



Criterios y recomendaciones para diseñar cajas acústicas para altavoces

Justo Andrés Concha Abarca

Ingeniero en sonido

Licenciado en Educación

Magister en pedagogía y gestión universitaria

Introducción

Los sistemas de altavoces, están constituidos por transductores electroacústicos, una red de filtraje y una caja acústica.

En la actualidad existe una infinidad de marcas y modelos de altavoces diseñados para distintas aplicaciones tales como monitores de estudio, monitores de escenarios, altavoces para refuerzo sonoro, sistemas domésticos entre otros. El sistema ya viene ensamblado y tiene las características técnicas apropiadas para el uso que se le va a dar. Sin embargo, hay personas que les gustaría aprender a construir sus propios gabinetes a partir de los transductores que compra. Existen procedimientos y métodos de diseño que se pueden seguir a partir de los parámetros Thiele-Small. Estos procedimientos terminan en el cálculo del volumen y el o los tubos en el caso de sistema tipo reflector de bajos. El dimensionamiento, las formas, los materiales y otros aspectos quedan al arbitrio de quien diseña. No obstante, existe un sinnúmero de recomendaciones que ayudan a tomar decisiones, sobre todo, cuando no se tiene la experiencia.

Las recomendaciones que se exponen en este artículo son para ser aplicadas después de realizar el procedimiento de diseño establecido en la literatura técnica.

1. Comportamiento de los altavoces

La respuesta de un sistema de altavoces va a depender de la cantidad de transductor que posea y cómo las respuestas individuales se combinan, del tipo de crossover que se use y del diseño del gabinete o caja acústica.

Los sistemas pueden ser de 2, 3 o 4 vías y cada vía puede estar constituida por uno o más transductores. Los gabinetes pueden ser abiertos, cerrados o tipo reflector de bajos, bass reflex en inglés.

La figura 1.1 muestra la respuesta de frecuencia de un sistema de altavoces. El límite en frecuencias altas de la respuesta dependerá de la frecuencia de corte de la unidad de frecuencias altas o tweeter. La forma en la región media, depende de cómo se combinen las respuestas de los distintos transductores y las características del circuito crossover, esto



incluye frecuencias de cruce y pendientes de los filtros. El corte en frecuencias bajas dependerá del diseño y características de la caja acústica.

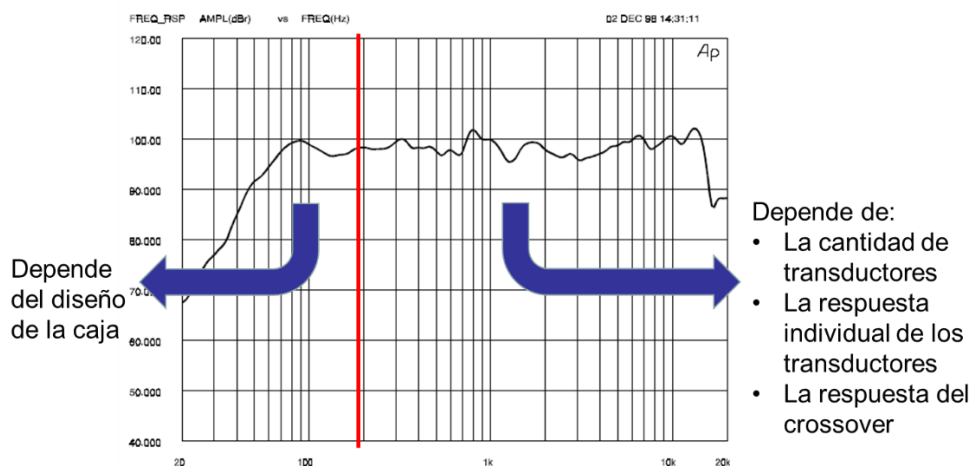


Figura 1.1 Respuesta de frecuencia de un sistema de altavoces

Si se considera un sistema simple con un solo transductor montado en una caja tipo reflector de bajos, la radiación será una combinación de lo que radia el cono o woofer, lo que radia el tubo, que resulta ser una parte del resonador de Helmholtz que se diseña para mejorar la respuesta en bajos y las eventuales filtraciones (leakage) en los empalmes de las placas de la caja, los bordes del montaje del woofer en el panel frontal y en el tubo

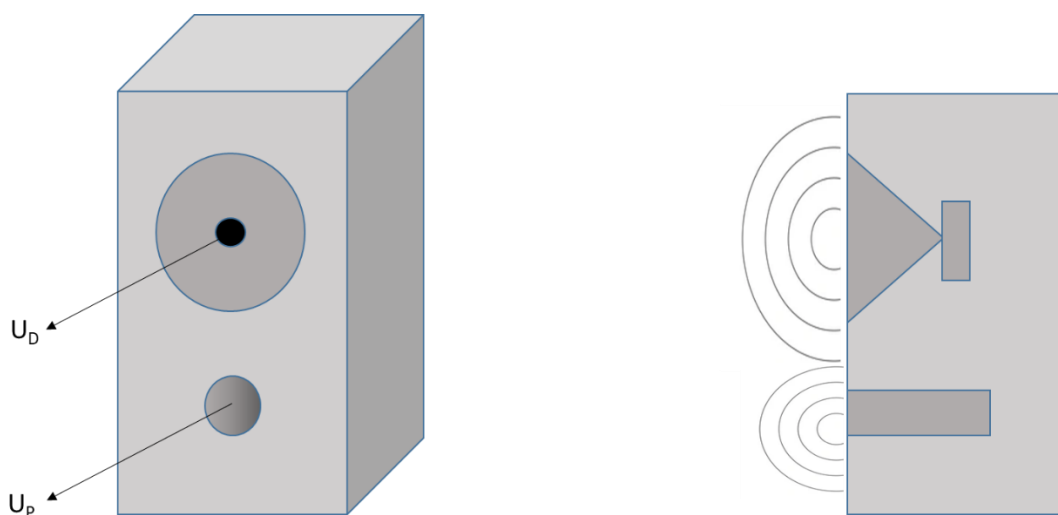


Figura 1.2 Radiación de un sistema de altavoces con un woofer en un diseño tipo reflector de bajos

En este caso, la velocidad de volumen total resulta ser la suma de las velocidades de volumen generadas por cada uno de los elementos mencionados.



$$U_o = U_D + U_P + U_L$$

Donde

U_o : Es la velocidad de volumen total del sistema $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

U_D : Es la velocidad de volumen producida por el diafragma del woofer

U_L : Es la velocidad de volumen producto de las filtraciones

La potencia acústica total que radiará el sistema será:

$$W_a = U_o^2 \cdot R_{AR}$$

Donde

W_a : Es la potencia acústica total radiada por el sistema (watts acústicos mks)

R_{AR} : Es la resistencia de radiación del aire (ohm acústicos mks)

Este sistema tiene una impedancia compleja que resulta ser electromecanoacústica. Esto quiere decir, que tiene una parte eléctrica donde se incluye a la fuente que corresponde al amplificador de potencia con su impedancia de salida, la resistencia y la inductancia de la bobina; una parte mecánica constituida por el sistema móvil en el que forman parte el diafragma que posee una masa mecánica y el sistema de suspensión consistente en la suspensión periférica y la central y una parte acústica que corresponde a la caja acústica.

Richard Small (1971), representa este sistema a través de su circuito acústico equivalente como lo muestra la figura 1.3.

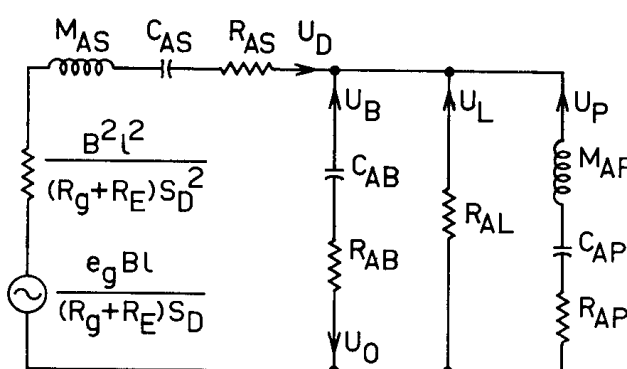


Figura 1.3 Circuito acústico equivalente de un sistema de altavoces tipo reflector de bajos (fuente: Small (1971))



El sistema es alimentado por la presión generada desde el amplificador de potencia que puede ser considerado como una fuente de voltaje. El elemento resistivo que le acompaña es la resistencia acústica equivalente a la suma de la resistencia de salida del generador (R_g) y la resistencia a la corriente continua de la bobina móvil (R_E). Mas es la masa acústica equivalente a la masa mecánica del sistema móvil M_{MS} (Kg). Cas es la compliancia acústica equivalente a la compliancia mecánica de las suspensiones C_{MS} (m/N). Ras es la resistencia acústica equivalente a la resistencia mecánica de las suspensiones R_{MS} (Ω mecánico mks). Luego están los elementos originalmente acústicos tales como C_{AB} que es la compliancia acústica del aire contenidos en el volumen de la caja; R_{AB} es la resistencia acústica del material de relleno o revestimiento en las caras internas de la caja; M_{AP} es la masa acústica del puerto o tubo del sistema reflector de bajos; C_{AP} es la compliancia acústica del aire intermedio en el tubo, elemento que está presente sólo si el tubo es lo suficientemente largo para que haya compresión en su interior; y finalmente está R_{AP} que es la resistencia acústica del tubo. La tercera rama en paralelo donde aparece R_{AL} es la resistencia acústica de las filtraciones.

Considerando algunos aspectos específicos se puede simplificar esta representación despreciando algunos elementos. Por ejemplo, si la caja no tiene relleno, R_{AB} tendería a cero y por tanto desaparece del circuito. Si la caja está lo suficientemente bien ensamblada, de tal manera que no presente fugas de energía por empalmes o el montaje del transductor, R_{AL} tendería a infinito, comportándose como un circuito abierto y por tanto no permitiendo el flujo de aire, desapareciendo también del circuito. Como ya se mencionó, si el tubo no es muy largo, se puede despreciar C_{AP} . Esto es muy conveniente porque la existencia de este elemento elástico involucraría la generación de una resonancia en el interior del tubo complejizando la respuesta del sistema. Finalmente, dependiendo del material del tubo, normalmente R_{AP} se desprecia por ser casi insignificante.

Por otro lado, este modelo también permite analizar el comportamiento de una caja cerrada la cual no contaría con la rama correspondiente al ducto. En ese caso, C_{AS} y C_{AB} , quedarían en serie pudiendo ser reemplazadas por un equivalente al que se le denomina C_{AT} .

$$C_{AT} = \frac{C_{AS} \cdot C_{AB}}{C_{AS} + C_{AB}} \left(\frac{m^5}{N} \right)$$

La función de respuesta del sistema tipo reflector de bajos es igual la función de un filtro pasa altos de 4° orden en el rango del pistón, esto es en la región de corte en frecuencias bajas.

Neveille Thiele, profesor del doctorado de Richard Small en la universidad de Sidney había observado la similitud de la respuesta del sistema de altavoz con la de filtros eléctricos y formuló una serie de parámetros que permitirían facilitar el procedimiento de diseño



(Thiele, 1961). A esos parámetros, Richard Small agregó algunos más. De ahí es que se conocen como los parámetros Thiele-Small y que vienen en las tablas de especificaciones cuando se adquiere un transductor solo para diseñar su caja. Cabe mencionar que cuando se adquiere un altavoz de marca ya ensamblado y montado en una caja, estos parámetros no vienen porque no son necesarios.

Los parámetros Thiele-Small, desde ahora sólo T-S, son los que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros T-S de un transductor de bobina móvil

PARÁMETROS DE SEÑAL PEQUEÑA	
F_s	Frecuencia de resonancia mecánica del parlante al aire libre (sin caja o en sonodeflector infinito) en Hz
Q_{TS}	Coeficiente de sobretensión total del parlante. $\frac{R}{Z}$
Q_{ES}	Coeficiente de sobretensión debido sólo a las resistencias eléctricas del sistema
Q_{MS}	Coeficiente de sobre tensión debido a las resistencias no eléctrica del sistema
V_{AS}	Volumen de aire que posee la misma elasticidad que las suspensiones mecánicas del altavoz (Lts)
R_E	Resistencia a la corriente continua de la bobina móvil (Ω)
S_D	Área efectiva del diafragma, sin considerar la suspensión mecánica periférica y el marco del armazón (m^2)
η_0	Eficiencia de referencia en Fs
PARÁMETROS DE SEÑAL GRANDE	
X_{MAX}	Desplazamiento peak máximo del diafragma en Fs (m)
V_D	Volumen de aire desplazado por el diafragma en X_{MAX} (m^3)
P_{MAX}	Potencia eléctrica máxima que puede disipar el transductor (Watts)

2. Selección del tipo de Caja

Habiendo distintas opciones para diseñar una caja, este artículo se enfocará en las recomendaciones para construir cajas cerradas o reflector de bajos solamente.

Lo primero que debe resolver quien diseña, es qué tipo de caja va a construir. No hay libertad absoluta para construir una caja. El tipo de sistema está condicionado por las características electromecanoacústicas del transductor que se usará. Para dilucidar si el transductor es propicio para caja cerrada o bass reflex, se debe calcular el EBP o producto eficiencia-ancho de banda (Efficiency to Bandwidth Product).

$$EBP = \frac{F_s}{Q_{es}}$$



Si el EBP es menor de 50, el parlante sería propicio para una caja cerrada. Si el EBP está entre 50 y 100 podría servir tanto para caja cerrada como para reflector de bajos y si es mayor de 100 es adecuado para un sistema reflector de bajo.

Tabla 2. Recomendación de tipo de caja según EBP

EBP	Tipo de sistema recomendado
≤ 50	Caja cerrada
>50 y <100	Caja cerrada o caja reflector de bajo
>100	Caja tipo reflector de bajos

La primera condición no es fácil de encontrar porque se requiere que F_s sea lo suficientemente baja y Q_{es} lo suficientemente alto para que el EBP sea bajo. Por ejemplo, un transductor con una F_s de 16Hz y un Q_{es} de 0,52 tendrá un EBP de 48. Respecto al valor medio, el criterio sería que mientras más cerca esté de 50 convendría hacer una caja cerrada, mientras que, si está cerca de 100, sería conveniente hacer una caja tipo reflector de bajos.

3. Elección del alineamiento

Los sistemas tendrán un Q_T que dependerá mucho del Q_{TS} del transductor que se seleccione. El Q corresponde a un parámetro que establece la condición de forma de la respuesta de frecuencia en la zona de resonancia. En el ejercicio de diseñar una caja acústica, se deberá elegir un alineamiento donde tampoco se tendrá total libertad. El alineamiento es un conjunto de características que condicionan algunos comportamientos del sistema. Por ejemplo, para caja cerrada existen tres alineamientos posibles. Uno de ellos es el Bessel de 2° orden (D2). Recibe la denominación de 2° orden porque la caja cerrada resulta tener una función de respuesta en la zona de resonancia igual que la de un filtro pasa altos de 2° orden (12dB/8°). El sistema D2 se caracteriza porque resulta ser muy amortiguado en la frecuencia de resonancia. Esto supone una respuesta de frecuencia muy regular, una respuesta de transientes muy rápida y una eficiencia baja, es decir, no va radiar mucha potencia acústica.

Otro Alineamiento es el Butterworth de 2° orden (B2). Este se caracteriza por también tener una respuesta muy regular, una respuesta de transientes rápida, pero menor que D2 y un rendimiento medio.

Finalmente está el Chebyshev de 2° orden (C2) que se caracteriza por presentar ripple (rizado) en su respuesta. Es muy eficiente, pero su respuesta de transiente es lenta por lo que el cono tiende a seguir vibrando frente a estímulos muy impulsivos.

Si se tuviera que decidir el uso más recomendado se podría mencionar que un D2 sería propicio para un sistema de alta potencia, así se compensaría su bajo rendimiento. Esto se lograría en sistemas para refuerzo sonoro, ya sea una caja de PA (Public Address) o monitoreo de escenario. Un sistema B2 se recomienda cuando se necesita una respuesta



de frecuencia plana y un rendimiento medio. Esto podría servir para monitores de estudio de grabación profesional. Finalmente, un C2 dado su gran rendimiento, pero tendencia a exagerar la respuesta en bajos, se recomendaría para sistemas de baja potencia tales como los altavoces de uso domésticos.

Tabla 3. Comportamiento del sistema caja cerrada según su alineamiento en el rango del pistón.

Alineamiento	Respuesta de frecuencia	Respuesta de transientes	Respuesta de fase	Amortiguamiento	Eficiencia
D2	Plana	Rápida	Lineal	sobreamortiguado	Baja
B2	Plana	Rápida	Lineal	Críticamente amortiguado	Media
C2	No plana	Lenta	No lineal	Subamortiguado	Alta

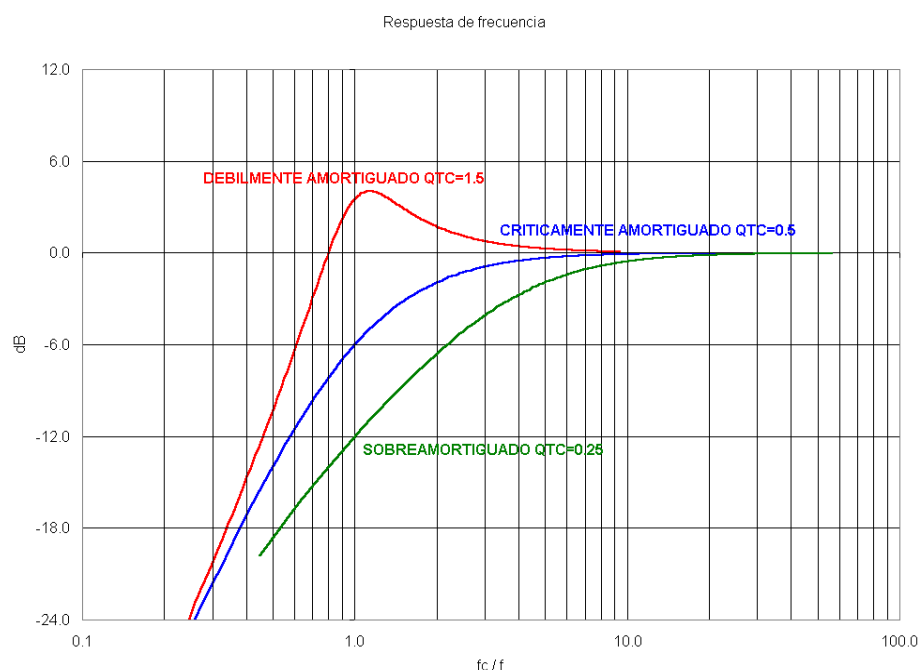


Figura 3.1 Diferencia en la respuesta de frecuencia de un sistema caja cerrada según el alineamiento.

En este caso, quien diseñe podrá definir arbitrariamente todo esto a partir del Q_{TC} que corresponde al Q del sistema caja cerrada. Si se desea un alineamiento D2 el Q_{TC} deberá ser 0,577. Para un alineamiento B2 el Q_{TC} debe ser 0,707 y para un alineamiento C2, el Q_{TC} debe ser mayor a 0,707, pudiendo llegar a 1,5 sin problemas.

Los alineamientos clásicos para un sistema caja bass reflex son el QB3, B4 y C4. El QB3 es el Quasi Butterworth de 3° orden. Es un sistema muy amortiguado que tendrá una respuesta plana, pero bajo rendimiento. El B4 es el Butterworth de 4° orden, el de mejor respuesta de frecuencia con un rendimiento medio. El C4 es el Chebyshev de 4° orden que tendrá ripple.



En este caso, el o la diseñadora no tendrá libertad operativa porque el alineamiento está determinado por el Q_{TS} del altavoz.

Tabla 4. Alineamiento de sistemas tipo reflector de bajos

Q_{TS}	Alineamiento	Uso recomendado
<0,4	QB3	Sistema de alta potencia
0,4	B4	Monitoreo de estudio
>0,4	C4	Sistema de baja potencia

4. Diseño y dimensionamiento de la caja

Cuando se aplica un determinado procedimiento de diseño, uno de los primeros resultados resultantes es el volumen interno neto de la caja (V_B), con el cual se pueden determinar las dimensiones. Para ello, es necesario decidir la geometría que tendrá el modelo. La mayoría de las cajas son paralelepípedas, sin embargo, es necesario descartar la forma cúbica debido a que es el cuerpo geométrico que más resonancias presentará (Delaleu,2001). Las cajas de refuerzo sonoro, suelen ser trapezoidales para facilitar su montaje en arreglos y lograr así un perfil curvado.

Luego de esto, es necesario dimensionar la cara donde se montarán los transductores teniendo en claro la cantidad y sus dimensiones. La distribución puede ser simétrica o asimétrica dependiente del carácter estético que se le desee dar al diseño.



Figura 4.1. A la izquierda un modelo de componentes alineados en el eje vertical. A la derecha un sistema con los componentes desalineados

En el caso de monitores de estudio, es conveniente que los componentes no estén muy cerca del borde para que no haya tanta difracción en las aristas de la caja. En las cajas de refuerzo sonoro no debiera haber mayor preocupación, sobre todo en el diseño de cajas para arreglos lineales donde los transductores debieran estar lo más cerca posible de los bordes para propiciar la superposición constructiva entre caja y caja.

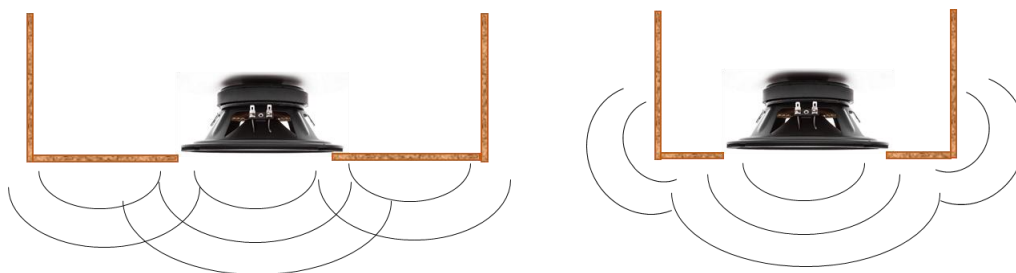


Figura 4.2. Efecto de difracción de la radiación en los bordes de la caja

En la figura 4.2 se puede apreciar que cuando hay mayor distancia entre el borde del transductor y el borde de la caja, hay menor difracción en la arista y por tanto, la cara de la caja actuará como un mejor sonodeflector. Al producirse difracción en las aristas se generan frentes de onda hacia los costados generando patrones de interferencia con la radiación de otra caja.

Al mismo tiempo, los componentes de vías distintas no debieran estar muy cerca entre ellos para que no haya acoplamiento mutuo de masas. Esto es un fenómeno donde aparecen elementos tipo masas que dificultan la predicción del comportamiento del sistema. Por el contrario, si se usan componentes iguales pertenecientes a la misma vía, estos pueden quedar muy juntos sin problemas.

Algo similar debiera considerarse para la separación entre woofer y salida del tubo en el diseño bass reflex.



Figura 4.3. Separación entre componentes y los tubos

En la figura 4.3 el modelo de la izquierda posee dos woofer iguales con el propósito de duplicar la potencia radiada. En este caso, las dos unidades pueden quedar muy juntas sin problema. En los otros casos, se recomienda una distancia del orden de 3" (pulgadas) entre tweeter y woofer o entre woofer y tubo del resonador.



En el caso de usar 2 o más componentes para la misma vía, habrá una modificación en algunos parámetros T-S. Por ejemplo, en el caso de usar 2 parlantes conectados eléctricamente en paralelo, el V_{AS} se duplica, resultando un V_B también del doble. Por otro lado, el X_{max} se reduce a la mitad. Esto afectará las dimensiones del ducto.

Si el V_B resultante del procedimiento es muy pequeño, se puede considerar el modelo box in a box. Si la vía de los agudos es un compression driver, conviene separar el volumen interno para crear un apoyo para el driver debido al gran peso de su motor lo que puede significar la fractura de su bocina.

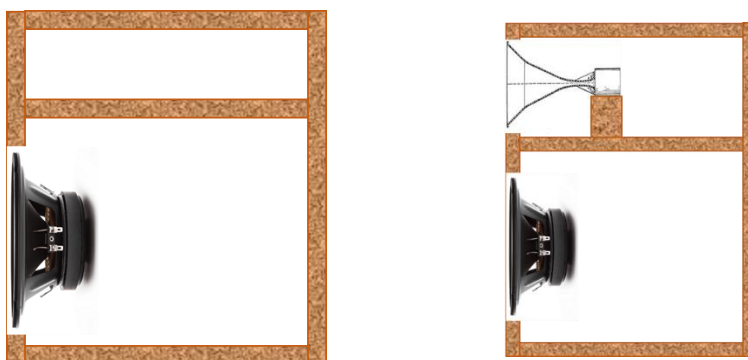


Figura 4.4 Modelo de caja con volumen dividido

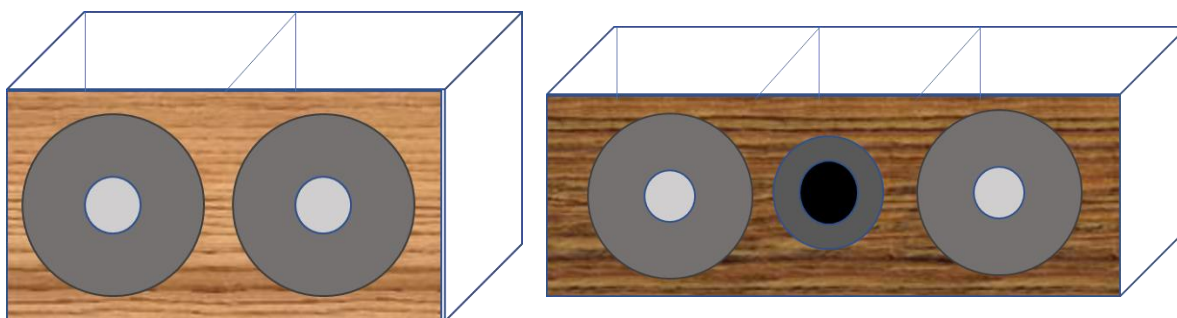


Figura 4.5 Modelo de caja de volumen dividido

Una vez tomadas todas estas consideraciones, viene el paso del dimensionamiento. Para ello se pueden tomar dos criterios distintos. Uno es el criterio de Bolt, que está dado para salas de tal forma que los modos normales de vibraciones se distribuyan homogéneamente en el espectro lo que permite controlarlos de mejor manera. Este criterio considera unas proporciones de 0,7 : 1 : 1,3. Si se toma en cuenta un volumen del tipo X : Y : Z, entonces,



$$V_B = X \cdot Y \cdot Z$$

Si X es la unidad,

$$Y = 0,7X$$

$$Z = 1,3X$$

Por lo tanto,

$$V_B = X \cdot 0,7X \cdot 1,3X$$

$$V_B = 0,91 \cdot X^3$$

Finalmente,

$$X = \sqrt[3]{\frac{V_B}{0,91}}$$

Subsecuentemente se obtendrán las otras dos dimensiones.

Por otro lado, está la regla de oro en el cual se aplica la proporción áurea, considerada la proporción perfecta. Esta es: 0,6 : 1 : 1,6. En este caso X resulta ser...

$$X = \sqrt[3]{\frac{V_B}{0,96}}$$

Es necesario tener cuidado porque el V_{AS} suele venir en litros y por tanto V_B resulta en la misma unidad. Hay que hacer la conversión al sistema métrico.

Finalmente, este procedimiento entregará las dimensiones internas netas por lo que se deberá considerar el espesor del material que se usará para el montaje. Esto implica que las dimensiones terminadas serán mayores.

En el caso del diseño tipo reflector de bajos. Richard Small propone un criterio para definir las dimensiones mínimas del o los ductos. Esto es...

$$D_V \geq \sqrt{F_B \cdot V_D}$$

Donde

D_V es el diámetro del ducto en metros

F_B es la frecuencia de resonancia del sistema tipo reflector de bajos, que resulta del procedimiento de diseño en Hertz.

V_D es el volumen máximo desplazado por el diafragma en m^3 . Este es uno de los parámetros T-S. Si no se contara con este parámetro se puede extraer de otros dos parámetros. Esto es:



$$V_D = X_{MAX} \cdot S_D$$

El resultado de la aplicación de este criterio debe ajustarse al diámetro de los tubos que podrían encontrarse en el mercado, tratando de lograr la mayor cercanía posible.

Teniendo el diámetro y, por consiguiente, el radio transversal del ducto, se calcula el largo con la siguiente expresión algebraica:

$$L_V = \frac{c^2}{4\pi} \cdot \frac{a_V^2}{F_B^2 \cdot V_B} - 1.46 \cdot a_V$$

Donde

C es la velocidad del sonido en el aire (m/s)

a_V es el radio de la sección transversal del tubo en metros

La expresión $1.46 \cdot a_V$ corresponde a la corrección de extremos que corresponde cuando el tubo está montado en el panel exterior (pestaña) y en el otro extremo está libre (sin pestaña). Si hubiese otro tipo de montaje, debe aplicarse otra corrección de extremos.

El tubo, no necesariamente debe montarse en el panel frontal de la caja. Hay muchos modelos de monitores de estudio que usan el tubo en la parte trasera. Cuando los monitores serán colocados contra una pared, es necesario considerar que habrá un incremento de la energía en la frecuencia de resonancia debido al reflejo de la onda en la pared. En general, se recomienda que este tipo de modelos se instalen al menos a 1 metro de distancia de la pared.

Cuando producto del proceso de diseño da como resultado un radio de un tubo muy ancho, lo que lo hace muy poco resistivo, esto reducirá su eficiencia. En este caso se recomienda subdividir el tubo en 2 o más tubos con el mismo largo.

$$a_V = \sqrt{a_{V1}^2 + a_{V2}^2}$$

Si se decide usar tubos iguales, el cálculo se simplifica.

Por otro lado, si el largo del tubo resulta muy grande superando la profundidad de la caja, está la opción de curvarlo. No obstante, habría que cuidar de que no se produzcan resonancias en el tubo lo que desviará la sintonía del sistema.

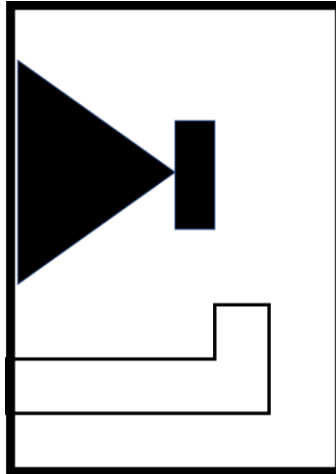


Figura 4.6. Sistema con tubo curvado en el interior

Cuando el diámetro es superior a 10 cm se recomienda evaluar subdividirlo en tubos más angostos. Si el tubo queda a menos de 5 cm de la pared trasera se puede evaluar torcerlo o subdividir el largo. En ambos casos, la frecuencia de resonancia debe ser la misma.

Debido a esto es necesario considerar el cálculo de la frecuencia de resonancia del sistema tipo reflector de bajos.

$$F_B = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_V}{V_B \cdot L_V}}$$

Donde

S_V es el área transversal del ducto

L_V es el largo del ducto incluyendo corrección de extremos

V_B es el volumen interno neto

Cuando se decide subdividir el ducto, esta expresión se puede re-escribir de la siguiente forma:

$$F_B = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_V}{n \cdot V_B \cdot L_V}}$$

Donde n es el número de tubos

De esta expresión se desprende que el aire contenido en un tubo se comporta de la misma forma que n tubos de igual largo y un área de $\frac{S_V}{n}$. Al mismo tiempo se puede decir que el comportamiento sería igual que n tubos con la misma área, pero con largo igual a $n \cdot L_V$.



5. Materiales

La principal característica de los materiales con que se construya la caja debe ser su rigidez. Los paneles no pueden vibrar porque eso se constituye en un factor de pérdida que reduce el Q_L .

Hay cajas que se construyen de poliuretano de alta densidad o cualquier material plástico. Para ello se debe contar con las matrices que permitan manipular dichos materiales. Como este artículo está pensando en personas que desean construir sus cajas con técnicas al alcance es recomendable pensar en madera.

Lo ideal sería usar maderas nobles, muy duras y con preciosas vetas, tales como el arce, roble, raulí, coigüe, mañío, entre otras. Sin embargo, el costo puede ser muy alto y por tanto se prefiere la madera prensada, aglomerada, contrachapada o laminada. Dentro de esta categoría, el terciado es lo más apropiado.

La madera terciada puede ser de pino, eucaliptus, abeto e incluso de maderas nobles. Los hay en distintos espesores: 9, 10, 12, 15, 20 mm. La decisión del espesor debe estar relacionada con el tamaño de la caja. A mayor tamaño de caja, mayor espesor de la madera. Ejemplo, para un sub-bajo de refuerzo sonoro, 20 mm; para monitor de estudio, puede ser de 10 o 12 mm.

Hay otro tipo de maderas aglomeradas denominadas MDF (Medium Density Fibreboard). Varios de estos paneles se construyen con viruta de madera. Su densidad es menor que la del terciado. Hay nombres asociados a marcas registradas tales como el trupán o la masisa. Hay revestimientos imitación madera que se usan para disimular su origen. La principal desventaja es que con la humedad se expanden.

Para el montaje se pueden unir las seis caras usando tornillos y cola fría. Pero si la caja es de un tamaño considerable, conviene armar un esqueleto que le dé rigidez.

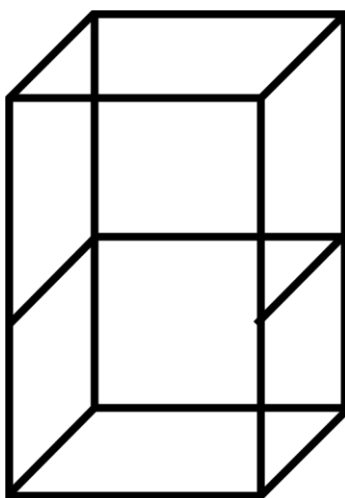


Figura 5.1 Esqueleto estructural de la caja antes de montar sus caras



Si la caja es grande, como las de refuerzo sonoro para grandes estadios se pueden agregar travesaños que unen el panel frontal con el trasero y así evita que la caja se desarme.

Para minorizar las vibraciones de los paneles, se puede cubrir cada cara interna con algún tipo de material viscoelástico que le de mayor masa (cemento, asfalto). También se pueden agregar listones en el centro de las caras para evitar el primer modo normal de la placa.

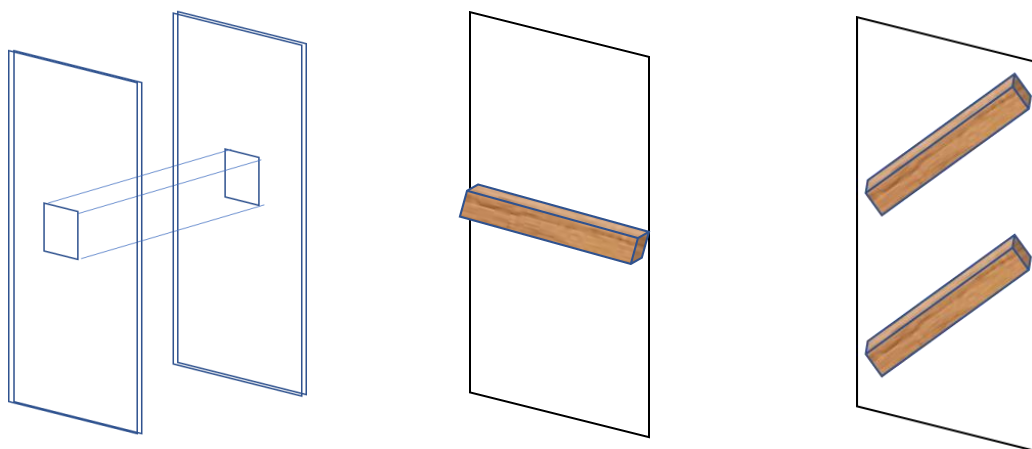


Figura 5.2 Refuerzos pegados en las caras de la caja para su firmeza y amortiguación de resonancias

El sellado también es muy importante. Además de apernar los paneles, se usa cola fría. Una vez ensamblada parcialmente la caja se puede cubrir cada empalme con silicona líquida.

Como se mencionó anteriormente, el alineamiento condiciona el comportamiento del sistema de manera directa, pero una vez diseñada la caja, se pueden usar algunas técnicas para modificar dicho alineamiento. Por ejemplo, para minorizar los efectos de la resonancia interna de la caja se puede usar material absorbente como relleno o revestimiento. Con esto se podría reducir el Q_T del sistema, amortiguando cualquier evidencia de ripple no deseado en la respuesta. Los materiales más usados son la esponja y las lanas. Cuando se habla de lanas se refiere a la lana mineral, de vidrio o de roca. La consistencia depende de la densidad y el tipo, teniendo distinta porosidad. Uno de los aspectos que hay que considerar es que las lanas, sobre todo la de vidrio, tienden a desprender material o filamentos y con el tiempo y la vibración del aire puede ir perdiendo su efecto. Cuando la caja sólo se reviste, no hay mayores efectos en el volumen interno neto considerando la caja vacía, pero si la caja se rellena se produce un efecto en cual hay que considerar una corrección en el volumen.

$$V_B = \frac{V_{AB}}{1,2}$$



Donde V_{AB} es el volumen que resulta del procedimiento de diseño y V_B sería el volumen definitivo que habría que dimensionar y finalmente construir. Teóricamente el volumen real se reduce en un 40%, no obstante Richard Small demostró que el corrimiento era entre un 20% y un 25%. Por eso la expresión anterior usa el factor 1,2 (20%). Esto puede ser muy relevante porque, en definitiva, una caja rellena tiene el mismo comportamiento que una caja vacía de mayor tamaño. Por tanto, cuando producto de los cálculos realizados en el proceso de diseño, se llega a una caja grande en relación a las expectativas de quien diseñó, se aplica esta corrección para tener una caja más pequeña.

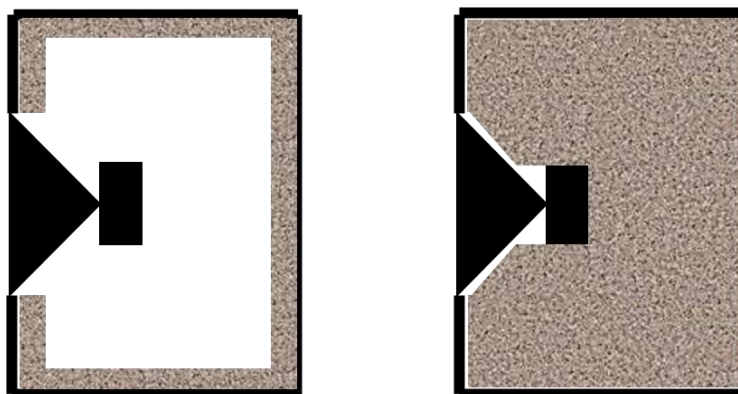
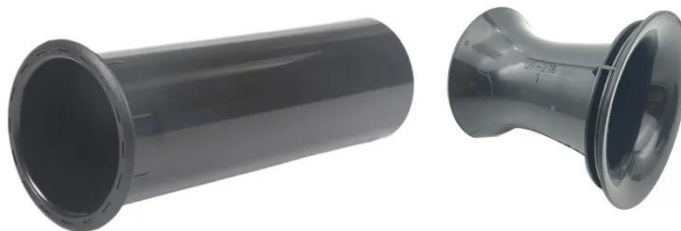


Figura 5.3. Diferencia entre uso de material absorbente de revestimiento (a la izq.) o de relleno (a la Der.)

Uno de los cuidados que hay que tener al rellenar la caja es que el material no puede afectar la excursión de la membrana, por tanto, es necesario dejar un espacio entre el diafragma y el material poroso.

Finalmente, en relación al o los tubos de un sistema tipo reflector de bajos, el material que más se usa es el plástico. Como en todos los casos que se han considerado en este artículo, la rigidez es muy importante para garantizar de que las pérdidas sean despreciables. En el mercado hay opciones de tubos ya dimensionados, lo que implica que este factor debe ser considerado al momento de diseñar. Lo más práctico es condicionar los cálculos a el diámetro del tubo que se va a usar para luego corregir el largo.

Hay algunos modelos de cajas acústicas que usan tubos acampanados en la desembocadura. Esto permite reducir las turbulencias que se producen debido a la gran velocidad de partículas que se produce en la salida del tubo y la diferencia de impedancia acústica al salir del tubo. La sección gradual reduce las turbulencias.



5.4 Tipos de tubos comercializados para diseñar cajas acústicas.

6. Accesorios

Dependiendo del tipo de diseño, la caja puede incluir algunos elementos que optimicen su instalación, traslado o conexión.

Lo primero es que hay que considerar el tipo de conectores que usará el modelo. Hay distintos tipos de conectores para parlantes, dentro de los que se pueden mencionar los tipo prensa, banana o el speakon. Para altas potencias es importante evitar conectores usados normalmente para conexiones de micrófono o línea tales como el XLR3 o el plug TS.



6.1 Tipos de conectores de parlantes

Si es un monitor de estudio o un parlante de uso doméstico suelen tener unas piezas de goma que se colocan en la base para que no se corran debido a las vibraciones mecánicas que se producen cuando está funcionando.

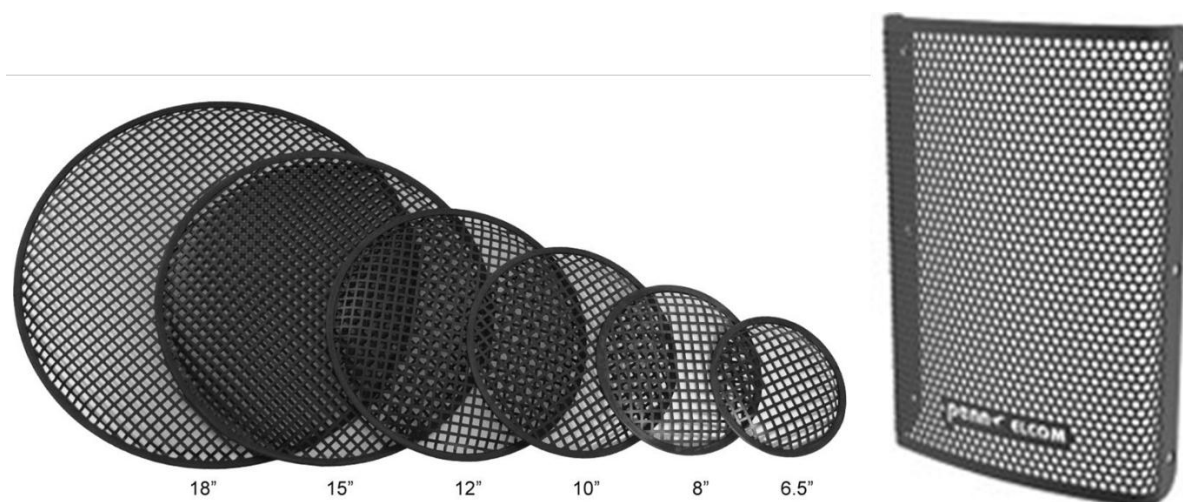
Por otro lado, las cajas de refuerzo sonoro suelen usar manillas para facilitar su montaje. Los sub-bajos pueden tener ruedas para facilitar su traslado. Dichas ruedas deben soportar el peso del gabinete que suele superar normalmente los 100 Kg. Además, se recomienda usar ruedas con frenos para evitar el corrimiento que en alta potencia es mucho más evidente.

Las cajas para el montaje de arreglos o monitores de escenario usan esquineros para proteger las puntas dado su fragilidad en traslados.

Finalmente, muchas cajas incluyen una pantalla protectora de vinil que evita que los transductores estén a la vista o en las cajas de refuerzo una rejilla para proteger las membranas de los componentes.



6.2. Manillas (Izq.); Esquineros (centro); Ruedas (Der.)



6.3 Rejillas de protección de componente

Para cajas diseñadas para ser montadas en arreglos habría que incluir el sistema de anclaje para enganchar una caja a la otra y el sistema de rigging para colgarlas.

Conclusiones

El diseño de cajas acústicas responde a un conjunto de criterios propuestos desde hace décadas atrás por los padres de la electroacústica. Sin embargo, los procedimientos terminan con un conjunto de dimensiones que hay que saber organizarlos y administrarlos para lograr los propósitos de diseño formulados por quien emprende este tipo de proyectos. El comportamiento final, no sólo se obtiene con las funciones de respuesta deducidas por Thiele, Small, Benson o Dickanson, sino también por una infinidad de



variables que hacen que cada proyecto sea un proceso único que incluye características propias de la ingeniería de detalles.

Aplicar los criterios y procedimientos de diseño presentados en la literatura clásica permitirá tener una predicción muy cercana de cómo se va a comportar el sistema. Sin embargo, es necesario considerar aspectos de diseño que permitan lograr un modelo armónico y atractivo a la vista. Debe sonar bien y verse bien.

Tomando en cuenta que para crear una empresa que haga diseño de cajas a nivel industrial se requiere de una inversión importante, hacer esto a escala humana supone aplicar criterios artesanales que se van aprendiendo con la experiencia y la generosa recomendación que busca mejorar los procesos.

Bibliografía

Benson, J. E. (1996) Theory and design of loudspeakers enclosures. Prompt publications. USA.

Delaleu, C. (1990) Altavoces y cajas acústicas. Editorial Paraninfo. España

Dickason, V. (2006) Loudspeaker design cookbook. Audio amateur press. 7° Edición. USA.

Pueo, B. Romá, M. (2003) Electroacústica. Altavoces y Micrófonos. Pearson and Prentice Hall. Madrid.

Small, R. (1971) Direct-radiator loudspeaker system analysis. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA

Small, R. (1972) Closed box loudspeaker systems Part I: Analysis. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA

Small, R. (1972) Closed box loudspeaker systems Part II: Synthesis. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA

Small, R. (1973) Vented-box loudspeaker systems Part I: Small signal analysis. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA.

Small, R. (1973) Vented-box loudspeaker systems Part II: Large signal analysis. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA.

Small, R. (1973) Vented-box loudspeaker systems Part III: Synthesis. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA.



Thiele, A.N (1961) Loudspeakers in vented box: Part II. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA

Thiele, A.N. (1961) Loudspeakers in vented boxes: Part I. Loudspeakers: an anthology of articles on loudspeakers from the pages of the journal of the AES. 2° edición. USA