el mínimo posible. Estos requerimientos deben cumplirse para el mayor ancho de banda posible. Dentro del área de escucha, no debería existir ningún punto privilegiado. Toda la audiencia debería recibir la misma calidad de sonido. La respuesta en frecuencia del altavoz debería ser la misma en todos los ángulos dentro de su ángulo de cobertura. Fuera de su ángulo de cobertura, idealmente el altavoz no debería radiar en absoluto. Esto ayudaría a evitar que caigan reflexiones dentro del área de escucha, que degraden la calidad sonora, además de desperdiciar potencia radiando sobre zonas no necesarias.

Desgraciadamente, no existen todavía tales altavoces ideales. Por ello, existen unos parámetros y representaciones para poder evaluar y comparar la radiación de los altavoces.

4.2.1. Ángulo de cobertura, Q y D.I.

El ángulo de cobertura se define formalmente como sigue: "El ángulo de cobertura asignado a un plano de radiación dado es aquel ángulo formado por los dos puntos en que el nivel de salida cae seis dB (-6 dB respecto al nivel en el eje) y el centro de la fuente." Esta definición es aplicable tanto al plano vertical como el horizontal. Para un sistema ideal o de comportamiento uniforme, el cálculo es sencillo. En la figura 4.11 vemos una representación esquemática de esta definición. A la izquierda está el altavoz perfecto, con radiación únicamente dentro del ángulo de cobertura definido. A su derecha tenemos el altavoz real, que radia energía fuera de su ángulo de cobertura, tomando como puntos de corte el nivel a –6dB respecto al eje, tal y como enuncia la definición.

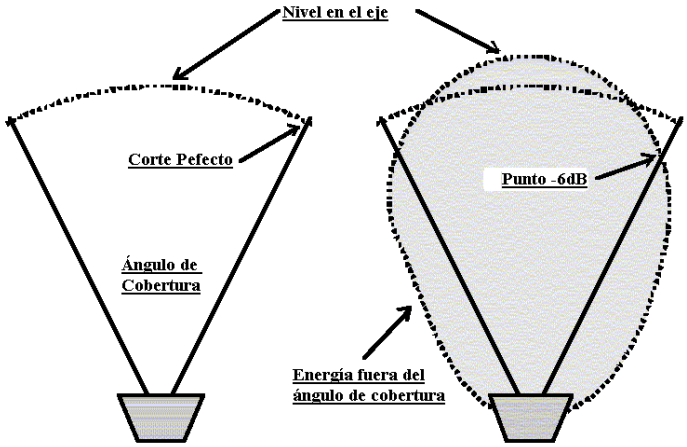


Figura 4.11. *Ángulo de cobertura*

Una vez que hemos conseguido calcular de manera correcta el ángulo de cobertura del altavoz y la regularidad de su respuesta dentro de dicho ángulo, nos interesa saber cuánto sonido es radiado fuera del ángulo de cobertura. El factor de directividad nos indica precisamente esto.

La definición formal del factor de directividad es: "El factor de directividad (Q) de un transductor diseñado para la emisión de sonido es la relación entre la presión sonora elevada al cuadrado, a una distancia y dirección determinadas, y la media de la presión sonora elevada al cuadrado, a la misma distancia y promediada en todas las direcciones alrededor del transductor." Esto visto de una forma gráfica, sería equivalente al esquema de la figura 4.13. En él vemos que el factor de directividad Q relaciona el nivel acústico emitido por una fuente omnidireccional y un dispositivo emisor cualquiera, medido a la misma distancia y nivel de potencia acústico emitido. Por ejemplo en la figura 4.12. tenemos el Q de una fuente ideal con distintos ángulos de radiación. Si es totalmente omnidireccional, es evidente que Q=1. Si radia en una semiesfera, Q=2; en, por ejemplo, la esquina de una habitación, sería un Q=4; si radia un octavo de esfera, Q=8, etc.

En general, cuanto más directiva es una fuente o una bocina, más alto es su factor de directividad Q. Por ejemplo, si nos fijamos en el catálogo, vemos que la bocina TD590 cubre una zona de 90ºx40º con un Q = 10.5, mientras que la TD360, con zona de cobertura de 60ºx40º, tiene un Q = 12.4.

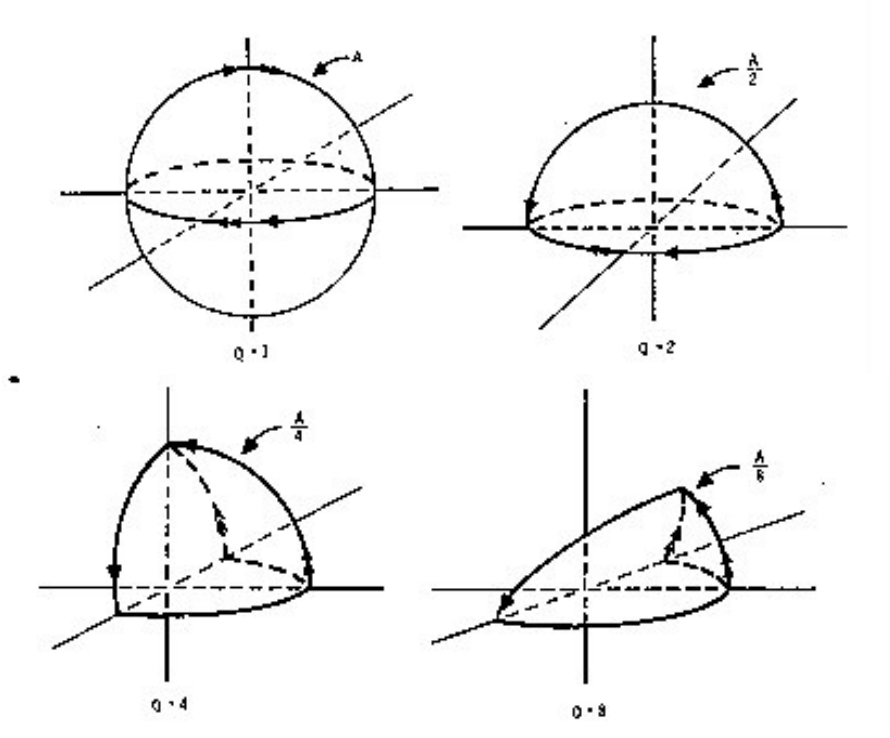


Figura 4.12. *Definición de Q*

El índice de directividad es el Q en escala logarítmica. Se calcula de la siguiente forma:

$$D.I. = 10 \cdot \log(Q) \quad Q = 10^{D.I./10}$$

Pensemos que si el Q de una fuente ideal omnidireccional es 1, El Índice de directividad D.I. nos da la diferencia de nivel en decibelios entre una fuente dada y una fuente omnidireccional ideal, como vemos en la figura 4.13. Una fuente omnidireccional tendría un D.I. de 10log(1) = 0. Por tanto, valores bajos de D.I. indican directividad baja y viceversa. Continuando los dos ejemplos citados, la bocina TD590 tiene un D.I.= 10.1 dB y la TD360 un D.I. de 10.9 dB.

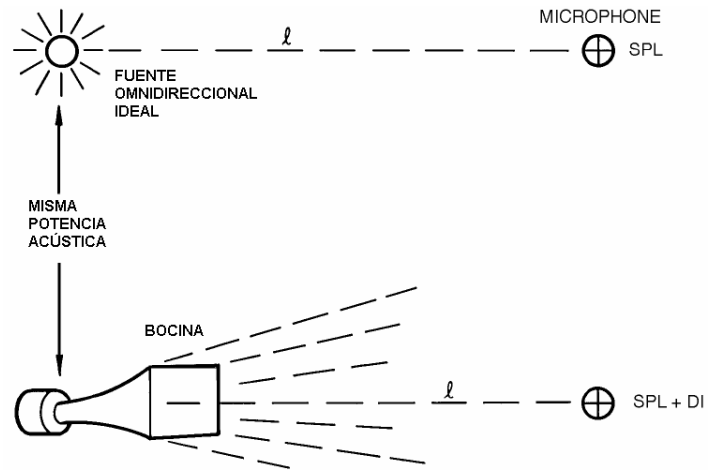


Figura 4.13.*Significado del Q y el D.I.*

Un radiador ideal que sólo emitiese sonido dentro de su ángulo de cobertura tendría un Q y D.I. fácilmente calculable mediante las fórmulas de la figura 4.14. Según el ángulo que cubra el difusor, tanto horizontal como vertical, tendrá un Q ideal distinto. Estos valores ideales nos sirven para medir cuánto se aleja del radiador ideal el dispositivo bajo prueba.

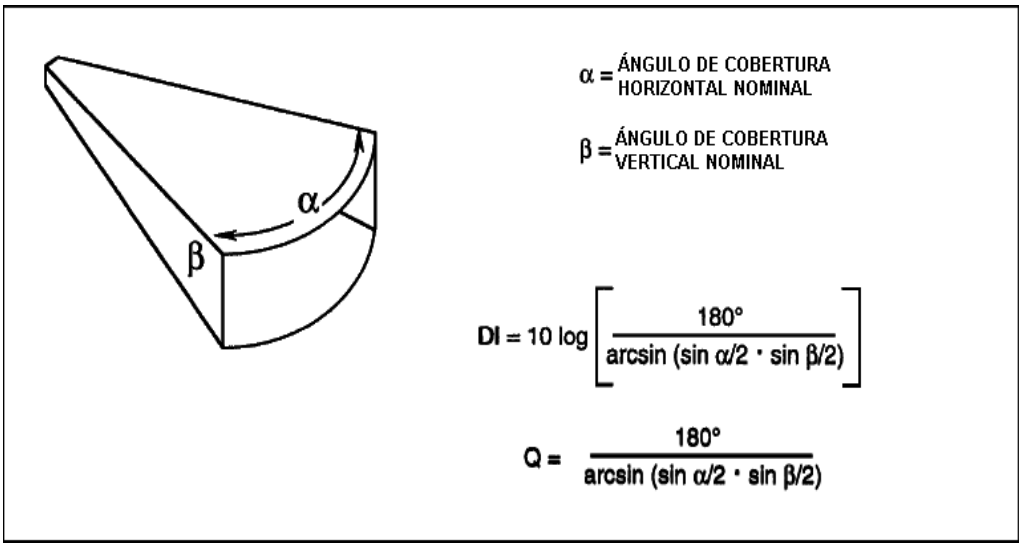


Figura 4.14. *Cálculo del Q ideal*

Si nos fijamos en la figura 4.15, vemos diversas formas de representar la cobertura de un altavoz. La primera gráfica (A) representada se denomina curva polar. En este gráfico se mide el nivel que emite el altavoz en todo su perímetro. Por ello tenemos los grados y el nivel en dB que emite el altavoz en esa dirección. Es como si estuviésemos viendo el altavoz desde arriba. Normalmente se toma como nivel de referencia el nivel medido en 0º grados, es decir, en el eje, ya que suele ser el máximo, aunque esto no tiene por qué ser así siempre.

El gráfico (B) representa la variación del ángulo de cobertura, tanto horizontal como vertical, respecto a la frecuencia. En él se observa fácilmente en qué ancho de banda el dispositivo cumple realmente los ángulos de dispersión nominales.

El gráfico (C) representa la variación del Q con la frecuencia, que resulta muy útil para observar rápidamente la regularidad de la dispersión con la frecuencia.

Finalmente, el gráfico (D) es un gráfico de isobaras, poco frecuente, que representa el área que cubre el dispositivo al proyectar su ángulo de cobertura sobre una zona de escucha. Es como si fuésemos la bocina y estuviésemos viendo el área que cubrimos. Se suele utilizar para programas informáticos de simulación acústica y de diseño de sistemas de sonido.

En la figura 4.16 tenemos otra forma muy habitual de representar la variación de la cobertura fuera del eje, mediante curvas de respuesta del dispositivo en función de la frecuencia para distintos ángulos.

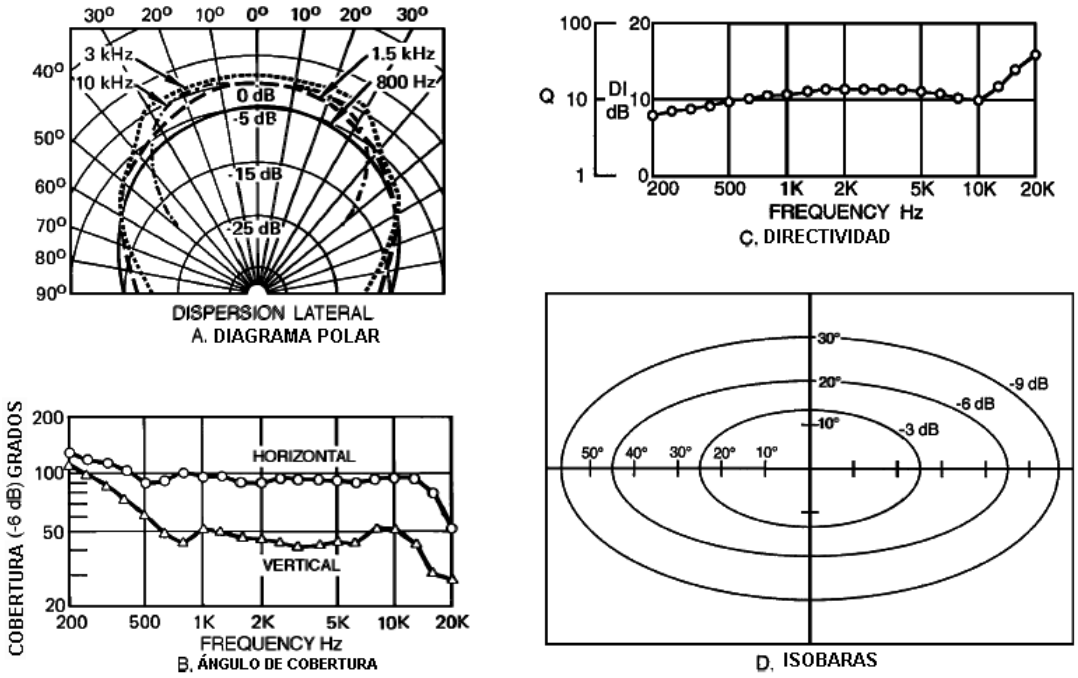


Figura 4.15.*Representaciones del Q*

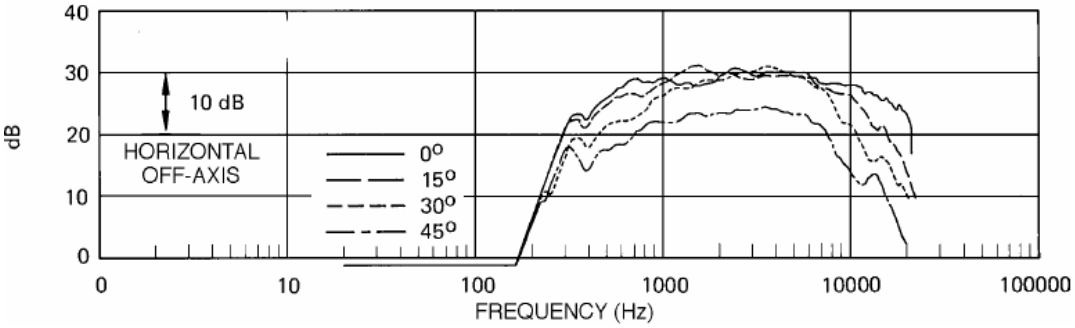


Figura 4.16. *Otra representación del D.I.*

Ahora que conocemos las definiciones y diferentes formas de representar los parámetros de cobertura de un altavoz, llega el momento de medir estos parámetros. En Beyma, las medidas de directividad de bocinas, se realizan en la cámara semi-anecoica. Se coloca la bocina en un motor de compresión y sobre una plataforma giratoria. El micrófono se coloca a 2 metros enfrente de la bocina, quedando el micrófono inmóvil durante la prueba. El motor de compresión en concreto no es muy importante, ya que los niveles se miden de forma relativa a la lectura en el eje central. Esta plataforma giratoria está sincronizada con un trazador de curvas especial. Se emite un tono a través del motor, girando al unísono la plataforma y una plantilla circular en el trazador de curvas. Así se va registrando el nivel recogido en el micrófono para cada punto de los 360º alrededor de la bocina. Así se obtienen las curvas polares de directividad para cada

frecuencia de interés. Se mide en frecuencias separadas 1/3 de octava desde 630 Hz hasta 16kHz. A continuación en la figura 4.17 tenemos las curvas polares de la TD460/N:

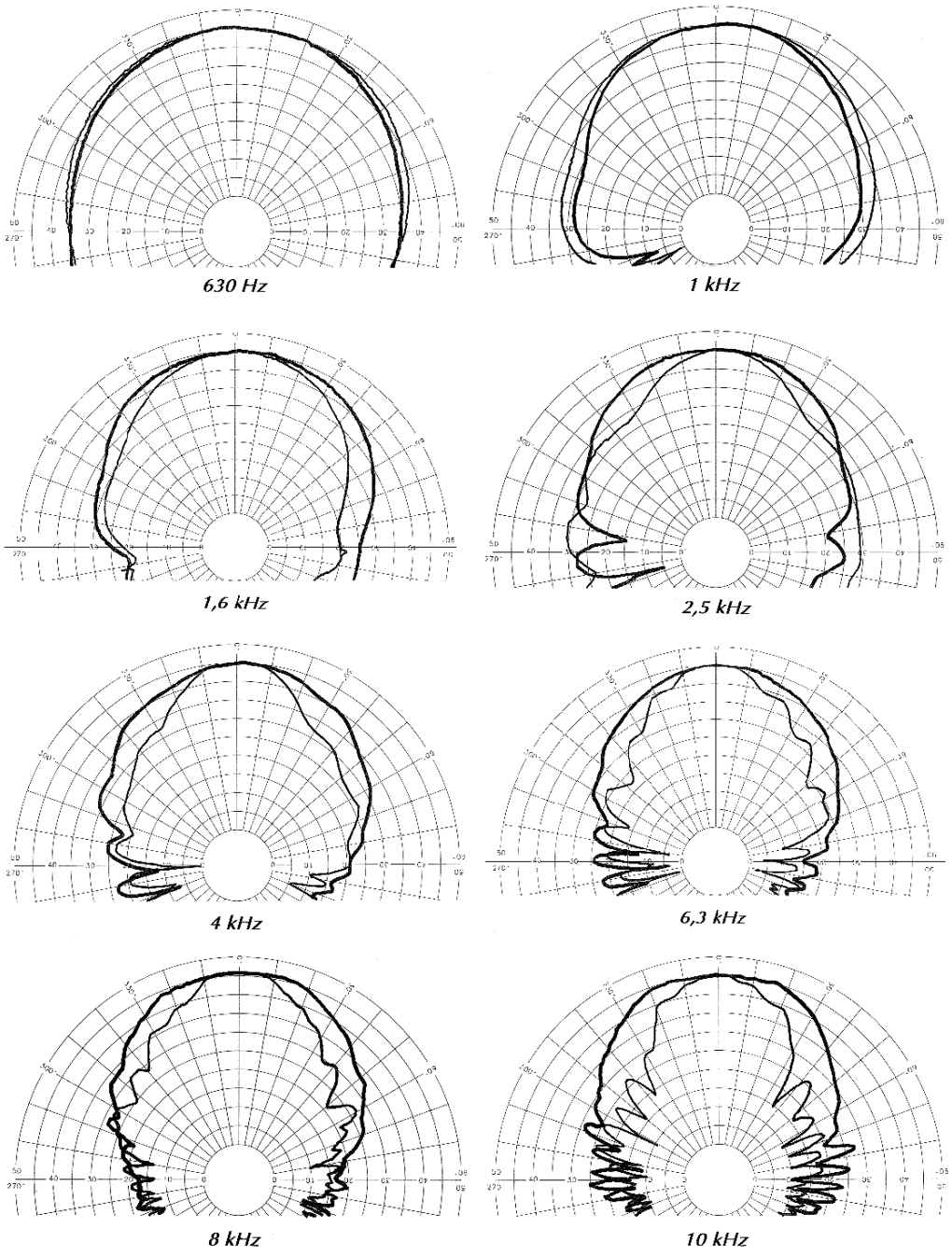


Figura 4.17. *Curvas polares de la TD460/N para diferentes frecuencias*

Una vez obtenidas estas curvas polares, sobre ellas se calcula el ángulo de cobertura (-6dB) y mediante un programa informático se calcula el Q y el D.I., tal como podemos ver en la figura 4.18. Vemos cómo el ángulo de cobertura (beamwidth en la figura) se mantiene alrededor de los ángulos de cobertura nominales (60ºx40º), aunque las variaciones con la frecuencia son casi imposibles de evitar. El Q (o D.I. según qué eje observemos) sí que se mantiene muy constante en frecuencia. Y finalmente, tenemos una gráfica de catálogo en la figura 4.19, en la que se da la desviación en decibelios para cada ángulo respecto al nivel en el eje, horizontal y vertical. Se puede ver como tenemos en el eje Y de cada gráfica un ángulo y una variación en decibelios de 0 a -5dB. Así se da al usuario una información muy completa de cómo cubre la bocina cada ángulo de cobertura.

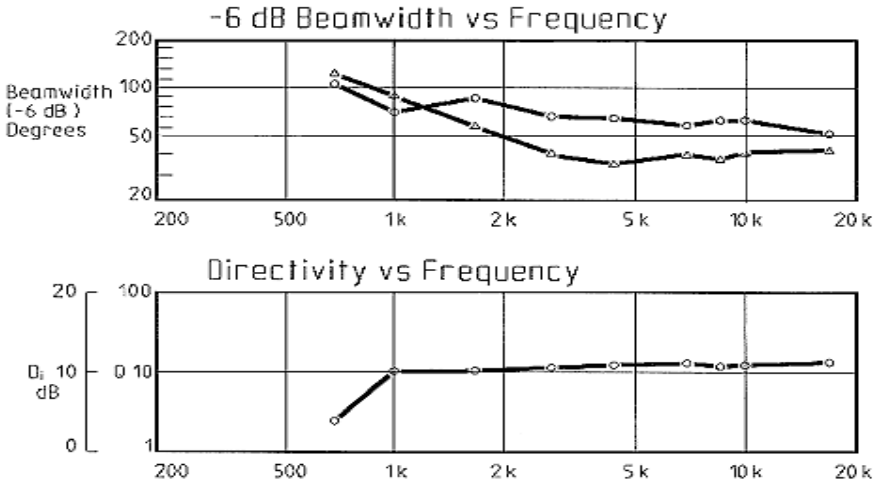


Figura 4.18. *Ángulo de cobertura, Q y D.I. de la TD460/N*

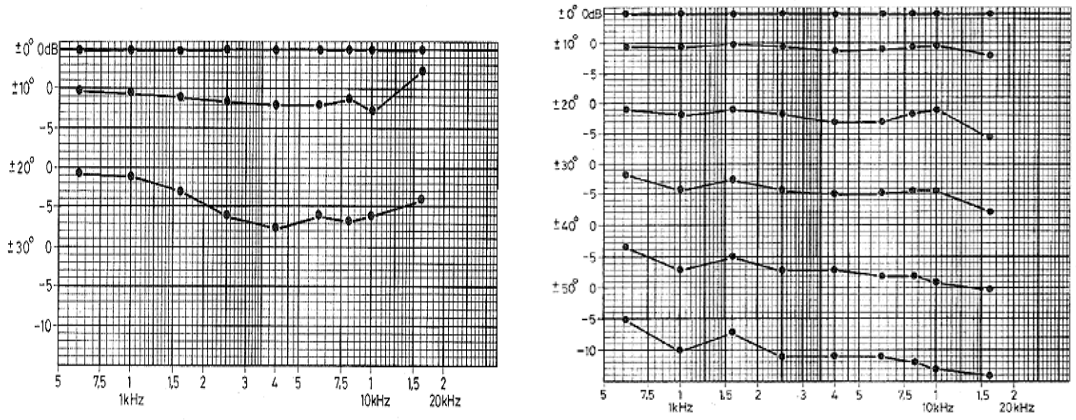


Figura 4.19. *Variación del ángulo de cobertura en dB en función de la frecuencia*

Anexo.

Medición del ángulo de cobertura C_L

¿Qué ocurre si el altavoz bajo análisis tiene una respuesta polar que cae por debajo de los 6 dB en un cierto grado y vuelve a superar dicho nivel antes de volver a caer finalmente? En la figura A.1 tenemos varios ejemplos. El primer diagrama polar nos muestra una respuesta típica. En la segunda figura tenemos un altavoz que presenta el problema que acabamos de mencionar.
Si nos ceñimos a definición de ángulo de cobertura, los lóbulos laterales estarían permitidos fuera del ángulo de cobertura. Si elegimos este altavoz por su ángulo de cobertura, podríamos acabar por tener unos resultados dudosos. Pensemos que si colocamos el altavoz cerca de una pared, las reflexiones desde esa pared podrían degradar la calidad del sonido de forma seria e inesperada. Si se utilizase en una agrupación de altavoces, la respuesta de los altavoces se superpondría interfiriéndose unos a otros, empeorando también la calidad sonora.

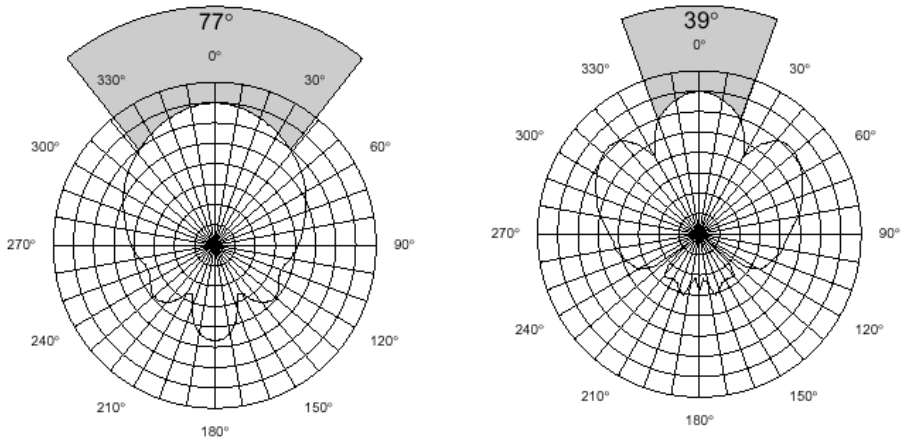


Figura A.1.

También tenemos un problema si el altavoz no emite el máximo nivel en el eje en toda su respuesta o para alguna frecuencia en concreto. Esto es algo habitual en las bocinas de directividad constante para algunas frecuencias. Si calculamos el ángulo de cobertura referido al nivel en el eje estaremos cometiendo un error. El ángulo calculado será más ancho que el verdadero.
Considerando que el objetivo es conseguir una cobertura constante sobre el área de escucha, con un mínimo nivel fuera de dicha área, ¿cuál es el planteamiento más correcto? Si el cliente pide un altavoz con un cierto ángulo de cobertura, será porque el sonido fuera del ángulo solicitado es un problema. Por tanto, no se pueden tolerar altavoces con fuertes lóbulos laterales. En este caso, para calcular correctamente la cobertura, el ángulo de cobertura se debería calcular respecto a los últimos puntos en los que la salida acústica cae –6dB respecto al nivel de referencia (en principio y según la definición, el nivel en el eje), aunque existan otras caídas de –6dB antes de estos últimos puntos que nos determinan el ángulo.

La contrapartida está en que si ahora permitimos que haya baches en la respuesta polar mayores de 6 dB, la respuesta en el área de cobertura será peor de lo que en un principio íbamos a permitir. Pero siempre será mejor que permitir un nivel excesivo de emisión fuera del ángulo de cobertura.
Una vez aclarado esto, seguimos teniendo el problema de que el ángulo de cobertura sigue dependiendo del método de normalización o el nivel de referencia escogido. Una forma de corregir el problema del bache en el eje sería encontrar el ángulo de máximo nivel y utilizar ese nivel como referencia. En la figura A.2 vemos la respuesta polar de una bocina de 60º a 8kHz, normalizada de esta manera y comparada con la normalización a 0º. Así podemos decir ahora que el ángulo de cobertura es el ángulo fuera del cual el nivel producido por el altavoz nunca es mayor de 6 dB menos que el nivel máximo emitido por el altavoz para esa frecuencia. Esto mejora el resultado calculado, pero elegir el nivel máximo de salida como referencia no deja de ser un poco arbitrario. Debemos buscar el ángulo con 6dB menos respecto al nivel sobre el área de cobertura que cubre el altavoz, y no respecto al nivel a un único punto en concreto. Por tanto, debemos normalizar la respuesta polar respecto al nivel medio dentro del ángulo de cobertura. Es importante remarcar que al estar trabajando con datos polares en tres dimensiones, debemos aplicar la misma normalización la respuesta polar horizontal y vertical, así como a todos los ángulos intermedios.

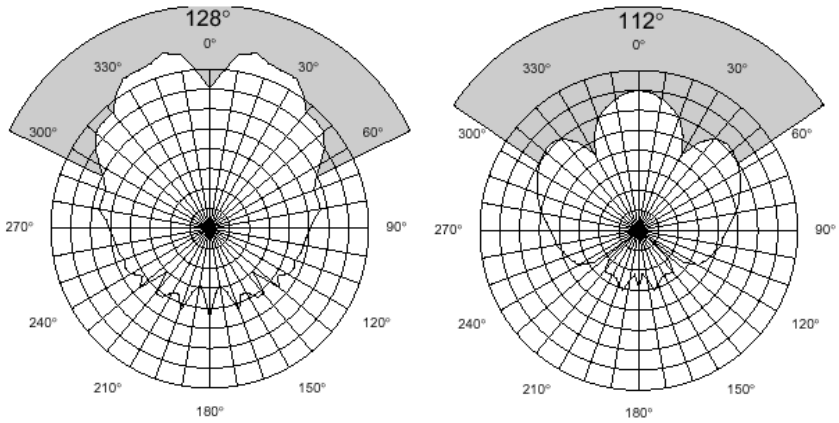
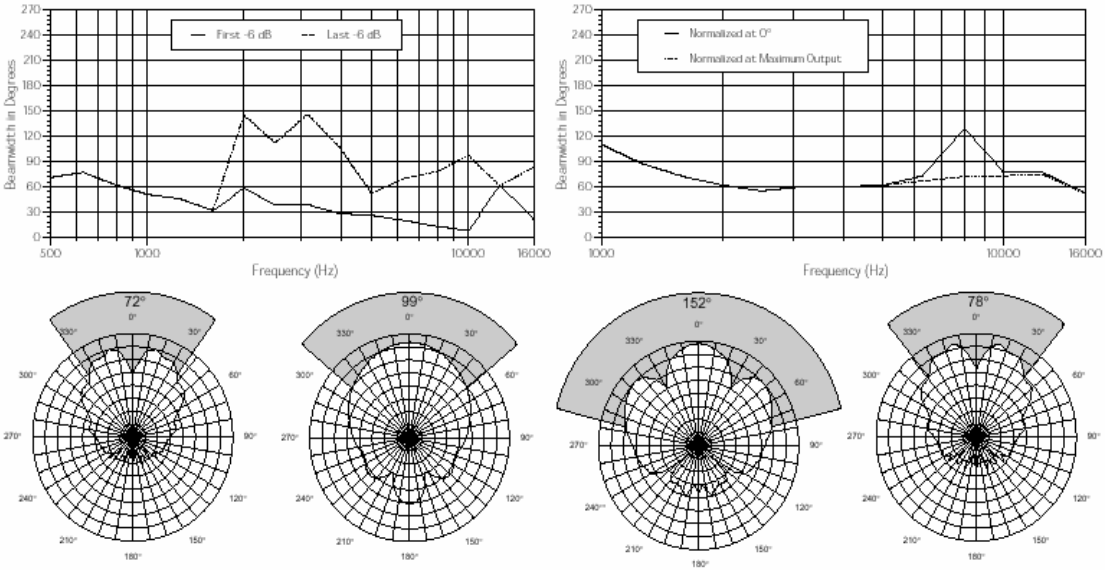


Figura A.2.

A continuación vemos el Q resultado de calcularlo incluyendo o excluyendo los baches en la respuesta. La diferencia es significativa.



También podemos ver el diagrama polar de la bocina con bache en el eje normalizada respecto al máximo nivel. Hemos pasado de un ángulo de cobertura de 128º a uno de 72º. Vemos el Q calculado para esta bocina normalizando respecto al nivel a 0º o al nivel máximo.

Sólo se puede conseguir una respuesta uniforme dentro del área a cubrir si la respuesta en potencia del sistema sobre dicho área es uniforme. Para aplicar esta normalización, normalizamos cada respuesta polar para cada frecuencia a 0dB de potencia media sobre el ángulo de cobertura. Entonces podemos determinar el ángulo de 6 dB de caída relativos a ese nivel medio. Este planteamiento tiene la pega de que no podemos calcular la respuesta en potencia sobre un ángulo que aún no hemos determinado. Por tanto, podemos utilizar una solución iterativa. Si Primero normalizamos respecto al ángulo de máxima salida, podemos calcular un primer ángulo de cobertura del que partir. Entonces podemos normalizar respecto a la potencia que hay dentro de este ángulo y volver a recalcular el ángulo de cobertura respecto a este nuevo valor de potencia media. Repitiendo el proceso hasta que el error es despreciable, conseguiremos el ángulo de cobertura correcto. Las siguientes tres curvas polares nos muestran nuestros tres primeros ejemplos normalizados de esta manera.

Como ahora estamos permitiendo baches en la respuesta polar iguales o mayores de 6 dB dentro del ángulo de cobertura, sería muy útil conocer la uniformidad de la respuesta dentro de este ángulo de cobertura. Un dato muy significativo al respecto sería calcular el error eficaz RMS sobre el ángulo de cobertura y generar un gráfico de respuesta como una función de la frecuencia.

Medición del factor de directividad o Q

Una vez que hemos conseguido calcular de manera correcta el ángulo de cobertura del altavoz y la regularidad de su respuesta dentro de dicho ángulo, nos sigue interesando saber cuánto sonido es radiado fuera del ángulo de cobertura. El factor de directividad nos indica precisamente esto. Recordemos la definición formal: “El factor de

directividad (Q) de un transductor diseñado para la emisión de sonido es la relación entre la presión sonora elevada al cuadrado, a una distancia y dirección determinadas, y la media de la presión sonora elevada al cuadrado, a la misma distancia y promediada en todas las direcciones alrededor del transductor."

Cuando se llevan a cabo medidas reales sobre altavoces reales, esta definición puede llevar a resultados erróneos. A no ser que la salida máxima del altavoz se de justo en su eje central, el Q calculado no será correcto. Como ya sabemos, el cálculo es inexacto si tenemos un bache justo en el eje. Podríamos tratar de corregir este problema promediando unos cuantos puntos de medida alrededor del eje principal, pero dependiendo del ancho y profundidad del bache en la respuesta podríamos estar mejorando o empeorando el resultado. No existe una razón clara para favorecer un único punto de medida en el centro de la dirección primaria de radiación. Queremos conocer la eficacia del altavoz en cuanto a su capacidad de proporcionarnos una cobertura uniforme sobre un ángulo especificado, con la mínima salida acústica posible fuera de dicho ángulo. Para comparar la efectividad de dos altavoces en este sentido, deberíamos calcular cuánto sonido se radia dentro del ángulo de cobertura respecto a cuanto sonido "se escapa" fuera del ángulo de cobertura. También sería de gran utilidad que el resultado fuera indepediente del ángulo de cobertura. De esta manera, un único número nos indicaría la misma pendiente de atenuación progresiva fuera del ángulo de cobertura para cualquier dispositivo. Podríamos empezar modificando la definición de Q como: "La relación entre la presión sonora media al cuadrado promediada sobre el ángulo de cobertura, a una distancia y dirección específicas, y la presión sonora media al cuadrado a la misma distancia promediada sobre todas las direcciones alrededor del transductor." Esta otra definición nos da una mejor medida de la directividad del altavoz y resuelve el problema del bache en el eje. A continuación en la figura A.3 se muestra el Q de nuestros tres ejemplos calculado de esta forma.

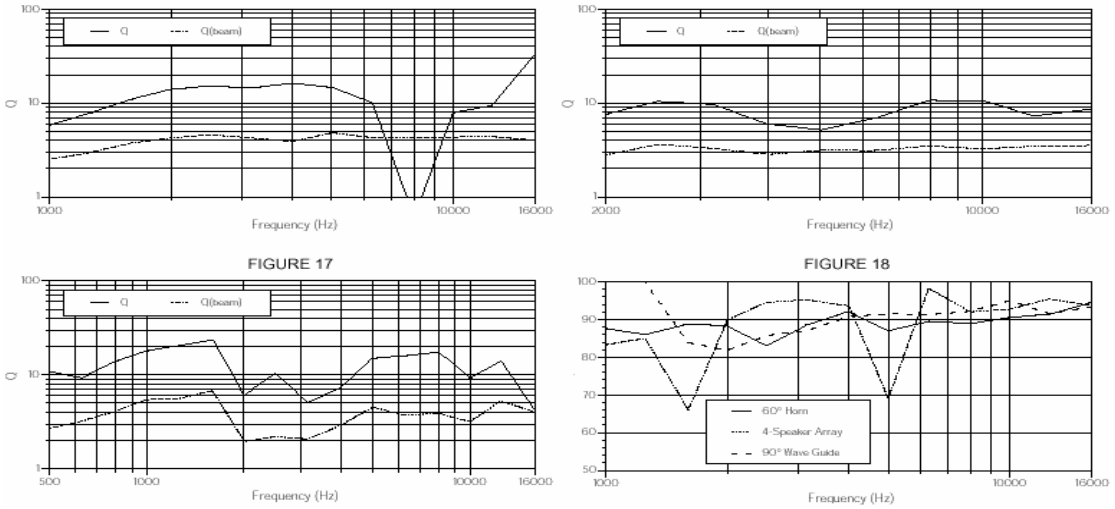


Figura A.3.

Pero el resultado sigue siendo dependiente del ángulo de cobertura. Para remediar esto, podemos comparar el resultado obtenido con el de un dispositivo que radie idealmente dentro de ese ángulo de cobertura. Si dividimos este nuevo factor Q de directividad entre el ideal y multiplicamos el resultado por 100%, tendremos un Q independiente del ángulo de cobertura que cubra el dispositivo. Para ello, debemos definir lo que entendemos como un dispositivo ideal. Para el caso que nos ocupa, se define como un dispositivo que tenga una respuesta perfectamente plana en el ángulo de cobertura, sin radiación fuera de éste.
Esta sería la manera más correcta de calcular el ángulo de cobertura y el Q. En la práctica muy pocos fabricantes realizan los cálculos mediante el procedimiento aquí descrito, ya que consume mucho tiempo si no se puede automatizar los cálculos mediante ordenador.

5. ALTAVOCES COAXIALES

Existe un tipo especial de altavoz denominado altavoz "coaxial". La palabra "coaxial" significa compartir el mismo eje. Por tanto, un altavoz coaxial es aquel que está formado por dos altavoces de modo que su colocación asegura que su eje central es común. En la figura 5.1 podemos ver una fotografía de un altavoz coaxial a modo de ejemplo. Vemos como tenemos dos altavoces, uno de graves y uno de agudos, y que están dispuestos de forma "coaxial". A continuación veremos cuáles son las ventajas que presentan este tipo de sistemas frente al clásico sistema de dos vías, basado en el montaje de dos altavoces en una caja (figura 5.2).

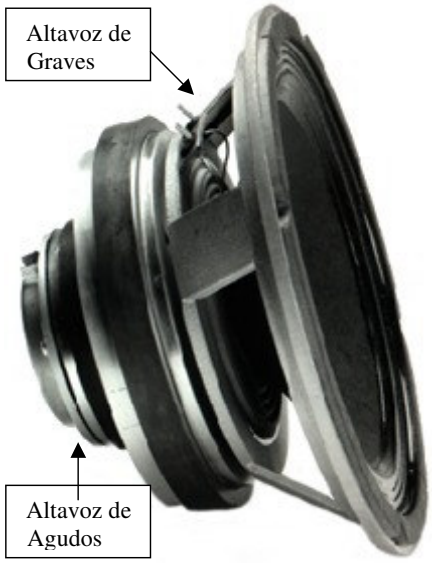


Figura 5.1. *Ejemplo de altavoz coaxial.*

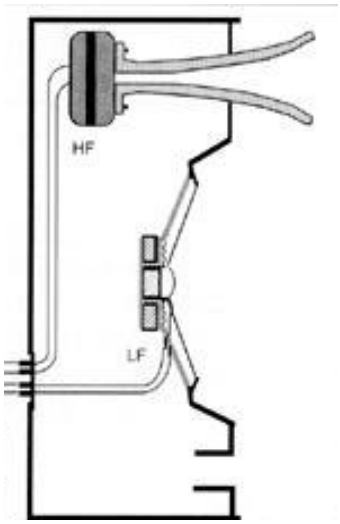


Figura 5.2. *Sistema clásico de dos vías.*

5.1. Ventajas del altavoz coaxial

Simetría: el altavoz coaxial tiene la particularidad de que su respuesta es simétrica a ambos lados de su eje. Esto quiere decir que sea cuál sea la respuesta en un determinado ángulo respecto al eje central, en el ángulo opuesto se obtendrá idéntica respuesta. Un sistema de dos vías que no sea coaxial no presenta este comportamiento. Consideremos un sistema clásico de dos vías (figura 5.2). En el eje el sistema tendrá una respuesta característica. Por encima del eje, el tiempo que tarda en llegar la señal de graves es mayor que el tiempo que tarda en llegar la señal de agudos, mientras que por debajo del eje, la situación es la inversa: llega antes la señal de graves que la de agudos. Esta asimetría no puede ser corregida mediante ningún procesado electrónico, y por tanto, el sistema no puede tener una respuesta al impulso óptima a lo largo de una gran superficie.

Transición entre vías: el altavoz coaxial presenta la característica de que la transición entre la vía de graves y la de agudos es menos problemática que en el caso de un sistema clásico de dos vías. Este hecho está relacionado con las diferencias de fase existentes entre vías: si consideramos el caso del ejemplo de sistema clásico mostrado en la figura 5.2, la distancia entre las dos unidades provoca que exista una diferencia de fase entre la señal de graves y la de agudos conforme nos alejemos hacia arriba o hacia abajo del eje central; es decir, como ya hemos visto, que una señal tarde más tiempo en llegar al oyente que la otra. En la banda de transición entre las dos vías, dónde se solapan las respuestas de las dos, estas diferencias de fase producen interferencias destructivas (baches), cuya magnitud depende de la posición relativa del punto de escucha respecto a los altavoces. En un altavoz coaxial, al estar las dos vías sobre el mismo eje, no se produce este efecto. Sin embargo, sí que existe una pequeña diferencia de fase fija entre las dos vías debido a que no se encuentran exactamente en la misma posición. En el caso de querer afinar mucho se puede llegar a compensar esta diferencia con un retardo realizado electrónicamente, mientras que en el caso del sistema clásico este tipo de ajuste no es posible debido a la variación de la diferencia de fase con la posición.

Volumen: el hecho de que el sistema esté dispuesto sobre un mismo eje posibilita la utilización de recintos de menor volumen que en el caso de un sistema clásico de dos vías, donde la disposición de los altavoces obliga a la utilización de un panel frontal de mayor superficie.

5.2. Tipos de altavoces coaxiales

A continuación vamos a ver algunas aproximaciones al concepto de altavoz coaxial, distinguiremos tres tipos:

- **Tipo A:** la unidad de agudos va montada en la parte trasera del núcleo de la unidad de graves. En primera instancia, la radiación de la unidad de agudos se produce a

través de una perforación practicada en la parte central del núcleo de graves. Este conducto de aire tiene una sección transversal creciente: desde la salida de la unidad de agudos hasta el extremo superior del núcleo de graves; de forma que se proporciona una cierta adaptación de impedancias (a modo de bocina). A la salida de este "túnel" se coloca un casquillo difusor, cuya función es la de prolongar el adaptador de impedancias que hemos practicado en el interior del núcleo de graves. Finalmente, los elementos del conjunto móvil de graves se utilizan también en beneficio de la radiación de la unidad de agudos:

- la tapita es porosa para que la atenuación de la señal sonora de la unidad de agudos sea la mínima posible.
- El cono ejerce una labor de adaptador de impedancias, al tratarse de una sección transversal que aumenta.

En la figura 5.3 vemos un ejemplo de este tipo de altavoz coaxial. Concretamente, se trata del modelo de Beyma 15"XM; en la figura 5.4 aparece la respuesta en frecuencia de este sistema. El principal inconveniente que presenta este tipo de coaxial es que el control de la directividad de la unidad de agudos no es estricto.

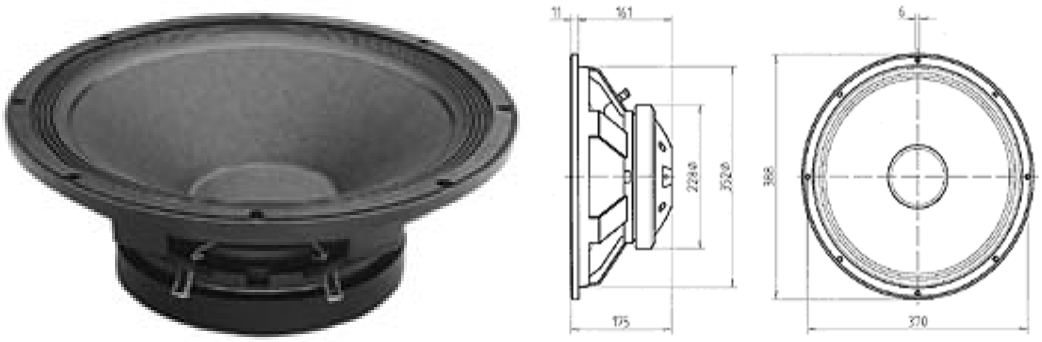


Figura 5.3. *Ejemplo de altavoz coaxial tipo A (BEYMA 15"XM).*

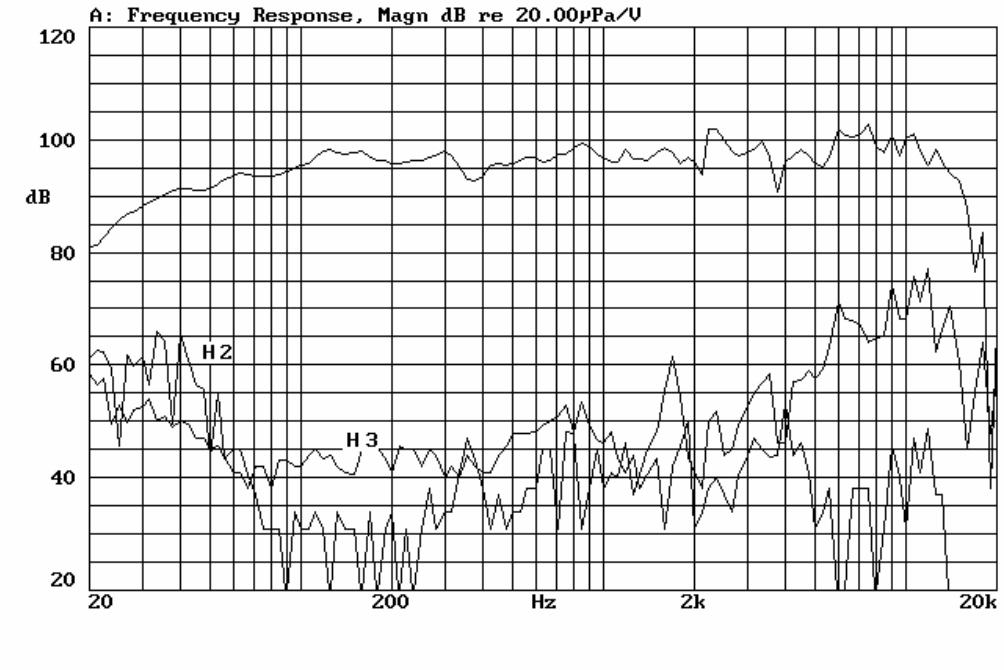


Figura 5.4. *Respuesta en frecuencia del 15"XM.*

- **Tipo B:** La unidad de agudos va montada en la parte trasera del núcleo de la unidad de graves y acoplada a una pequeña bocina que se coloca en el cono de graves. En la figura 5.5 se muestra un ejemplo de este tipo de coaxial; concretamente, se trata del modelo de Beyma 15"XT. En la figura 5.6 se muestra su respuesta en frecuencia. Este sistema presenta algunos inconvenientes característicos:

  - La proximidad del cono de graves a la bocina origina reflexiones que afectan a la respuesta en medias frecuencias, dándole una característica muy irregular.
  - Pese a que el control de la directividad de la unidad de agudos es mayor que en el caso del tipo A, sigue sin existir un control de la directividad de la unidad de graves. De esta forma, existe una diferencia importante entre la directividad de una y otra unidad.

Figura 5.5. *Ejemplo de altavoz coaxial tipo B (BEYMA 15"XT).*

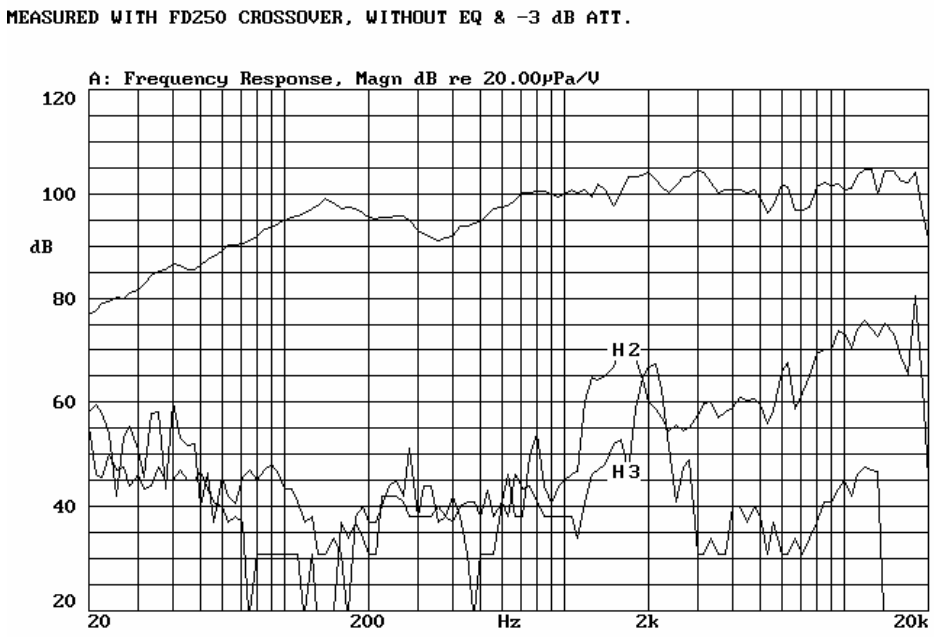


Figura 5.6. *Respuesta en frecuencia del 15"XT.*

- **Tipo C:** La unidad de agudos va montada en la parte trasera del núcleo de la unidad de graves. Tanto la unidad de agudos como la de graves llevan acopladas una bocina, de forma que la bocina de agudos está colocada dentro de la bocina de graves. En la figura 5.7 se muestra un ejemplo de este tipo de coaxial; se trata del modelo CAT59 de FRAZIER LOUDSPEAKERS. En la figura 5.8 aparece su respuesta en frecuencia. Las principales ventajas que aporta este diseño frente a los anteriores son:

- Alto rendimiento debido a que se trata de un sistema de radiación indirecta (ver sección 4): tanto la unidad de graves como la de agudos utilizan un adaptador de impedancias (bocina).
- Control preciso de la directividad de todo el sistema, al estar ambas unidades acopladas a una bocina.

Sin embargo, al ser un sistema de radiación indirecta presenta dos inconvenientes asociados a este tipo de sistemas:

- Respuesta pobre en bajas frecuencias (en el caso del ejemplo, si acudimos a la gráfica de respuesta de este sistema (figura 4.8), vemos como por debajo de 150 Hz la respuesta cae estrepitosamente. Compárese con los otros sistemas: figuras 5.4 y 5.6). De este modo, si se precisa una mayor respuesta en graves, se hace necesario utilizar un altavoz de sub-graves adicional al coaxial.
- Distorsión (asociada a la unidad de graves) mayor.

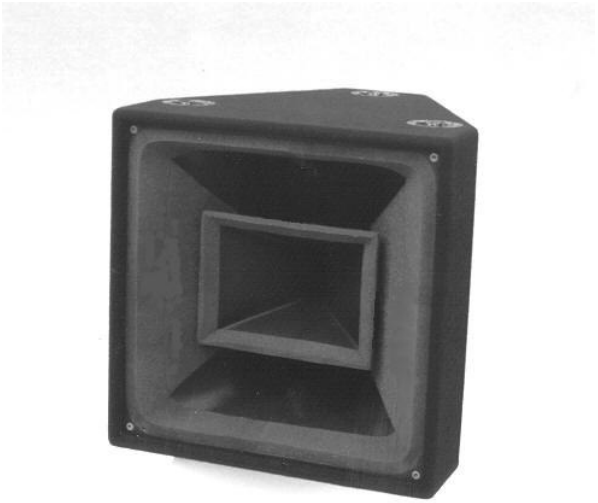


Figura 5.6. *Ejemplo de altavoz coaxial tipo C (FRAZIER CAT59).*

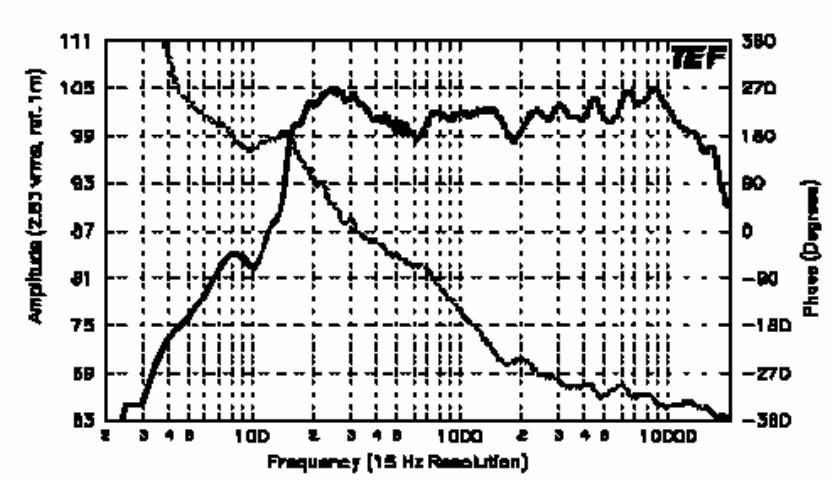


Figura 5.7. *Respuesta en frecuencia del CAT59.*

6. CAJAS ACÚSTICAS

6.1 Necesidad de las cajas

Si un altavoz comienza a radiar libremente en el aire, el cono se desplazará para producir un aumento de presión que propague la onda sonora, como ya sabemos. Al producirse este desplazamiento, en la parte trasera del cono aparecerá un cambio de presión contrario al que se produce en la parte frontal; es decir, cuando el cono se mueve hacia delante, creando un aumento de presión, por detrás se produce una disminución, y viceversa. Como la longitud de onda en graves es mucho mayor que la superficie del cono, ambas ondas sonoras se propagan en todas direcciones. Por tanto, se superpondrán y sumarán una con otra en oposición de fase. La onda sonora de la parte trasera del cono tenderá a cancelar la radiación de su parte frontal, apareciendo

una gran pérdida en graves, es decir el rango de frecuencias en el cual el altavoz radia como un pistón. En la figura 6.1 se ve claramente cómo se combinan las ondas delantera y trasera. A este fenómeno se le denomina cortocircuito acústico.

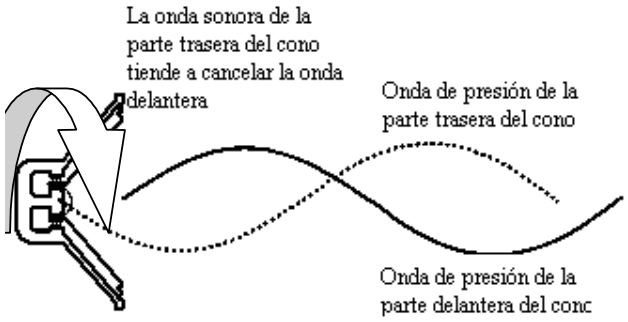


Figura 6.1. *Cortocircuito acústico*

Para evitar esto, si ponemos el altavoz en una caja, estaremos aislando la parte frontal del altavoz de su parte trasera. Así evitamos que ambas ondas sonoras se anulen. Hay muchos tipos de cajas y configuraciones posibles, pero existen sobre todo dos formas básicas que son las más extendidas y sirven como base para entender todas las demás: son la caja cerrada y la caja Bass-Reflex.

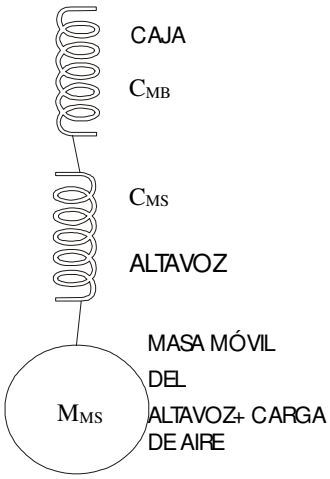


Figura 6.2*. Analogía mecánica del sistema de caja cerrada*

Haciendo una analogía mecánica, podríamos modelar el aire encerrado en la caja como un muelle elástico, en serie con otro muelle que es la suspensión del altavoz. Finalmente, tenemos una masa que es la masa móvil del altavoz (el peso de cono y bobina) junto con la carga de aire en el diafragma. Sabemos que el altavoz tiene una frecuencia de resonancia, que viene determinada por su elasticidad (suspensión) y su masa móvil. Es evidente que al introducir el altavoz en la caja, además de evitar el cortocircuito acústico, vamos a tener otra frecuencia de resonancia del sistema

conjunto, diferente a la del altavoz. Ahora dicha frecuencia estará determinada por la elasticidad total, formada por ambas elasticidades, y la masa móvil. En la figura 6.2 aparece una representación gráfica de la analogía mecánica del sistema de caja cerrada.

6.2 La caja cerrada

La solución más común en los años 40 consistía en poner el altavoz en una caja lo suficientemente grande como para simular ponerlo en una pantalla infinitamente grande. En este tipo de sistema, la elasticidad acústica del aire encerrado en la caja es mucho mayor que la elasticidad de la suspensión del altavoz. De esta forma, la frecuencia de resonancia del sistema estaba determinada únicamente por la elasticidad y la masa del altavoz.
A partir de los años 50, se comenzaron a diseñar sistemas con la caja más pequeña. La suspensión del altavoz se comenzó a fabricar de tal forma que su elasticidad fuese mayor que la de la caja, ahora mucho más compacta. Por ello, la frecuencia de resonancia del sistema está determinada por la elasticidad de la caja y la masa móvil del altavoz. Esto tiene una consecuencia muy importante: el altavoz y la caja que lo contiene ya no pueden estudiarse por separado; hay que tratarlos como un sistema inseparable.
El estudio que vamos a realizar a continuación se limita al rango de bajas frecuencias en la que el altavoz actúa como un pistón y la caja influye en el comportamiento del sistema. Veremos que el diseño y ajuste de estos sistemas está directamente relacionado con unos pocos parámetros del sistema, fácilmente medibles.

6.2.1 Efecto de la caja sobre los parámetros del altavoz

Es en la zona de frecuencias más graves donde nos va a influir totalmente la caja. Ahora tendremos unos parámetros análogos a los del altavoz, que reflejarán la influencia de la caja y el ajuste final del sistema.
Con la caja la elasticidad total del sistema va a ser:

$$C_{AT} = \frac{C_{AB} \cdot C_{AS}}{C_{AB} + C_{AS}}$$

siendo C_{AB} la elasticidad de la caja y C_{AS} la del altavoz. Para el diseño de la caja es muy importante la relación entre ambos valores de elasticidad. Observemos que, como ya mencionamos anteriormente en la introducción, si la elasticidad del altavoz C_{AS} es 3 o 4 veces mayor que la de la caja C_{AB}, la elasticidad total del sistema C_{AT} será aproximadamente igual a la de la caja, con independencia del valor de la elasticidad del altavoz. Por ello se define el parámetro α (alfa), que nos indica la relación de elasticidades del sistema:

$$\alpha = \frac{C_{AS}}{C_{AB}}$$

Así, mediante este parámetro α, podemos hallar una sencilla relación entre la frecuencia de resonancia del altavoz f_S y la nueva frecuencia de resonancia del sistema f_C :

$$f_C = f_S \cdot \sqrt{(\alpha + 1)}$$

A la hora del diseño práctico, tenemos otra frecuencia importante, que es la frecuencia de corte del sistema f_3. Esta frecuencia es aquella para la cual la respuesta del sistema ha caído 3 dB respecto al nivel que tenemos <u>*en la banda pasante*</u>, no respecto al nivel a f_C, la frecuencia de resonancia de la caja. Esto es porque el nivel a f_C cambia según el tipo de ajuste que realicemos, como se observa en la figura 6.3. Por ello siempre se toma como referencia el nivel en la banda pasante.
Y también ocurre algo parecido con el nuevo factor de calidad total del sistema, Q_{TC} :

$$Q_{TC} = Q_{TS} \cdot \sqrt{(\alpha + 1)}$$

Con estos pocos parámetros, veremos cómo se diseña la caja óptima para un altavoz dado de una forma sencilla y rápida.

6.2.2 Respuesta frecuencial y temporal

A continuación, vamos a comentar el efecto de la caja en la respuesta en baja frecuencia del altavoz. Al introducir un elemento nuevo como es la elasticidad del aire encerrado en la caja, el altavoz va a cambiar su comportamiento.

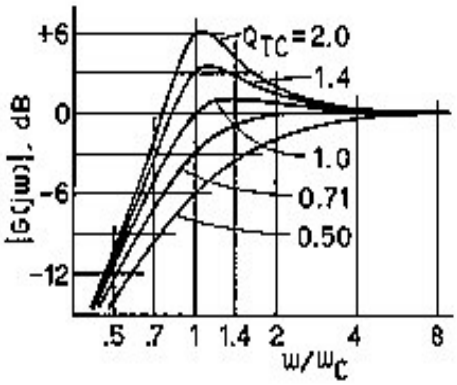


fig. 6.3. Respuesta en frecuencia

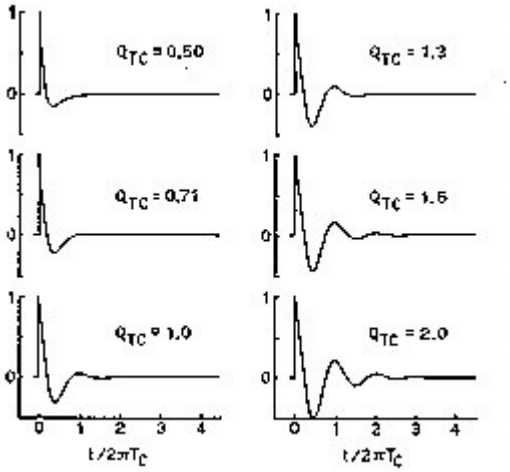


fig. 6.4. Respuesta temporal

Como podemos observar en las figuras 6.3 y 6.4, según el valor de Q_{TC}, vamos a poder ajustar la respuesta en baja frecuencia del altavoz con el volumen de la caja. Dicha respuesta es como la de un filtro pasa-altos de segundo orden, con una pendiente a partir de la frecuencia de corte de 12 dB/octava. La elección de Q_{TC} vendrá determinado por el tipo de respuesta frecuencial y temporal que deseemos. Según aumenta Q_{TC}, la respuesta en graves aumenta, produciéndose una peor respuesta transitoria, más

oscilatoria que para valores más pequeños de dicho parámetro. Así, podemos escoger el tipo de respuesta que queramos, pero sabiendo que dicha elección tendrá sus consecuencias en ambos dominios, temporal y frecuencial. Existe toda una familia de curvas de ajuste, pensadas para optimizar distintos aspectos de la respuesta del sistema. Por ejemplo, un ajuste muy utilizado es el de Butterworth, correspondiente a un Q_{TC} de 0.71($1/\sqrt{2}$), también conocido como el de respuesta máximamente plana, por ser el que consigue la frecuencia de corte más baja sin sobrepasar los 0 dB, es decir, respuesta plana. Por encima de este valor, tenemos curvas denominadas de Chebyshev, que llegan más abajo en frecuencia, pero a costa de introducir un pico en graves alrededor de la frecuencia de corte y empeorar la respuesta transitoria.

6.2.3 Rendimiento del sistema caja cerrada

El rendimiento del sistema caja cerrada se puede relacionar con la frecuencia de corte del sistema y el volumen de la caja a través de la siguiente expresión:

$$\eta_o = k \cdot f_3^{\,3} \cdot V_b$$

donde k es la constante de rendimiento, f_3 es la frecuencia de corte, y V_b es el volumen de la caja. La constante k depende de tres factores: las pérdidas del sistema (los parámetros Q), la elasticidad del sistema y el tipo de respuesta frecuencial que se quiera para el sistema. En el caso ideal, en el que las pérdidas mecánicas del altavoz y de la caja son despreciables, el Vas del altavoz es mucho mayor que el volumen de la caja y se utiliza la respuesta frecuencial que da un mayor rendimiento (Chebyshev de segundo orden), el valor de k es $2x10^{-06}$, con lo cual el rendimiento máximo para un sistema ideal de caja cerrada es:

$$\eta_o = 2 \cdot 10^{-06} \cdot f_3^{\,3} \cdot V_b$$

Esta expresión es muy importante ya que representa el límite físico inherente al sistema caja cerrada. Las implicaciones prácticas de esta limitación se pueden ver más claramente a través de una representación gráfica de esta expresión, tal como aparece en la figura 6.5. Un sistema con un volumen y una frecuencia de corte dados nunca podrá tener un rendimiento superior al señalado en la gráfica. Asimismo, un sistema con un rendimiento y un volumen dados siempre tendrá una frecuencia de corte superior a la indicada por la figura 6.5. Lo que queda claro es que un sistema real optimizado se acercará más al límite que un sistema que no lo esté. Dicha optimización se puede conseguir combinando adecuadamente varios factores:

- Escogiendo un altavoz con un Qms alto, que equivale a reducir las pérdidas mecánicas del altavoz.
- Colocando material absorbente en el interior de la caja, con lo que se aumenta el volumen aparente de la caja (ver sección 6.2.6).
- Escogiendo un altavoz con una gran Vas (gran elasticidad) en comparación con el volumen de la caja.

- Cambiando la forma de la respuesta en frecuencia de modo que para una determinada frecuencia de resonancia de la caja (fc), la frecuencia de corte (f3) sea lo más baja posible.

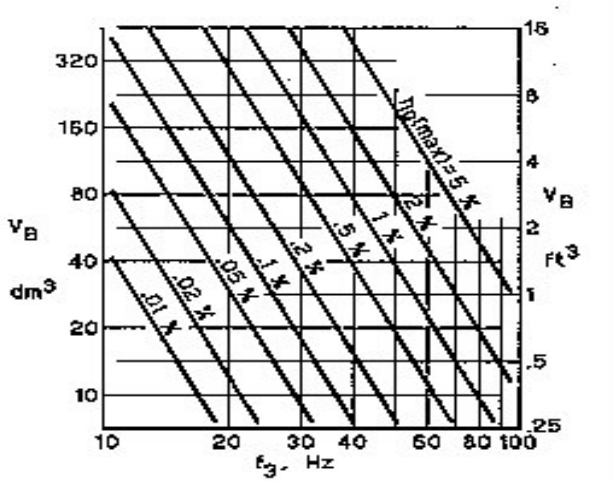


Figura 6.5. *Relación entre el rendimiento, la frecuencia de corte y el volumen de la caja para un sistema ideal de caja cerrada.*

Si optimizamos el sistema podremos obtener mayor rendimiento, menor frecuencia de corte o menor volumen de la caja, o una solución de compromiso entre estos tres factores más satisfactoria, que en el caso de un sistema no optimizado.

6.2.4 Influencia de la caja cerrada sobre el desplazamiento del cono

La función que representa el desplazamiento del cono del altavoz cuando se monta en caja cerrada es la de un filtro paso bajo de segundo orden (12 dB/octava), tal como se ve en la figura 6.6. Sin embargo, en función del Q_{TC} podremos tener un sistema más o menos amortiguado: para valores altos tendremos un desplazamiento considerable en la frecuencia de resonancia, mientras que para valores bajos conseguiremos amortiguar el desplazamiento. Esto se puede ver claramente en la figura 6.6.

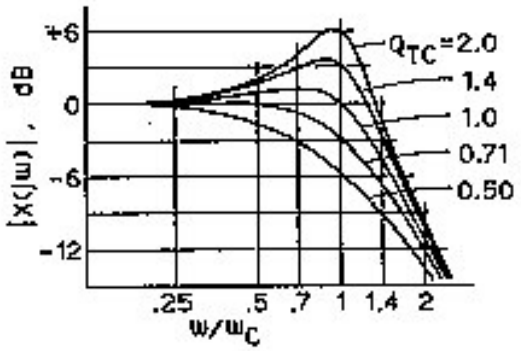


Figura 6.6. *Función de desplazamiento del cono del altavoz en caja cerrada en función de la frecuencia (normalizada a la frecuencia de resonancia del sistema) para varios valores de Q_{TC}..*

Pero, ¿qué da lugar a un determinado valor de Q_{TC}? Este parámetro, como ya se ha visto, depende de muchos factores, por lo que conviene dar unas líneas orientativas que nos digan en qué características del diseño podemos actuar para controlar el desplazamiento del cono:

- **Sobre el altavoz:** los parámetros del altavoz que influyen directamente sobre el Q_{TC} son la frecuencia de resonancia y el factor de fuerza. Así, a menor frecuencia de resonancia y menor factor de fuerza, mayor será el Q_{TC}.

- **Sobre la caja:** cuanto mayor sea el volumen de la caja respecto al volumen de aire equivalente a la elasticidad del altavoz (V_{as}), mayor será el Q_{TC}.

Se puede ver como se cumplen estas relaciones con un ejemplo práctico. Tomemos el caso del altavoz 21"L50; que montado en una caja cerrada de 200 litros presentaría la función de desplazamiento del cono correspondiente a la curva amarilla de la figura 6.7. Si modificamos algunas de sus características de la siguiente manera:

- Bajamos la frecuencia de resonancia: de 33 a 30 Hz.
- Disminuimos el Bl: de 28 a 22 N/A.
- Aumentamos el volumen de la caja: de 200 litros a 300 litros.

Debido a que con estos cambios hemos aumentado el Q_{TC} del sistema, se puede ver como aparece un pico en el desplazamiento del cono en torno a 30 Hz. En principio, dado que no sobrepasamos el Xmax del altavoz (9 mm), el comportamiento de este segundo diseño no tiene porque ser perjudicial para el altavoz; sin embargo, la mejora obtenida del ancho de banda en frecuencias graves no merece la pena, ya que se consigue a costa de una pérdida de sensibilidad ostensible, concretamente, en torno a 4 dB (ver figura 6.8).

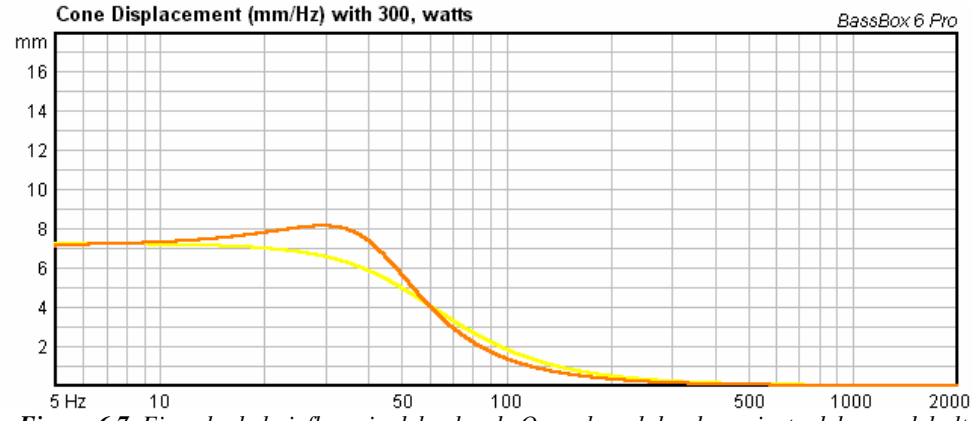


Figura 6.7. *Ejemplo de la influencia del valor de Q_{TC} sobre el desplazamiento del cono del altavoz en caja cerrada: curva amarilla – Q_{TC} = 0.64; curva naranja – Q_{TC} = 0.87.*

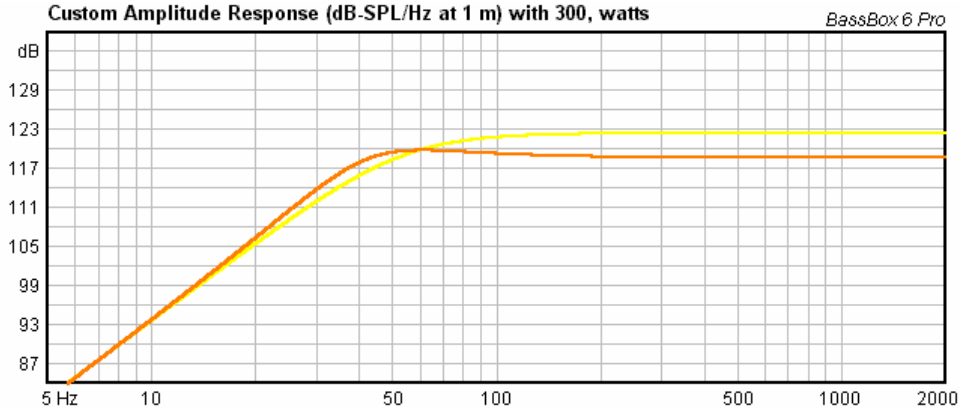


***Figura 6.8**. Pérdida de rendimiento del sistema con mayor desplazamiento del cono: curva amarilla – Q_{TC} = 0.64, SPL = 123 dB; curva naranja – Q_{TC} = 0.87, SPL = 119 dB.*

6.2.5 Limitación de potencia del sistema debido al desplazamiento del cono

La potencia eléctrica para la cual se da un sistema de caja cerrada depende de dos factores: un factor térmico, relacionado con la potencia máxima del altavoz, y un factor mecánico, que implica tanto a la caja como al altavoz. Sobre este segundo factor nos extenderemos en este punto, ya que el primero fue convenientemente tratado en la sección 2. La expresión que nos da el límite de potencia eléctrica debido al desplazamiento del cono para el caso ideal viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{ER} = \frac{0.85}{k} \cdot f_3 \cdot \frac{Vd^2}{Vb}$$

dónde k es la constante de rendimiento (ver sección X), f3 es la frecuencia de corte, Vb el volumen de la caja y Vd el volumen de desplazamiento del altavoz, que viene dado por:

$$V_d = S_d \cdot X_{\max}$$

donde Sd es la superficie del diafragma y Xmax el desplazamiento lineal máximo del altavoz. Del análisis de la primera expresión se derivan importantes conclusiones sobre como interactuan la caja y el altavoz a la hora de determinar la potencia máxima que podemos aplicar el sistema. Así, vemos cómo la utilización de una caja de gran volumen disminuye esta potencia máxima, ya que, como se ha visto antes, esto implica un mayor desplazamiento del altavoz. Por otra parte, nos encontramos con que una frecuencia de corte baja implica una disminución de la potencia. Por lo que respecta a los parámetros que son exclusivamente del altavoz, se deduce que un altavoz con un Vd alto (diafragma de gran superficie y/o gran ancho de bobinado) procura una potencia eléctrica máxima mayor.

Sin embargo, habría que puntualizar que el aumento de Vd debe ir acompañado de un aumento del volumen de la caja, ya que Vd está limitado a ser un pequeño porcentaje de Vb. Si no se cumple esta premisa, la distorsión del sistema aumenta sobremanera debido al efecto de la compresión del aire en el interior de la caja. Por otro lado, es importante darse cuenta que una mayor constante de rendimiento supone una disminución del límite de potencia, conclusión lógica si pensamos que el altavoz no necesitará tanta excitación para llegar a proporcionar la misma potencia acústica que un sistema con menor rendimiento.

Por tanto, como conclusión final del análisis cabe incidir en la necesidad de reflexionar en cada caso si una potencia eléctrica máxima mayor es una virtud o un defecto, ya que puede implicar una constante de rendimiento baja (menor rendimiento del sistema) o un alto nivel de distorsión, como ya se ha visto. Para ilustrar este análisis pondremos un ejemplo de un diseño concreto.

6.2.6 Efecto del relleno de la caja

Cuando se hace funcionar un altavoz montado en una caja, las vibraciones provocadas por éste se transmiten a las paredes de la caja, con la consecuencia de que éstas también vibran. Debido a que la caja tiene una serie de "frecuencias de resonancia", estas vibraciones pueden llegar a ser considerables a dichas frecuencias e interactuar con la señal que produce el altavoz y por tanto, alterar la respuesta en frecuencia del sistema. Con la finalidad de evitar esto, se debe recubrir las paredes internas de la caja con una capa de material absorbente, como por ejemplo fibra de vidrio o lana de roca.

Por otro lado, si la cantidad de material absorbente es considerable y su densidad es baja (pero que supere los 24 kg/m3), podemos obtener una mejora adicional en el funcionamiento del sistema, ya que el relleno provoca lo siguiente:

- **Aumento del volumen aparente de la caja:** el relleno con material absorbente provoca un cambio en las condiciones de compresión del aire en el interior de la caja, con lo que el efecto aparente es que la caja tiene un volumen mayor del dado por sus dimensiones. Aunque en teoría se puede conseguir un aumento del volumen del 40%, en la práctica no suele exceder un aumento del 25%. De este modo, podemos utilizar una caja más pequeña sin alterar el funcionamiento del sistema, o bien, si no alteramos las dimensiones de la caja, conseguir una frecuencia de corte más baja o un rendimiento mayor (recuérdese la expresión del rendimiento, sección 6.2.3).

- **Aumento de las pérdidas por amortiguamiento:** si colocamos material de densidad muy alta cerca del altavoz, la energía que puede llegar a absorber es muy alta, incrementando la resistencia de pérdidas debidas a la caja, y disminuyendo, por tanto, el Q_{TC} (ya que es inversamente proporcional a la resistencia de pérdidas). Esta disminución del Q_{TC} se puede utilizar para atenuar un posible pico de la respuesta en frecuencia.

Estas dos ventajas que nos aporta el relleno se pueden ver claramente con un ejemplo. En la figura 6.9 tenemos la respuesta en frecuencia de un 18G50 montado en caja cerrada sin y con relleno, y se puede ver como disminuye la frecuencia de corte y el Q_{TC} (la respuesta es más plana).

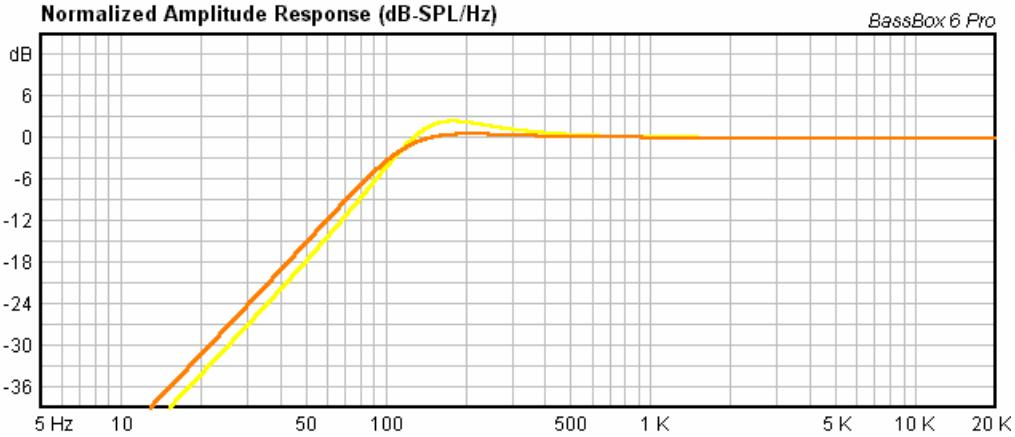


Figura 6.9. *Efecto del relleno sobre la respuesta en frecuencia de un 18"G50 en caja cerrada. Curva amarilla: sin relleno; curva naranja: con relleno.*

Sin embargo, el relleno puede acarrear un efecto negativo:

- **Aumento de la masa móvil del altavoz:** si restringimos el movimiento de aire en la parte trasera del altavoz, el desplazamiento del conjunto móvil se verá limitado y el efecto resultante será similar al de un aumento de la masa móvil del altavoz. Este aumento provocará lógicamente una disminución del rendimiento. Para evitar esto, se debe alejar el material absorbente de la parte trasera del altavoz o utilizar un material de baja densidad sin comprimir como "adaptador" entre el altavoz y las zonas del recinto más alejadas de éste.

6.2.7 Resumen de la caja cerrada – ejemplo práctico

Una regla sencilla y efectiva a la hora de diseñar una caja cerrada es que el Vas del altavoz sea varias veces mayor que el volumen de la caja, ya que de este modo conseguiremos independizar la frecuencia de resonancia del sistema (fc) de la elasticidad del altavoz. De esta forma, fc vendrá determinada por la masa móvil del altavoz y la elasticidad equivalente del volumen de la caja. Así, eliminamos la susceptibilidad del sistema frente a variaciones en la elasticidad del altavoz, parámetro bastante difícil de controlar en la realidad. Además, de este modo se consiguen cajas de volumen pequeño, que siempre es una ventaja. Este tipo de diseño se conoce como "sistema de suspensión de aire" (air-suspension system). A modo de resumen de todo lo explicado en torno a la caja cerrada, conviene analizar un ejemplo de un diseño de este tipo. Concretamente, tomaremos el 8BR40 y veremos que resultados obtenemos.

El criterio que se aplica para poder considerar el sistema como "suspensión de aire" es que el Vas sea como mínimo 3 o 4 veces mayor que el volumen de la caja (Vb). El factor que relaciona Vas y Vb se denomina α. Si tomamos un valor de 4, teniendo en cuenta que el 8BR40 tiene un Vas de 82 litros, la caja deberá tener un volumen de 20,5 litros. Por otra parte, recordemos que a partir del valor de α y los datos del altavoz podemos obtener fc y Q_{TC}:

$$f_c = f_s\sqrt{(\alpha+1)}$$

$$Q_{TC} = Q_{TS}\cdot\frac{f_c}{f_s}$$

que para α=4:

$$f_c = 2{,}24\cdot f_s$$

$$Q_{TC} = 2{,}24\cdot Q_{TS}$$

luego, dado que fs vale 31 Hz y Q_{TS} 0.48, tendremos una frecuencia de la caja de 69.4 Hz y un Q_{TC} de 1.1. Estos parámetros nos dan la respuesta en frecuencia simulada que aparece en la figura 6.10.

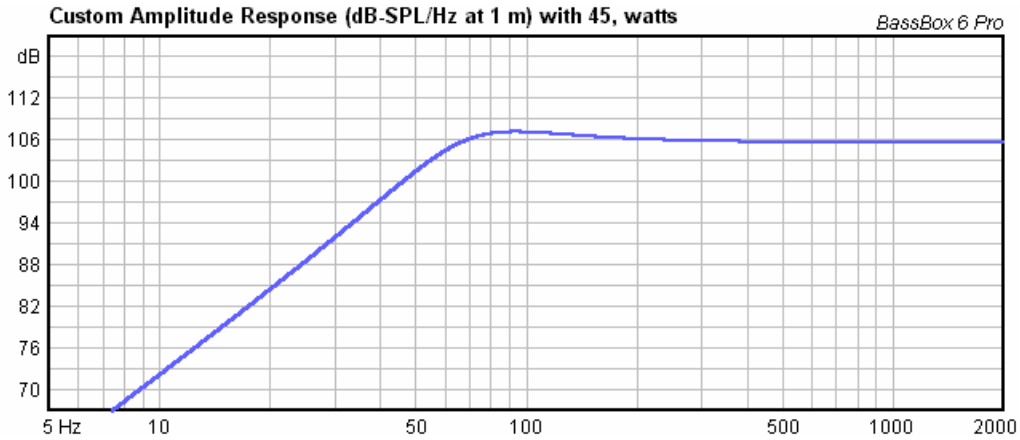


Figura 6.10. *Simulación de la respuesta en frecuencia del 8BR40 montado en caja cerrada (45W @ 1m).*

Otros aspectos del comportamiento del sistema que podemos evaluar son el desplazamiento del cono y la potencia eléctrica máxima (limitada por éste). En la figura 6.11 vemos representado el desplazamiento en función de la frecuencia al aplicar una potencia de 45 W; se aprecia como en ningún caso se sobrepasa el Xmax del altavoz (6 mm) y por tanto, estamos haciéndolo trabajar dentro del rango lineal. Otro aspecto interesante es el pico de desplazamiento que se obtiene en torno 50 Hz, debido al Q_{TC} alto (1.1).

Por otra parte, el límite máximo de potencia eléctrica que podemos aplicar al sistema sin hacerlo trabajar fuera del rango lineal viene dado en la figura 6.12, dónde vemos que podemos llegar hasta 50 W siempre que estemos por encima de 45 Hz. Dado que esta frecuencia está por debajo de f_3 (frecuencia de corte del sistema, en este caso 50 Hz), podemos aplicar 50 W sin ningún riesgo de que el comportamiento del sistema deje de ser lineal. Sin embargo, este límite viene dado por el desplazamiento del cono, no tiene en cuenta el comportamiento térmico del altavoz. Pero, dado que la potencia máxima RMS del altavoz es 50 W, el sistema está optimizado, y podremos aplicar cualquier potencia igual o inferior a 50 W sin que el nivel de distorsión aumente sobremanera ni corramos riesgo de destruir el altavoz..

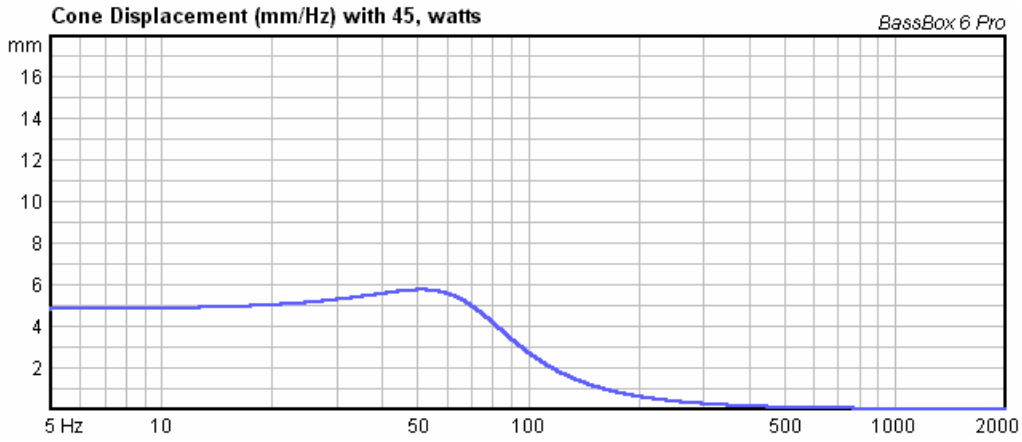


Figura 6.11. *Desplazamiento del cono del 8BR40 montado en una caja cerrada de 20.5 litros aplicando 45 W.*

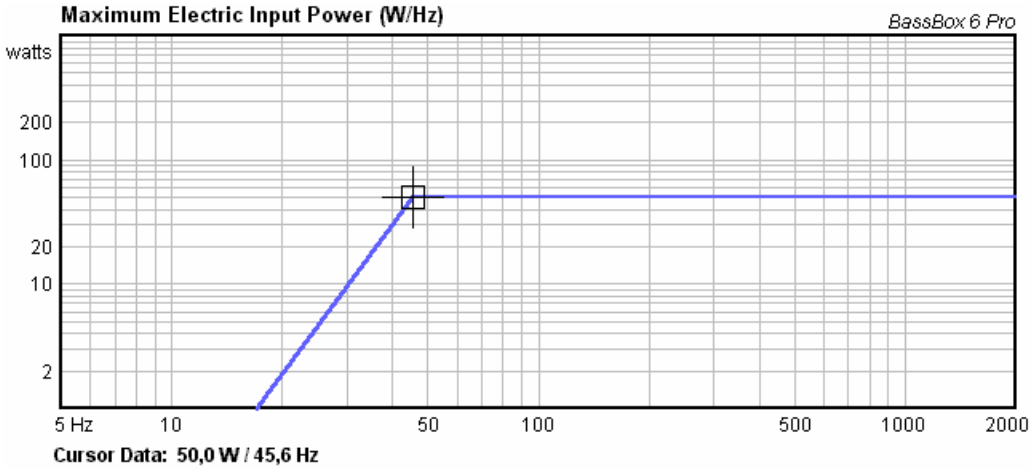
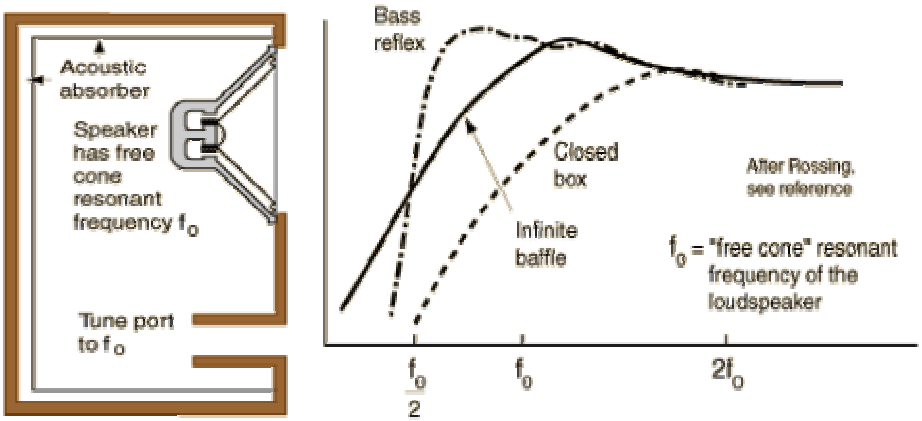


Figura 6.12. *Potencia eléctrica máxima (limitada por el desplazamiento del cono) para el 8BR40 montado en una caja cerrada de 20.5 litros.*

6.3 Sistema Bass-Reflex

En 1930, Thuras patentó el primer sistema bass reflex, que consistía en realizar una apertura más en la caja, aparte de la necesaria para colocar el altavoz, en la que se ponía un tubo, como vemos en la figura 6.13. No es hasta 1960 que se desarrolla un método práctico y preciso de diseño de este sistema. Para comprender un poco la diferencia entre dejar una apertura en la caja poniendo un tubo o no, vamos a comentar un sencillo ejemplo por todos conocido. Pensemos en una flauta. Según tapamos los agujeros, suena una nota u otra, es decir, sintonizamos la columna de aire en el interior de la flauta a una frecuencia u otra.



Figuras 6.13y 6.14 *Esquema físico y comparación del altavoz en baffle infinito, caja cerrada y Bass-Reflex*

En el sistema bass-reflex, lo que se busca es ajustar el tubo para que resuene en la zona de frecuencias donde el sistema caja-altavoz empieza a caer, consiguiendo así extender el ancho de banda del sistema total. Esto lo podemos observar en la figura 6.15, donde vemos las contribuciones individuales de altavoz y tubo, y su suma total, que es la del sistema.

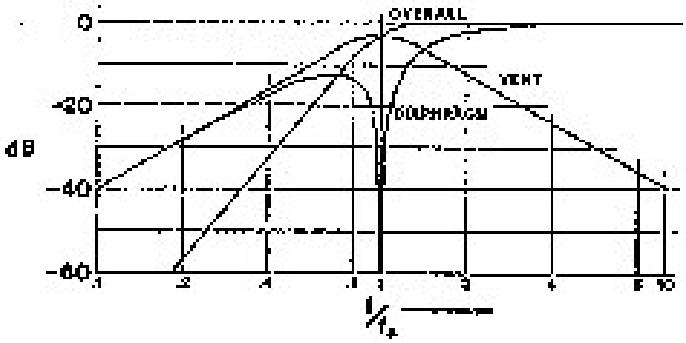


Figura 6.15. *Respuesta del altavoz, el tubo y la respuesta global del sistema*

El tubo puede ser desde una simple apertura en las paredes a un verdadero tubo, que se extiende hacia dentro en la apertura. En bajas frecuencias, el movimiento de la masa de aire encerrada en el tubo va a contribuir de forma substancial a la salida total de la caja. Esto lo podemos ver en la figura 6.14, donde tenemos comparado el altavoz en pantalla infinita, en caja cerrada y en bass-reflex. Vemos que el sistema basss-reflex llega más

abajo en frecuencia, con una pendiente más abrupta, y en caja cerrada tenemos una pendiente más suave con una frecuencia de corte más alta. Pero el sistema bass-reflex tiene la desventaja de ser muy sensible a los desajustes, siendo muy difícil de sintonizar correctamente. Estos desajustes se deben principalmente a dos causas: las pérdidas de la caja y el ajuste de la frecuencia del tubo f_B. En este tipo de sistema, la relación de elasticidades ya no es el factor más crítico, sino directamente el valor del Q_{TS} del altavoz, que será el factor de calidad total del sistema Q_T. Por tanto, es este factor de calidad del altavoz el determinante a la hora de escoger un altavoz u otro. Y por eso, como ya veremos, un Q_{TS} mayor de 0.6 o incluso de 0.4 según el V_{AS} del altavoz, nos puede llevar a un diseño irrealizable, por el tamaño del recinto o la longitud del tubo necesarios para un correcto ajuste del sistema.

6.3.1 Respuesta en frecuencia y en el tiempo

El sistema bass reflex se comporta como un filtro paso-alto de 24 dB/octava. Este hecho fundamental determina el margen disponible de respuesta en frecuencia, fase y respuesta transitoria. Mediante la adecuada elección de parámetros, podemos ajustar el sistema para tener una pendiente muy abrupta y frecuencia de corte baja tipo Chebyshev, o convertir el sistema en un filtro de tercer orden, con una pendiente suave y una respuesta muy plana tipo Butterworth. En las figuras 6.16 y 6.17 tenemos varias curvas análogas a las de caja cerrada pero de órden mayor (24dB/oct en lugar de 12dB/oct), con su correspondiente respuesta temporal. Las curvas de ajuste frecuencial están desplazadas para poder observarlas con claridad, pero todas están realmente ajustadas a la misma frecuencia de corte.

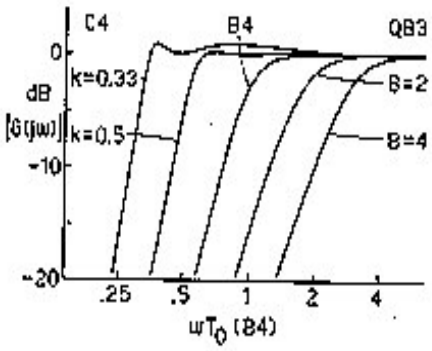


fig.6.16. Respuesta en frecuencia

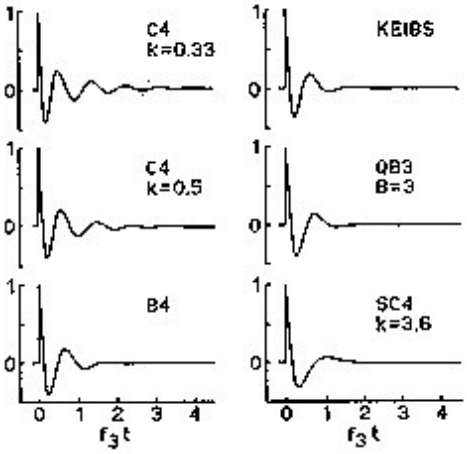


fig. 6.17. Respuesta temporal

Si idealmente no tuviésemos pérdidas de ningún tipo, el ajuste a la curva deseada se consigue mediante el ajuste de los siguientes cuatro parámetros:

- f_S, la frecuencia de resonancia del altavoz.
- Q_T, factor de calidad del sistema, que es igual al Q_{TS} del altavoz en el sistema bass-reflex.
- $\alpha = C_{AS} / C_{AB}$, la relación de elasticidades ya mencionada en caja cerrada.

- $h = f_B / f_S$, siendo f_B la frecuencia de resonancia de la caja con el tubo.

Combinando estas cuatro variables, podemos obtener la curva de ajuste del sistema que deseemos. Pero una vez que fijemos uno de estos cuatro parámetros, existe una única combinación de los cuatro que nos da la curva deseada. En la figura 6.18 podemos observar esta relación, teniendo el parámetro α como variable independiente. En esta gráfica es donde podemos observar lo que ocurre al tener un altavoz con un Q_{TS} alto y, por tanto, un Q_T del sistema alto. Recordando que $\alpha = C_{AS} / C_{AB} = V_{AS} / V_B$, pensemos por ejemplo en un altavoz como el 15KX, un altavoz coaxial. La unidad de graves de este altavoz tiene un $Q_{TS}=0.5$ y un V_{AS} de 200 litros. Por tanto, para un correcto ajuste del sistema, si buscamos el valor de α que se ajuste a este Q_{TS}, vemos que $\alpha = 0.6$ aproximadamente. Esto da un volumen de caja $V_B = V_{AS}/\alpha = 200/0.6 = 340$ *litros*. Y esto sin introducir el factor de pérdidas de la caja. Evidentemente, este altavoz no resultaría adecuado para un sistema bass-reflex. Estos dos valores, Q_{TS} y V_{AS} del altavoz, son una guía excelente para escoger el altavoz adecuado a nuestras necesidades.

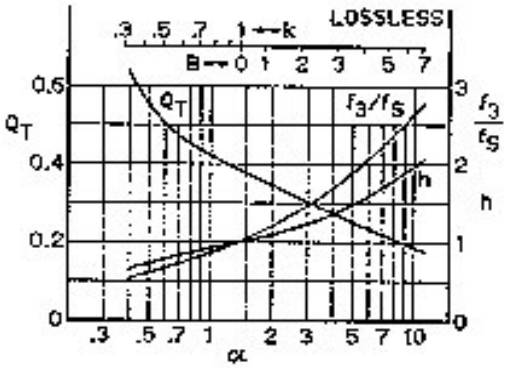


Figura 6.18. *Alineaciones posibles de los cuatro parámetros que determinan el ajuste del sistema*

En resumen, tenemos más variables con las que jugar y por tanto, mayor libertad para conseguir respuestas mejores que en caja cerrada para el mismo volumen, pero su ajuste es mucho más delicado y crítico. Vamos a ver qué sucede si no realizamos correctamente el ajuste final.

6.3.1.1 Pérdidas del recinto acústico

En cualquier sistema bass-reflex vamos a tener tres tipos de pérdidas:

⇒ Pérdidas por absorción
⇒ Pérdidas por fugas
⇒ Pérdidas por el puerto o tubo

Estos tres factores se suman para formar un único factor denominado Q_L, que es el que se obtiene al medir el sistema real para estimar su valor. El efecto de este factor de pérdidas puede ser muy importante en el resultado final de la caja. Su valor es suficientemente importante como para tenerlo en cuenta a la hora de diseñar el sistema. En la figura 6.19

tenemos un esquema similar al de la figura 6.18, pero ahora teniendo en cuenta el factor de pérdidas $Q_L = 7$.

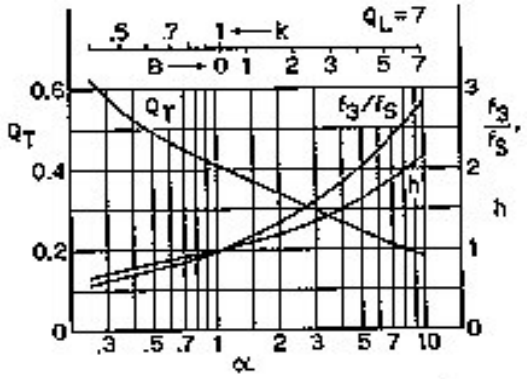


Figura 6.19. *Alineaciones posibles de los cuatro parámetros que determinan el ajuste del sistema teniendo en cuenta el factor de pérdidas Q_L*

Vemos en el gráfico 6.19 que, para tener en cuenta la influencia de las pérdidas de la caja, vamos a necesitar un Q_T mayor y un α menor que los calculados sin pérdidas. Podemos adelantar ya que los valores típicos del factor de pérdidas Q_B suelen estar en el rango de 5 a 10, tomándose habitualmente un valor de 7 como valor inicial para el cálculo teórico.

Esta estimación es sólo válida para sistemas en los que las pérdidas se pretenden mantener en el mínimo posible. No se puede aplicar el método de diseño explicado en este texto en caso de grandes pérdidas, material absorbente en el tubo o cajas muy llenas de fibra. Para esos casos hay que realizar cálculos y estimaciones más complejos. En ese caso, el método aquí expuesto serviría como un punto de partida, al que luego habría que aplicar una serie de correcciones según el caso.

6.3.1.2 Efectos del desajuste de la respuesta

En la figura 6.18 podemos observar los efectos del desajuste para distintos porcentajes de error respecto al Q_T teórico seleccionado. En la figura 6.19 vemos el efecto producido por un incorrecto ajuste de la frecuencia del tubo. De ahí que en múltiples ocasiones, nos encontremos con cajas a las que se le acusa de "sonar a tubo". Al estar incorrectamente ajustadas, se produce un pico en la respuesta que enmascara y destaca excesivamente.

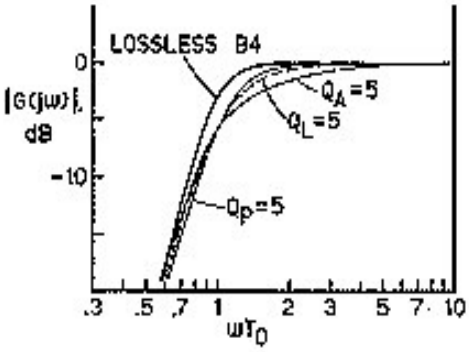


Figura 6.18 *Desajuste debido a pérdidas por la caja*

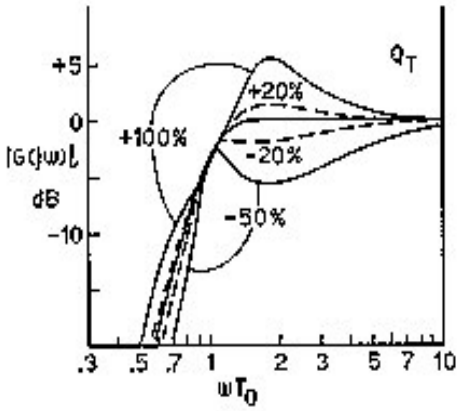


Figura 6.19*. Desajuste debido a pérdidas por el tubo*

6.3.2 Requerimientos del tubo

El tubo de un sistema bass-reflex debe proporcionarnos la frecuencia de resonancia de la caja necesaria f_B. También nos debe proporcionar una velocidad del aire a través del mismo que no nos cause excesivas pérdidas o distorsión debido a turbulencias en su interior. Estas turbulencias se pueden evitar ajustando el área del tubo a un valor mínimo que evite que el aire adquiera una velocidad excesiva. Un valor límite experimental es un 5% de la velocidad del aire, siempre que el interior del tubo no tenga irregularidades y los bordes del mismo estén redondeados con un radio razonable. Esta limitación de la velocidad también nos asegura unas pérdidas aceptables, siempre que el tubo no esté excesivamente obstruido. La fórmula que nos da el área mínima del tubo S_V para cumplir este criterio es:

$$S_V \geq 0.8 \cdot f_B \cdot Vd$$
$$d_V \geq \sqrt{(f_B \cdot V_D)}$$

donde S_V está en m^2 o d_V es el diámetro del tubo circular en metros. V_D debe estar en m^{3}y f_B en hercios. Esta fórmula es sólo aproximada, para darnos un punto de partida bastante válido, sin ser una ley rígida e infalible.
Una vez determinado el área del tubo, debemos ajustar su longitud para conseguir sintonizarlo a la frecuencia correcta. Existen varias fórmulas y procesos para calcular el tubo. En la figura 6.20 se muestra una carta de ajuste basada en uno de estos métodos. Basta con unir con una línea el volumen de caja requerido V_B con la frecuencia de resonancia deseada f_B y encontrar la intersección con el eje L_V/S_V. Veamos un ejemplo para V_B = 57 dm^3 (litros) y f_B = 40 Hz. Después de trazar la línea que une ambos valores y llevarla hasta el eje L_V/S_V, debemos trazar una línea horizontal hasta llegar a una de las curvas de la derecha. Esta curva nos indica el valor mínimo necesario de S_D. El valor de la longitud del tubo L_V lo podemos leer en el eje horizontal de la misma gráfica en cm. Siguiendo con el ejemplo, si escogemos un diámetro de 10 cm. para el área S_V, la longitud requerida es de aproximadamente 17.5 cm.

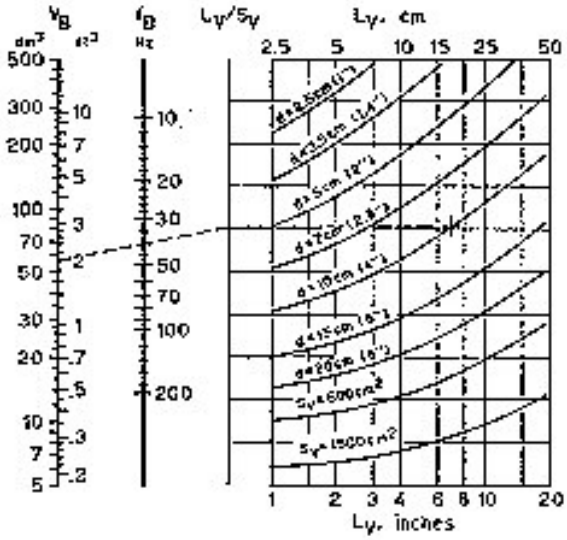


Figura 6.20. *Carta de cálculo de la sección y longitud del tubo*

Obsérvese que para un volumen de caja muy pequeño y una frecuencia de resonancia muy baja, no podemos obtener unos valores de tubo reales que nos permitan obtener el comportamiento deseado. Y no se debe intentar solucionar un volumen demasiado pequeño con un tubo excesivamente largo que pueda dar origen a resonancias no deseadas.

6.3.2.1 Cajas con carga resistiva en el tubo

Algunos diseñadores y fabricantes colocan material poroso u absorbente en el tubo, para intentar disminuir la velocidad del aire, intentar conseguir el mismo efecto que un tubo más largo o algún otro criterio similar. Al dificultar el paso libre del aire a través del tubo, se están desajustando todos los cálculos previamente realizados, y tan sólo aumentamos las pérdidas, obteniendo frecuencias de corte más altas y necesitando un altavoz con un Q_{TS} todavía más bajo que el calculado teóricamente. Además, al salir menos aire por el tubo, obligamos al altavoz a radiar más a la frecuencia de ajuste del tubo f_B , de lo que lo haría si el tubo no tuviera obstáculos en su interior. Por todo ello, no resulta conveniente colocar materiales absorbentes en el tubo.

6.3.3 Rendimiento del sistema bass-reflex

El rendimiento del sistema bass-reflex se puede relacionar con la frecuencia de corte del sistema y el volumen de la caja a través de la siguiente expresión:

$$\eta_o = k \cdot f_3^{\,3} \cdot V_b$$

dónde k es una constante de rendimiento, f_3 es la frecuencia de corte, y V_b es el volumen de la caja. La constante k depende de dos factores: las pérdidas del sistema (los parámetros Q) y el tipo de respuesta frecuencial que se quiera para el sistema. En el caso ideal, en el que las pérdidas mecánicas del altavoz y de la caja son despreciables y se utiliza la respuesta frecuencial para el sistema que da un mayor rendimiento, el valor de k es 3.9x10e-06, con lo cual el rendimiento máximo para un sistema ideal bass-reflex es:

$$\eta_o = 3.9 \cdot 10^{-06} \cdot f_3^{\,3} \cdot V_b$$

Esta expresión es muy importante ya que representa el límite físico inherente al sistema bass-reflex. Si comparamos esta expresión con la dada para el caso de la caja cerrada, vemos como el rendimiento para el caso de la caja bass reflex es mayor, aunque se mantiene la misma interrelación entre el rendimiento, la frecuencia de corte y el volumen de la caja. La representación gráfica de esta expresión aparece en la figura 6.21. Un sistema con un volumen y una frecuencia de corte dados nunca podrá tener un rendimiento superior al señalado en la gráfica. Asimismo, un sistema con un rendimiento y un volumen dados siempre tendrá una frecuencia de corte superior a la indicada por la figura 6.21. Esto es debido a que en la práctica las pérdidas mecánicas del altavoz y la caja no son despreciables, así como no siempre se utiliza el tipo de respuesta frecuencial que da el rendimiento máximo.

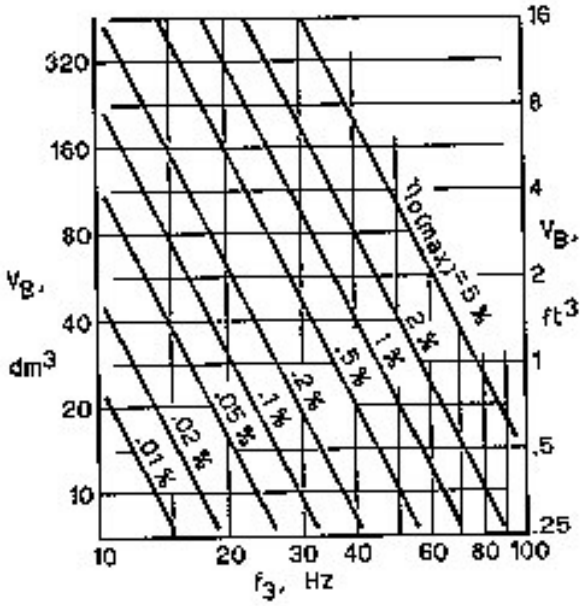


Figura 6.21. *Relación entre el rendimiento, la frecuencia de corte y el volumen de la caja para un sistema ideal bass-reflex.*

6.3.4 Influencia de la caja bass-reflex sobre el desplazamiento del cono

La función que representa el desplazamiento del cono del altavoz cuando se monta en caja bass reflex es la de un filtro paso bajo con una respuesta muy peculiar: tiene un bache a la frecuencia de sintonización del tubo (fb) y a partir de ahí, una pendiente de segundo orden (12 dB/octava), tal como se ve en la figura 6.22. Sin embargo, en función de α (la relación entre el Vas del altavoz y el volumen de la caja) podremos tener un sistema más o menos amortiguado: para valores altos tendremos un desplazamiento considerable a ambos lados de la frecuencia de sintonización, mientras que para valores bajos conseguiremos amortiguarlo. Esto se puede ver claramente en la figura 6.22. Además, otro fenómeno interesante es que las pérdidas de la caja contribuyen a incrementar el desplazamiento en fb; en la figura 6.22 se compara la función de desplazamiento de un sistema sin pérdidas (ideal), que correspondería a la curva B4, y un sistema con pérdidas (QL=5), y se observa como en el segundo caso el bache está suavizado (el desplazamiento es menor).

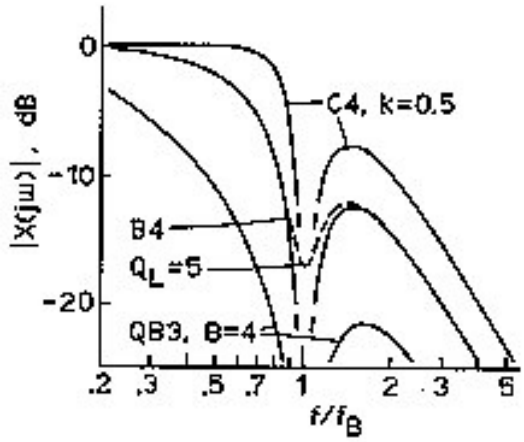


Figura 6.22 *Función de desplazamiento del cono del altavoz en caja bass reflex en función de la frecuencia (normalizada a la frecuencia de sintonización del tubo) para varios valores de* α *(*$\alpha_{C4} > \alpha_{QB3}$*).*

El hecho de que haya una disminución abrupta del desplazamiento del cono en fb es debido a que en esta frecuencia la práctica totalidad del sonido está siendo radiado por el tubo, no por el altavoz. Por otro lado, por debajo de fb, se observa como el incremento del desplazamiento es desmesurado. Este comportamiento hace que el sistema bass reflex sea muy sensible a las frecuencias muy graves, lo que obliga a utilizar un filtro paso alto para eliminar todas aquellas frecuencias que estén fuera de la frecuencia de corte del sistema (fuera del rango de utilización), que sólo pueden producir ruidos perturbadores e incluso provocar la destrucción del altavoz.

Para ilustrar estos conceptos, tomemos un ejemplo: si montamos un 18 G550 en una caja de 150 litros y aplicamos 750 W, tendremos el desplazamiento del cono que aparece en la figura X representado como una curva de color azul. En la figura se aprecia claramente el bache en fb (38 Hz), y el crecimiento descontrolado del

desplazamiento por debajo de fb (a 20 Hz, el desplazamiento es de 21.5 mm, siendo el Xmax 9 mm). Dado que el Vas del altavoz es 210 litros, el valor de α para este ejemplo es de 1.4. Si cambiamos el volumen de la caja a 70 litros, α vale 3 y obtenemos la función de desplazamiento que aparece representada en la figura 6.23 con color amarillo. En este caso, queda patente como el aumento de α provoca un amortiguamiento del desplazamiento.

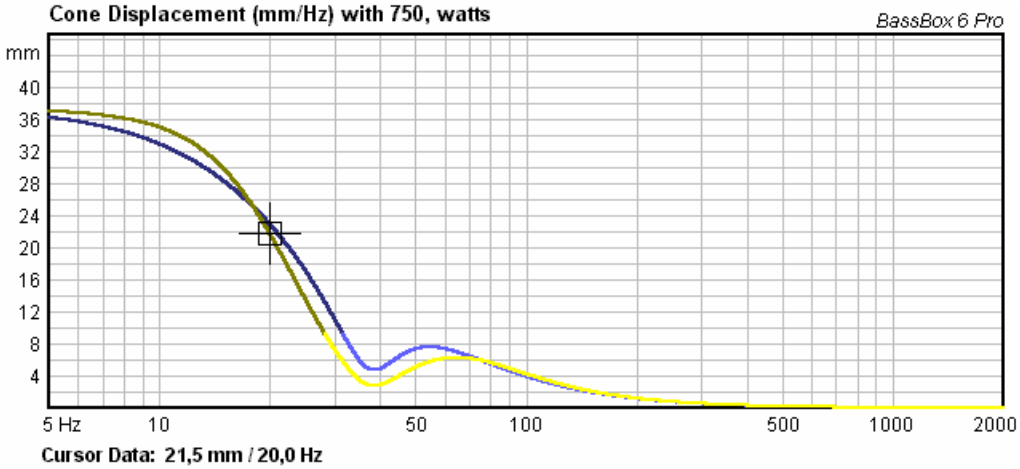


***Figura 6.23**. Ejemplo de la influencia del valor de α sobre el desplazamiento del cono del altavoz en caja bass-reflex: curva amarilla – α=3; curva azul – α=1.4.*

6.3.5 Limitación de potencia del sistema debido al desplazamiento del cono

La expresión que nos da el límite de potencia eléctrica debido al desplazamiento del cono para el caso ideal de sistema bass reflex viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{ER} = \frac{3}{k} \cdot f_3 \cdot \frac{Vd^2}{Vb}$$

donde k es la constante de rendimiento, f3 es la frecuencia de corte, Vb el volumen de la caja y Vd el volumen de desplazamiento del altavoz. Si comparamos con la expresión dada para la caja cerrada, vemos como para un mismo altavoz y volumen de caja, la potencia máxima que podemos aplicar al altavoz sin que deje de trabajar en el rango lineal es mayor para el caso de la caja bass reflex. Esto tiene su causa en que la presencia del tubo amortigua el desplazamiento del cono, como ya se ha visto, y por tanto, la potencia que podemos aplicar sin que el comportamiento deje de ser lineal es mayor.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el caso de la caja bass reflex el volumen de aire que mueve el tubo se suma al volumen de desplazamiento del altavoz, y por tanto, la precaución de que Vb sea mucho mayor que Vd para evitar que aumente la

distorsión (por el efecto de compresión del aire en el interior de la caja, ya visto en el caso de caja cerrada), es más restrictiva en el caso de caja bass reflex.

6.3.6 RESUMEN CAJA BASS REFLEX - EJEMPLO PRÁCTICO

Como punto final de la explicación del sistema bass reflex pondremos un ejemplo de un diseño e iremos analizando los resultados en función de los aspectos que se han cubierto a lo largo de esta sección. Además, al mismo tiempo, presentaremos los resultados obtenidos con el mismo altavoz montado en una caja cerrada del mismo volumen, de modo que podamos realizar una comparación del sistema bass reflex respecto al sistema de caja cerrada, destacando sus ventajas e inconvenientes.

Para el ejemplo tomamos el 12''B100/R que, con un Q_{TS} de 0.3, es un altavoz válido para caja bass reflex (en la sección 6.3.1, ya se aclaró que para valores de Q_{TS} superiores a 0.4 es difícil ajustar la respuesta en frecuencia del sistema). A partir de la figura 6.24, dado que conocemos el Q_{TS} del altavoz obtenemos α, f_3/fs y h, siendo h = fb/fs. Para el caso que nos ocupa, los valores que obtenemos son:

$$\alpha = 3$$

$$\frac{f_3}{f_s} = 1{,}6$$

$$h = 1{,}3$$

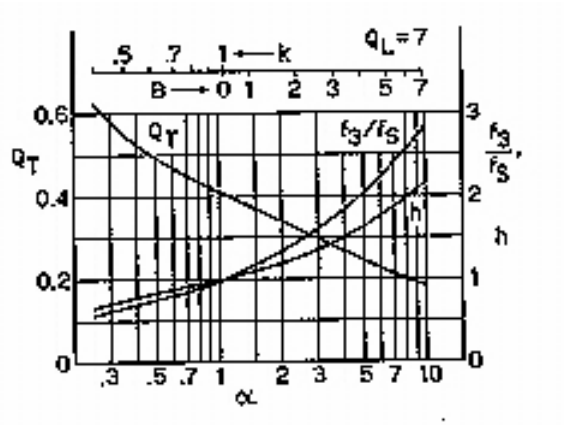


Figura 6.24. *Relación necesaria entre Q_{TS}, f_s, f_3 y h para conseguir un alineamiento adecuado del sistema bass-reflex.*

Por tanto, a partir de estos datos y las especificaciones del altavoz , V_{as} = 154 litros y fs = 29 Hz, obtenemos el volumen de la caja, la frecuencia de corte y la frecuencia de sintonización:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha} = \frac{154}{3} = 51{,}3 \approx 51 \text{ litros}$$

$$f_3 = 1{,}6 \cdot f_s = 1{,}6 \cdot 29 = 46{,}4 \approx 46 \text{ Hz}$$

$$f_b = h \cdot f_s = 1{,}3 \cdot 29 = 37{,}7 \approx 38 \text{ Hz}$$

Con estos valores, el sistema presenta una respuesta frecuencial que corresponde a la curva azul de la figura 6.25. Si hacemos un diseño análogo en caja cerrada, utilizando el mismo volumen de caja, la respuesta que obtenemos es la curva naranja de la figura 6.25. A través de este ejemplo, se aprecia claramente una de las ventajas del sistema bass-reflex frente a la caja cerrada: se obtiene un mayor ancho de banda, es decir, conseguimos extender la respuesta del sistema en frecuencias graves.

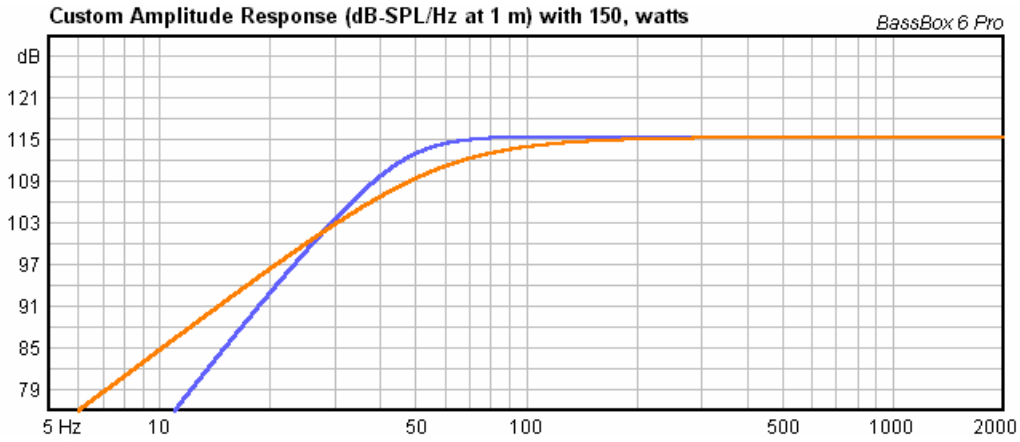


Figura 6.25. *Respuesta en frecuencia del 12 B100/R (150 W @ 1m) para dos sistemas diferentes: a) curva naranja, caja cerrada; b) curva azul, caja bass-reflex.*

Si comparamos el desplazamiento del cono de cada diseño (ver figura 6.26), llegamos a una conclusión que corrobora la anterior: dado que en el sistema bass-reflex el desplazamiento está amortiguado en fb, el ancho de banda del sistema es mayor. En el caso del ejemplo en caja cerrada, si aplicamos 150 W por debajo de 60 Hz estamos sobrepasando el Xmax del altavoz, mientras que gracias al amortiguamiento que proporciona la caja bass-reflex, el Xmax sólo se sobrepasa para frecuencias inferiores a 30 Hz. Sin embargo, en el ejemplo también queda patente una de las desventajas del sistema bass-reflex: la alta sensibilidad del sistema a las frecuencias muy graves; veáse cómo aumenta el desplazamiento por debajo de fb, 38 Hz.

Pero, el amortiguamiento del desplazamiento no sólo contribuye a extender el ancho de banda, sino que hace aumentar la potencia que podemos aplicar al sistema. En la figura 6.27, se compara la potencia máxima de la caja bass-reflex frente a la de la caja cerrada. En frecuencias medias, dónde el desplazamiento es pequeño, esta potencia viene determinada por el comportamiento térmico del altavoz, y por tanto de su potencia máxima RMS, 150 W. Sin embargo, en frecuencias graves, dónde el desplazamiento es

mayor, la potencia está limitada por éste, como ya se ha visto. En el caso de caja cerrada, la frecuencia por debajo de la cual la potencia empieza a ser menor de 150 W es 56 Hz, mientras que en el caso de caja bass-reflex, es 33 Hz.

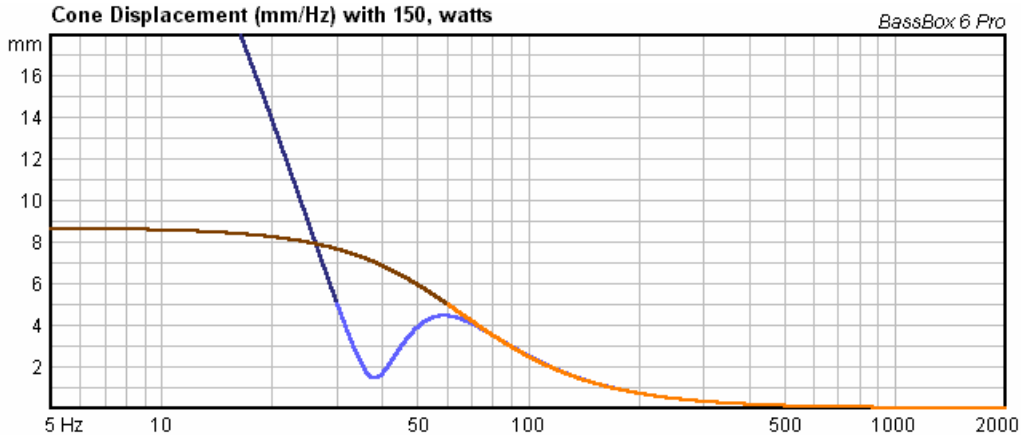


Figura 6.26 *Desplazamiento del cono del 12 B100/R aplicando 150 W para dos sistemas diferentes: a) curva naranja, caja cerrada; b) curva azul, caja bass-reflex.*

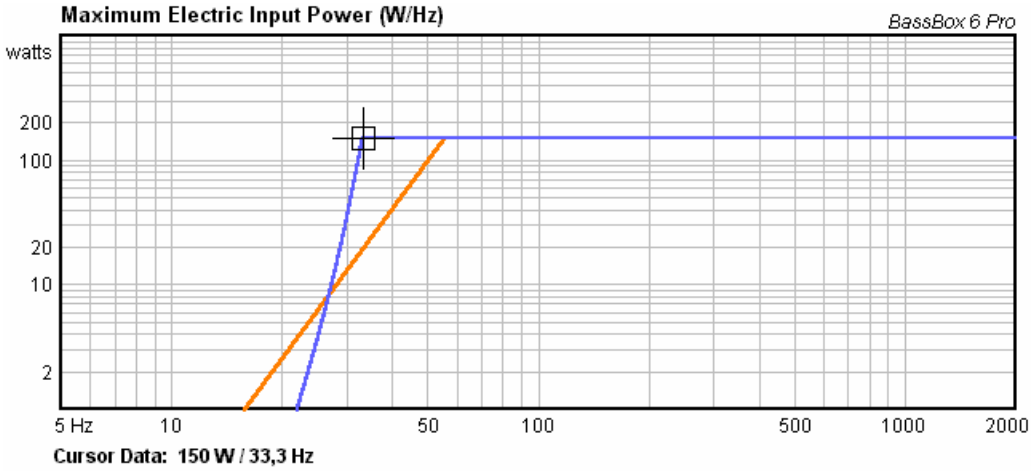


Figura 6.27. *Potencia máxima limitada por el desplazamiento del 12 B100/R para dos sistemas diferentes:*
a) curva naranja, caja cerrada; b) curva azul, caja bass-reflex.

Sin embargo, a pesar de las ventajas de la caja bass-reflex, ésta tiene un inconveniente importante, y es que es más difícil de diseñar y de llevar a la práctica que la caja cerrada. La dificultad del diseño estriba en saber seleccionar un altavoz apropiado, ya que en función de los parámetros del altavoz habrá casos en que no se podrá ajustar la respuesta frecuencial si no es a través de diseños irrealizables. Esto se puede ver claramente a través de un ejemplo: en el caso del 8"BX, la unidad de graves tiene un Q_{TS} de 0.68, valor demasiado alto para caja bass-reflex según lo comentado en las secciones 6.3 y 6.3.1 . Si pese a ello, intentamos montarlo en caja bass-reflex, nos va a resultar imposible ajustar la respuesta frecuencial. De hecho, si intentamos utilizar la

gráfica 6.24 para diseñar la caja, nos damos cuenta de que no contempla la utilización de un valor de Q_{TS} tan alto. Si pasamos este hecho por alto y consideramos que para Q_{TS}>0.6 el valor de α viene dado por el mínimo dado en la gráfica (0.2), esto nos llevaría a un volumen de caja de 115 litros, ya que el V_{as} del altavoz es 23 litros. Este volumen es excesivo para un 8", ya que el desplazamiento del cono sería exagerado. En la figura 6.28 se puede ver qué desplazamiento obtendríamos con esta caja, quedando patente lo inadecuado del diseño: por debajo de 90 Hz se supera el Xmax del altavoz. Además, la respuesta frecuencial obtenida con esta caja es muy irregular (ver figura 3.29). Si utilizamos una caja más pequeña, con el fin de evitar que el desplazamiento sea tan grande, seguimos teniendo el problema de que no se puede conseguir una respuesta en frecuencia óptima. Así, en la figura 6.29 se puede ver como para dos volúmenes de caja distintos, 20 y 40 litros, la respuesta obtenida presenta irregularidades.

Figura 6.28. *Desplazamiento del cono de un 8"BX montado en una caja bass-reflex de 115 litros (aplicando 100 W).*

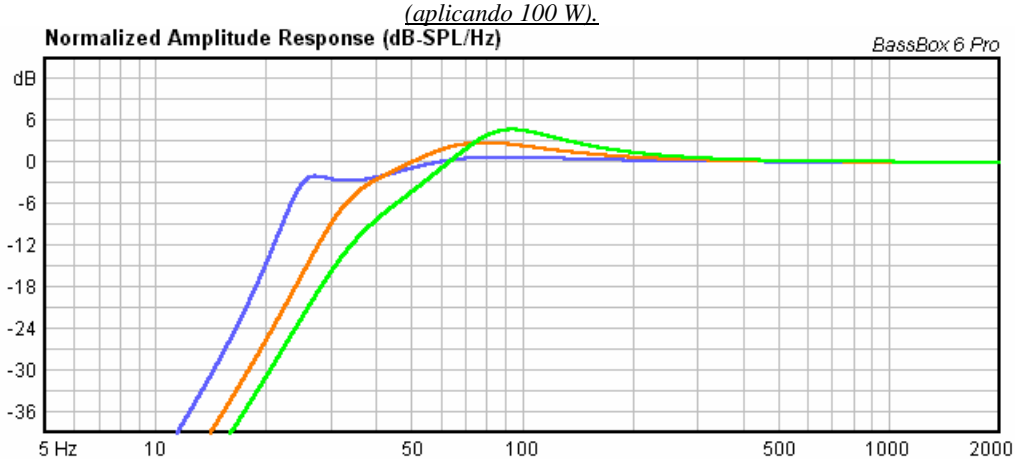


Figura 6.29. *Altavoz 8"BX montado en caja bass-reflex: a) curva azul, V_b = 115 litros; b) curva naranja, V_b = 40 litros; c) curva verde, V_b = 20 litros.*

No obstante, la caja cerrada no presenta este inconveniente, ya que el comportamiento final en cuanto a respuesta en frecuencia no es tan susceptible respecto al altavoz que

utilicemos. De este modo, si montamos el 8”BX en caja cerrada la respuesta que obtenemos es mucho mejor (ver figura 6.30).

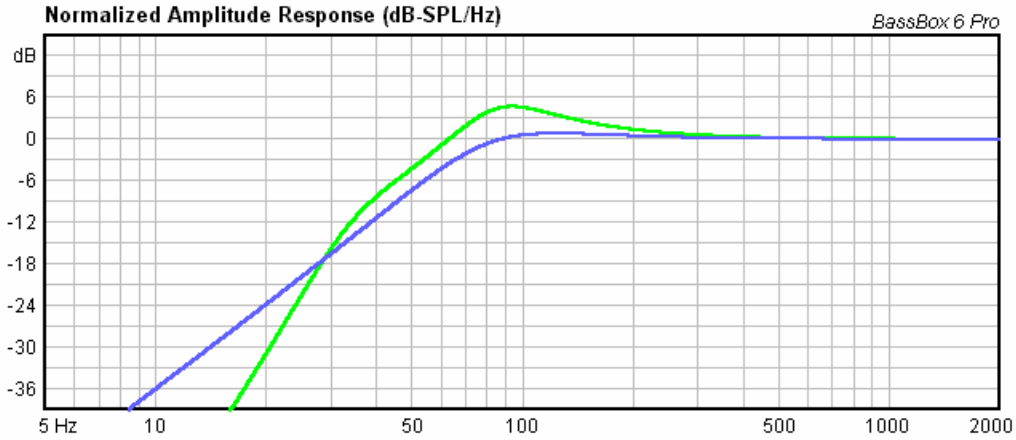


Figura 6.30. *Altavoz 8”BX montado en dos sistemas diferentes: a) curva azul, caja cerrada (20 litros); b) curva verde, caja bass reflex (20 litros).*

Aparte de la dificultad de diseño de la caja bass-reflex, existe un obstáculo añadido: la dificultad de llevar a la práctica el diseño que hemos realizado. La variación de la frecuencia de sintonización del tubo “real” respecto al valor “teórico”, conllevan una alteración de la respuesta (recuérdense las figuras 6.18 y 6.19). De esta forma, si queremos que nuestro sistema tenga un comportamiento óptimo deberemos ajustar la longitud del tubo para obtener el valor de fb deseado. Para poder ajustar fb hay que medir la impedancia del altavoz montado en caja y comprobar la desviación que se ha sufrido respecto al valor teórico. A partir de ahí, modificando la longitud del tubo y volviendo a medir, podremos llegar a ajustar la frecuencia fb al valor deseado.

7. FILTROS Y SEÑALES: ¿QUÉ ES UN FILTRO?

En teoría de circuitos, un filtro es una red eléctrica que altera la amplitud y/o fase de una señal en frecuencia. Idealmente, un filtro no añadirá nuevas frecuencias a la señal de entrada, ni cambiará las frecuencias que componen dicha señal. Lo que hará es variar las amplitudes relativas de las componentes frecuenciales de la señal y/o la relación de fase entre ellas. Los filtros se suelen utilizar sobre todo en sistemas electrónicos para reforzar señales en los rangos de frecuencia deseados y atenuar los rangos que no nos interesen. Por ello, los filtros se caracterizan por tener una ganancia dependiente de la frecuencia de la señal de entrada. Por ejemplo, supongamos que tenemos una señal de frecuencia f1 mezclada con una señal no deseada de frecuencia f2. Si pasamos la señal contaminada por un circuito que tenga muy poca ganancia en f2 comparada con la ganancia a f1, la señal no deseada puede ser eliminada, permaneciendo la señal deseada. Aunque en este ejemplo sólo

nos hemos fijado en f1 y f2, la ganancia de un filtro se suele especificar en varias frecuencias diferentes o por bandas de frecuencia.

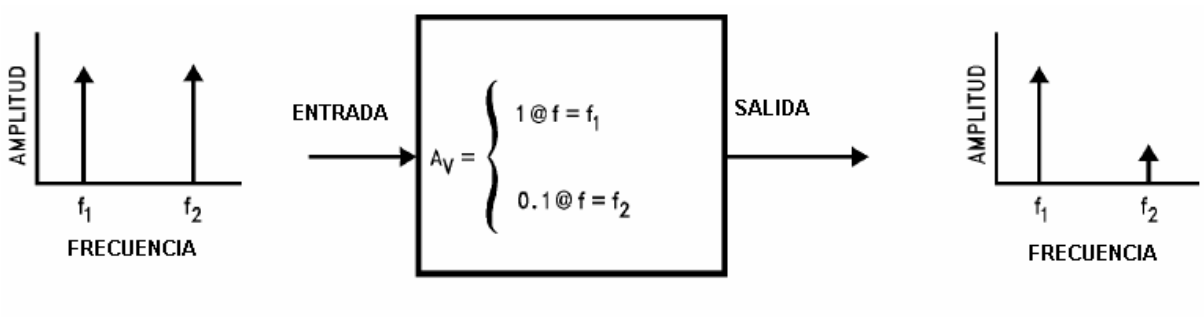


Figura 7.1. *Efecto del filtrado.*

Como los filtros se definen en función de su comportamiento en el dominio de la frecuencia, su clasificación y descripción se hace en función de este aspecto. Por ello se utilizan gráficos de respuesta de los filtros en los que se representa la ganancia y fase del mismo en función de la frecuencia, para representar sus características.

Matemáticamente, el comportamiento en el dominio de la frecuencia del filtro se describe mediante su *función de transferencia,* que no es más que la relación entre las tensiones de entrada y de salida del filtro. Por tanto, podríamos definir la función de transferencia de tensión H(f) de un filtro como:

$$H(f) = \frac{V_{IN}(f)}{V_{OUT}(f)}$$

donde $V_{IN}(f)$ y $V_{OUT}(f)$ son las tensiones de las señales de entrada y salida, y siendo f la frecuencia. La función de transferencia $H(f)$ define la respuesta del filtro *para cualquier señal de entrada arbitraria*, es decir, que el filtro *siempre* se comporta de igual forma, sea cual sea la forma de la señal de entrada. La función de transferencia de magnitud *vs* frecuencia se llama respuesta en frecuencia. Análogamente, la respuesta de fase del filtro nos dice qué desfase introduce el filtro para cada frecuencia. Como un cambio en la fase de la señal en frecuencia representa un retardo en el tiempo, la respuesta en fase puede ser crítica si la relación temporal entre las componentes frecuenciales de la señal es muy importante.

7.1. Tipos de filtros y características principales

Podemos clasificar a los filtros en el mundo del audio básicamente en cinco tipos:

1. Filtros paso-bajo.
2. Filtros paso-alto.
3. Filtros paso-banda.

4. Filtros rechaza-banda.
5. Filtros paso-todo.

1. Los filtros paso-bajo permiten pasar las frecuencias por debajo de su frecuencia de corte f_0 y elimina las frecuencias por encima de dicha frecuencia de corte. En la figura 7.2 tenemos varios ejemplos de respuesta en frecuencia de un filtro paso-bajo. La figura (a) corresponde a la respuesta ideal, y las figuras de la (b) a la (f) nos muestran diversos filtros paso-bajo reales.

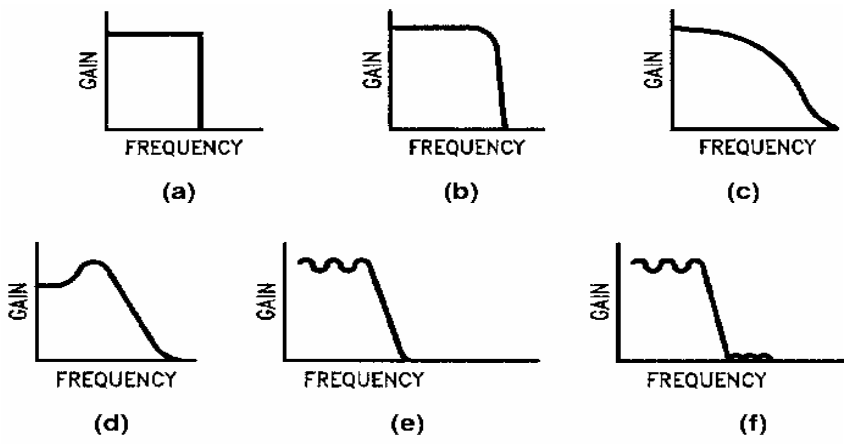


Figura 7.2. *Filtros paso-bajo.*

2. Los filtros paso-alto actúan de forma contraria a los paso-bajo: eliminan las frecuencias por debajo de f_0 y permiten pasar las frecuencias superiores. En la figura 7.3 tenemos varios ejemplos de respuesta en frecuencia de un filtro paso-alto. La figura (a) corresponde a la respuesta ideal, y las figuras de la (b) a la (f) nos muestran diversos filtros paso-alto reales.

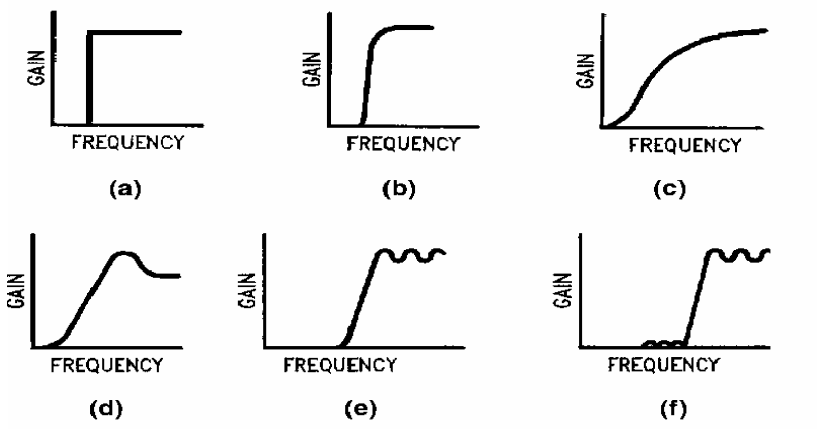


Figura 7.3.*Filtros paso-alto.*

3. Los filtros paso-banda tan sólo permiten el paso a una banda de frecuencias, determinada por dos frecuencias de corte, una superior y otra inferior.

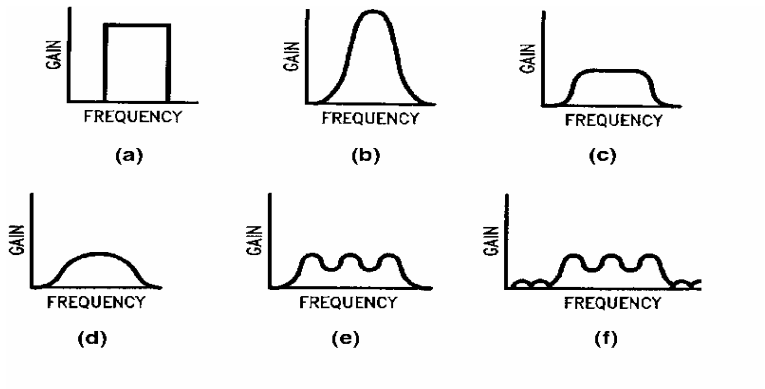


Figura 7.4. Filtros paso-banda.

4. Los filtros rechaza-banda hacen justo lo contrario que los pasa-banda: eliminan las frecuencias de una banda.

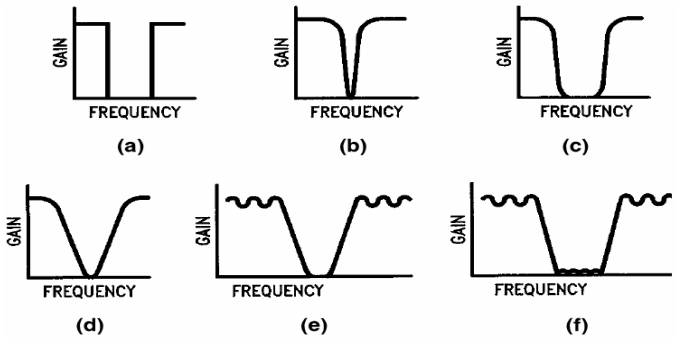


Figura 7.5. *Filtros rechaza-banda*

5. Los filtros paso-todo no afectan a la magnitud de las componentes espectrales de la señal, sino sólo a su fase. Por tanto, producen un *retardo temporal* ϕ, como el de la figura 7.6. Recordemos que un cambio de fase en el dominio de la frecuencia implicaba un desplazamiento temporal en el tiempo (secciones 2.3.6 y 2.3.7). Se utilizan normalmente para compensar el retardo existente entre los altavoces de una caja, normalmente entre la unidad de agudos y la de graves. Si recordamos la figura 5.2 de una caja con una bocina y un altavoz de graves, se observa que existe una separación horizontal entre ambas unidades. Si recordamos que $c=e/t$, tendremos un retardo temporal t_0 entre ambas unidades. Mediante un filtro paso-todo, bastaría con medir la distancia de separación entre los altavoces, calcular el retardo temporal mediante $t_0=e/c$ e introducir al altavoz más cercano al oyente dicho retardo t_0 que compense la separación temporal entre ellos, mediante un filtro paso-todo calculado para producir el retardo calculado.

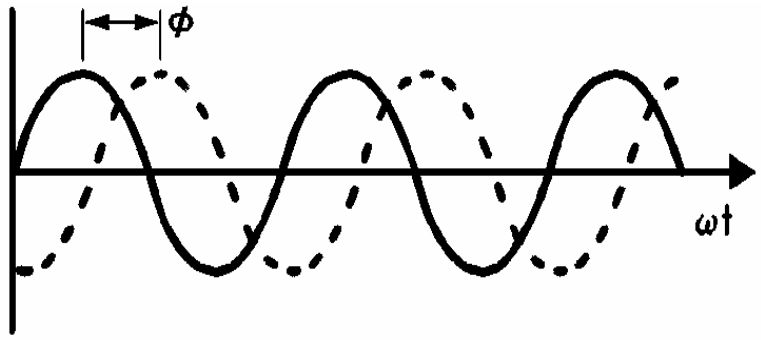


Figura 7.6. *Retardo temporal*

7.2. Parámetros de interés de los filtros

Una vez definidos los tipos de filtros, a continuación podemos enumerar los parámetros que los caracterizan, sin entrar demasiado en detalle. Vamos a definir dos parámetros fundamentales, como son *la frecuencia de corte f_0 y el orden del filtro N.*

- ***La frecuencia de corte f_0:*** Es aquella frecuencia para la cual el filtro atenúa la señal de entrada 3 dB. A partir de esta frecuencia, se asume que la señal de entrada ha perdido las componentes espectrales que cada tipo de filtro en particular atenúa. En la figura 7.7 podemos ver la magnitud y fase de un filtro paso-bajo con una f_0 de 4000 Hz.

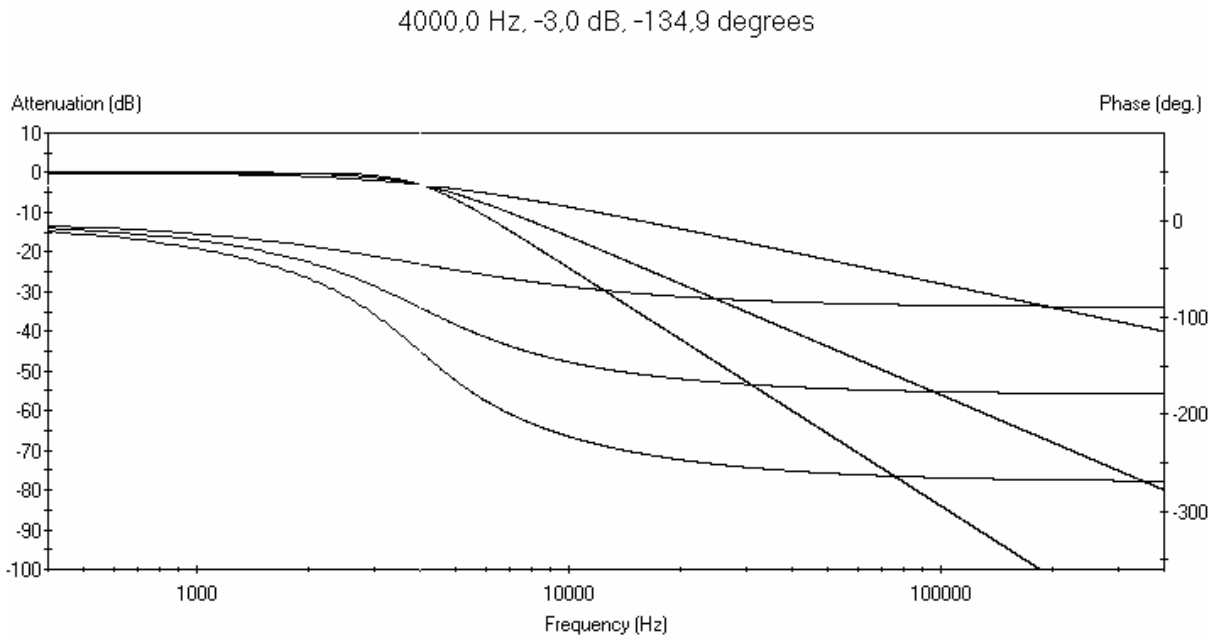


Figura 7.7. *Filtro paso-bajo*

- ***Orden del filtro N:*** El orden del filtro está relacionado con la pendiente de atenuación del filtro**:** cuanto mayor es el orden, más brusca es la pendiente y por tanto, más rápidamente se atenúan las frecuencias no deseadas. En la figura 7.7, el filtro tiene la misma f_0 pero vemos tres pendientes diferentes de 6, 12 y 18 dB/oct, que se corresponden con el mismo filtro pero de orden 1, 2 y 3 respectivamente. También es muy habitual encontrar filtros de 4º orden con 24 dB/oct de atenuación. El orden del filtro es también proporcional al número de componentes necesarios y su dificultad de diseño e implementación. A mayor orden, más caro pero mejor atenuación.

7.3. Filtros pasivos y activos

Hasta los años 80, los filtros siempre se habían realizado mediante componentes pasivos, esto es, bobinas, condensadores y resistencias. Con la aparición de la miniaturización electrónica, se hizo posible el utilizar circuitos integrados para la implementación de filtros.
Cada tipo de implementación tiene sus ventajas y desventajas, siendo más adecuado cada tipo para según qué aplicación.

FILTROS PASIVOS	FILTROS ACTIVOS
Hechos con resistencias, bobinas y condensadores	Hechos con circuitos integrados, más baratos que los componentes pasivos
No amplifican la señal de entrada	Posibilidad de poder amplificar la señal de entrada en tensión
Se requieren bobinas muy grandes (caras) para filtrar en baja frecuencia.	No necesitan utilizar bobinas para filtrar en baja frecuencia
A partir de segundo orden, empiezan a ser difíciles de diseñar y muy caros.	Es muy fácil diseñar filtros de ordenes elevados
No necesitan alimentación externa	Necesitan una fuente de alimentación para funcionar
Nivel de ruido muy bajo	Nivel de ruido dependiente del circuito utilizado
Disipan mucha potencia útil	No disipan potencia útil
F_0, Q y N fijos	F_0, Q y N pueden ser variables
Pueden llegar a soportar grandes potencias	Sólo se pueden utilizar antes de pasar la señal por el amplificador

Tabla 7.1. *Comparación entre filtros pasivos y activos.*

7.3.1. Filtros pasivos

La totalidad de los filtros fabricados por Beyma son de tipo pasivo, es decir, realizados únicamente con bobinas, condensadores y resistencias. Vamos a estudiar las características de un modelo concreto, de forma que sirva de ejemplo práctico de los aspectos teóricos definidos en la sección 7.1 y 7.2. En la tabla 7.2 aparecen enunciadas

las especificaciones técnicas del modelo FD-212. Vamos a comentar una a una estas características:

TIPO	2 VÍAS
FRECUENCIA DE CORTE	1.2 kHz
POTENCIA ADMISIBLE (RMS)	600 W
IMPEDANCIA VÍA DE GRAVES	4-8 ohms
IMPEDANCIA VÍA DE AGUDOS	8 ohms
PENDIENTE DE ATENUACIÓN (GRAVES/AGUDOS)	12 dB/octava
ATENUACIÓN DE AGUDOS	0, -3, -6, -7.5 dB
ECUALIZACIÓN	-3 dB a 3.5 kHz

Tabla 7.2. *Especificaciones técnicas del filtro pasivo FD-212.*

- **Tipo:** hace referencia al número de vías que tiene el *crossover*. Es decir, en realidad este *crossover* está compuesto por dos filtros: un filtro paso-bajo para graves y un filtro paso-alto para agudos. En la figura 7.8 podemos ver la función de transferencia de cada uno de los dos filtros: vemos como su forma se ajusta a las definiciones teóricas de filtro paso-bajo y paso-alto de la sección 7.1.

- **Frecuencia de corte:** ambos filtros, tanto el de graves como el de agudos, están diseñados para que su frecuencia de corte sea de 1200 Hz. De esta manera, si recordamos la definición de frecuencia de corte (ver sección 7.2), de la señal que se introduzca a la entrada del *crossover*, todas aquellas frecuencias entre 0 y 1200 Hz llegarán prácticamente sin atenuar al altavoz de graves y muy atenuadas al altavoz de agudos, mientras que aquellas frecuencias por encima de 1200 Hz llegarán muy atenuadas al altavoz de graves y prácticamente sin atenuar al altavoz de agudos.

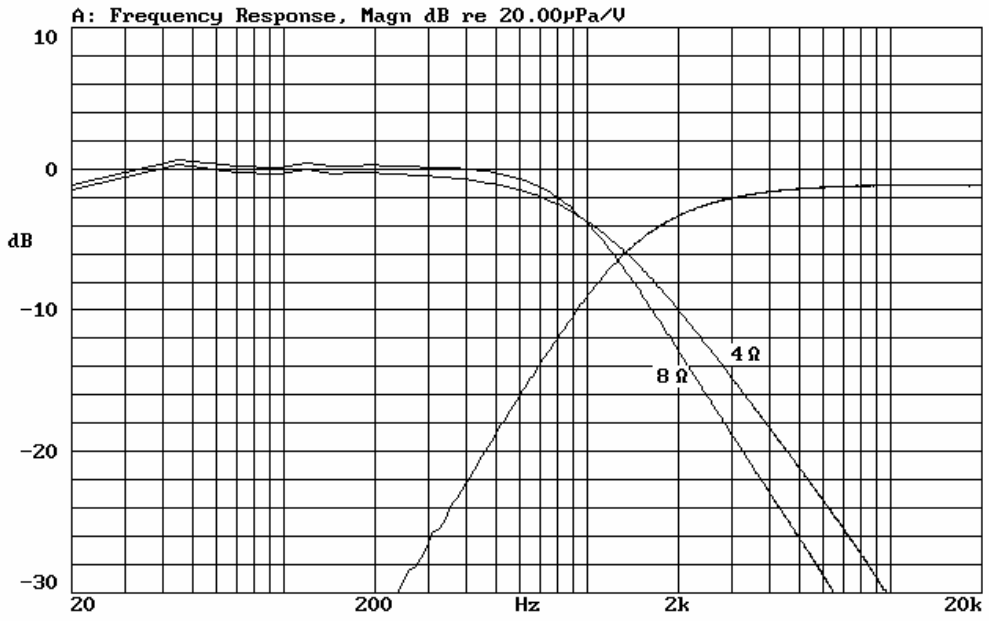


Figura 7.8. *Función de transferencia de los filtros incluidos en el crossover FD-212 de Beyma.*

- **Potencia admisible:** el límite de potencia eléctrica que pueden admitir los componentes de los filtros determina la potencia eléctrica admisible por el filtro. En este caso, dado que el FD-212 es un filtro destinado al ámbito profesional, donde las potencias que se aplican a los sistemas son grandes, el filtro está realizado con componentes que resisten tensiones eléctricas altas. En concreto, este filtro admite 600 W RMS.

- **Impedancia (vía de graves):** las características del filtro (frecuencia de corte y pendiente de atenuación) se cumplen únicamente para una impedancia de carga determinada, partiendo de la cual se ha realizado todo el diseño. En el caso de este modelo, debido a un ingenioso diseño se puede utilizar para dos impedancias de carga diferentes: 4 y 8 ohmios; es decir, para altavoces de 4 y 8 ohmios. Sin embargo, aunque válida, esta solución no llega a ser del todo perfecta: en la figura 7.8 podemos ver como no se llega a evitar que la función de transferencia del filtro permanezca totalmente invariable. Pensemos que las diferencias observadas en frecuencia de corte y pendiente de atenuación serían mucho mayores si se cometiera la imprudencia de cargar un filtro de 8 ohmios con un altavoz de 4 ohmios.

- **Impedancia (vía de agudos):** en este caso, el filtro de agudos está diseñado para una única impedancia de carga: 8 ohmios.

- **Pendiente de atenuación (graves/agudos):** tanto en el filtro de graves como el de agudos, la pendiente de atenuación es de 12 dB/octava, tal como podemos llegar a observar en la figura 7.8. En la realidad, esto se cumple de forma aproximada, como veremos a continuación: para que la especificación se cumpliese de forma estricta, la caída de la función de transferencia, cuando nos encontramos en plena pendiente de atenuación, tendría que ser de 12 dB en el espacio de una octava. Sin embargo, en el caso del filtro de agudos, entre 600 y 300 Hz (una octava) hay una caída de 10 dB.

- **Atenuación de agudos:** este *crossover* lleva incorporada una atenuación opcional en la vía de agudos; prestación muy útil si tenemos en cuenta que los altavoces de agudos tienen una mayor sensibilidad que los altavoces de graves. En este caso, existen cuatro configuraciones diferentes: 0 (sin atenuar), -3, -6 y –7.5 dB. En la figura 7.9 podemos ver como afecta la atenuación a la función de transferencia del filtro de agudos.

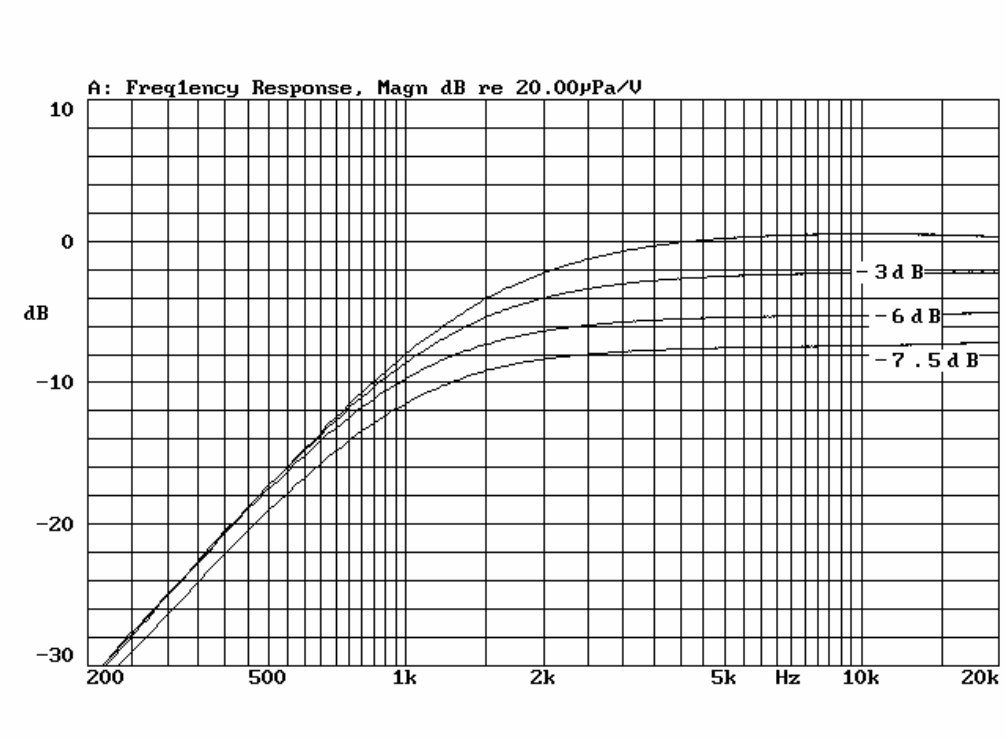


Figura 7.9. *Atenuaciones de agudos disponibles en el crossover FD-212 de Beyma.*

- **Ecualización:** Este modelo incorpora la posibilidad de realizar una ecualización opcional en frecuencias medias. Dicha ecualización consiste en modificar la función de transferencia del filtro de agudos de modo que la frecuencia de corte sea más alta (ver figura 7.10). De esta forma, se atenúan las frecuencias medias y conseguimos una ecualización de la respuesta del sistema que en algunos casos puede ser deseable.

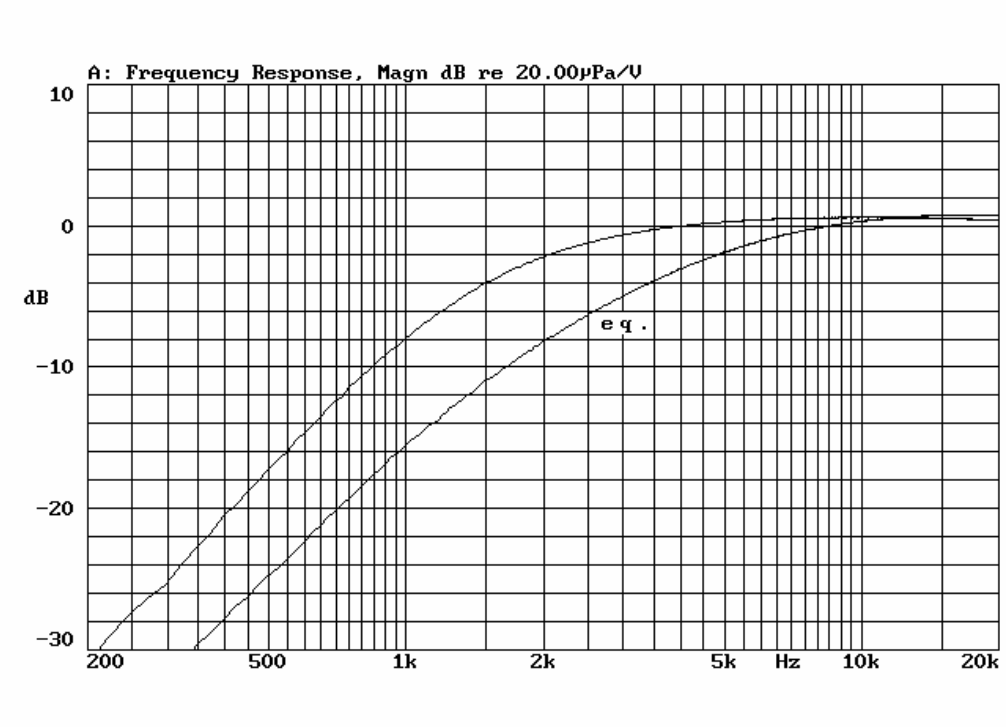


Figura 7.10. *Ecualización de medios del crossover FD-212 de Beyma.*

7.3.2. Filtros activos

En la aplicación concreta de separadores de frecuencias para altavoces (cross-overs), la utilización de filtros activos posee muchas ventajas sobre los pasivos, aunque no todo son sólo ventajas.

El uso de cross-overs activos permite un ajuste fino y variable de sus parámetros más importantes de forma independiente, normalmente la frecuencia de corte y la ganancia de cada banda de frecuencias. Esto es del todo imposible con componentes pasivos. Esto no sucede con los filtros activos. Además, el realizar la separación de frecuencias antes de la etapa de potencia, permite amplificar cada altavoz de la caja por separado y evita la pérdida de potencia que se produciría en un filtro pasivo. Ahora bien, esta ventaja también puede ser un contratiempo, ya que nos obliga precisamente a eso: a utilizar un solo canal de la etapa para un único altavoz de la caja, como vemos en la figura 7.11. Es decir, que para alimentar una caja de dos vías necesitaríamos los dos canales de una etapa estéreo en lugar de uno sólo, en el caso de utilizar un filtro pasivo. Esto provoca que los cross-overs activos se suelan utilizar en el mundo del audio profesional, en cajas de gran potencia, o para audiófilos. También hay que darse cuenta de que siempre es mejor que entre la etapa de potencia y el altavoz no haya más que un cable, y no todo un circuito eléctrico, con su impedancia de entrada y de salida.

En la figura 7.12 podemos ver el panel frontal de un cross-over típico, aunque puedan existir variaciones puntuales de un fabricante a otro. Podemos observar que tiene dos canales, izquierdo y derecho, además de salida para subgrave (subwoofer). Tanto la frecuencia de corte como la ganancia es ajustable mediante los potenciómetros de control, además de tener un filtro paso-alto a 30 Hz para eliminar frecuencias subsónicas que pueden dañar el subgrave.

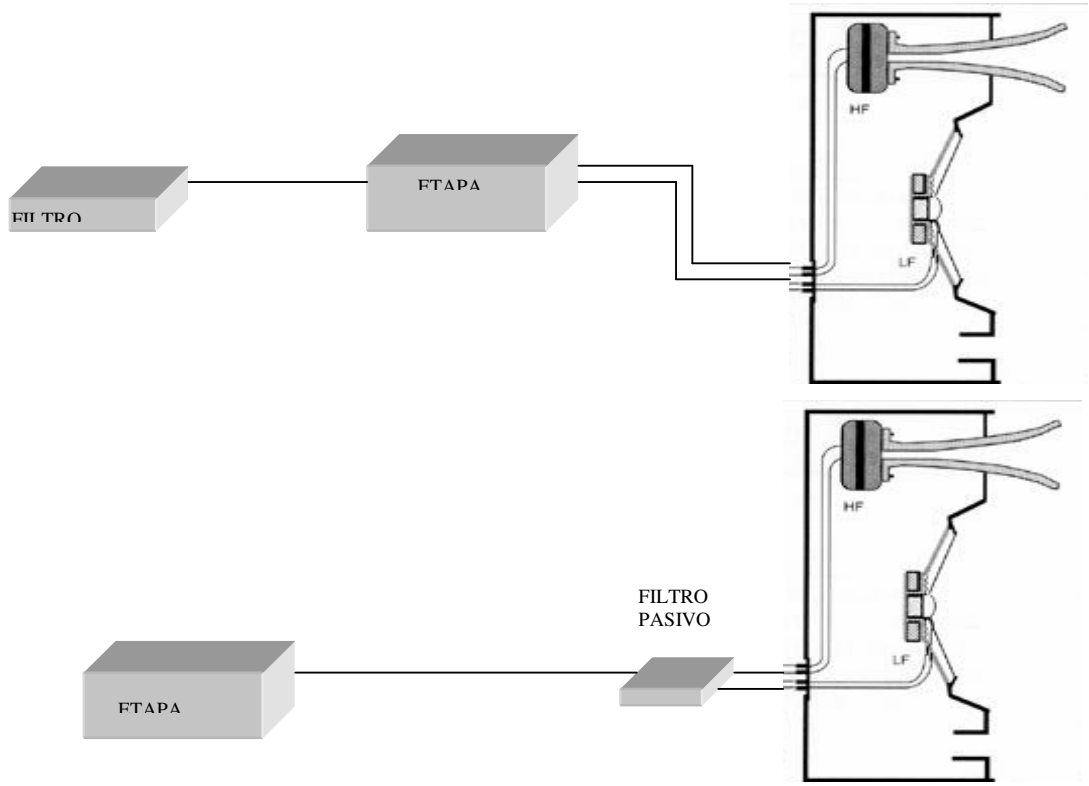


Figura 7.11. *Diferencia entre cross-over activo y pasivo*

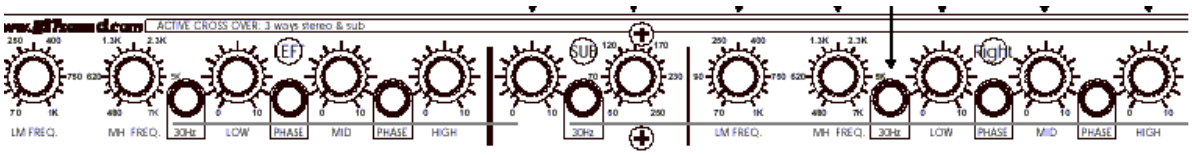


Figura 7.12. *Cross-over activo típico.*

Un buen ejemplo de la utilización de filtros activos en sistemas de sonido cada vez más extendidos es su uso en las cajas de subgraves para uso doméstico. Esto es debido a la ventaja de no tener que usar bobinas para su implementación. Por ello, los filtros activos se han convertido en un standard en la fabricación de cajas de subgraves para Home Cinema. Realizar un filtro pasivo de frecuencia de corte muy baja nos obligaría a utilizar una bobina de peso y precio prohibitivo, además de ser de frecuencia de corte

fija y disiparía mucha potencia. Por eso la industria se ha decantado por fabricar cajas de subgraves con su propio amplificador. Así pueden utilizar un filtro activo antes del amplificador interno y permite poder variar la frecuencia de corte, además de la ganancia.