

DISEÑO DE CAJAS ACÚSTICAS EN BAJA FRECUENCIA

JOSUÉ QUERO¹, SIMON COSTANTINO¹ Y DIEGO N. ACOSTA¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC).
Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.
josuequero@hotmail.com, simoncosta86@hotmail.com, diegoacosta_66@hotmail.com

Resumen – La elección y el diseño de una caja acústica trae aparejado la necesidad de conocimiento sobre los fenómenos físicos implicados en la emisión de sonidos de baja frecuencia, así como también los datos sobre el funcionamiento de los transductores electro-mecánico-acústicos utilizados, y, por supuesto, de los tipos de cajas acústicas y de las diferencias que existen entre ellas. En este trabajo se desarrolla una breve descripción de tres de las mismas: Caja Infinita, Bass Reflex y Pasa Banda. Además, se presentan los conceptos físicos generales y fundamentos matemáticos para el diseño de dichos elementos, así como también las ventajas y desventajas de un tipo sobre otro y las fortalezas y debilidades de cada uno en particular.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las características principales a considerar en los altavoces es el efecto de la emisión de ondas en contrafase por la parte posterior de los mismos. Cuando el lado exterior de la membrana crea una onda, el interior crea la misma onda pero opuesta, es decir, en fase inversa.

Los sonidos graves mueven una gran cantidad de aire, cuando el lado exterior empuja, el interior tira. Con presiones elevadas, resulta fácil que la presión del lado exterior y la contraposición del lado interior, den lugar a la cancelación del movimiento y la presión del aire. Este fenómeno se denomina cortocircuito acústico.

Este inconveniente puede solucionarse colocando el altavoz en una caja, pero este camino conlleva otro problema. La onda creada por la parte interior, puede reflejarse en el fondo de la caja y llegar a encontrarse con la creada por la parte exterior. La suma de la onda en diferente fase con la onda creará distorsiones o hasta puede llegar a ocasionar cancelaciones.

Para solucionar esta nueva condición pueden utilizarse, entre otros, 3 tipos de cajas: Cajas Cerradas, Bass Reflex y de Paso de Banda. El objetivo del presente trabajo es presentar una descripción detallada de las Cajas Acústicas antes mencionadas, para dar al lector una herramienta para la elección y el posterior diseño de las mismas.

2. CAJA INFINITA

Es el tipo de caja más difundida. El altavoz posee su parte posterior en el interior de una caja hermética. De esta forma, se logra absorber la onda trasera, que está en contrafase con la delantera, para evitar un cortocircuito acústico entre las dos caras de la membrana. La onda trasera será amortiguada por medio de materiales acústicos.

Consiste en una caja que contiene en su interior material absorbente. La calidad del sellado influye en la calidad final del sonido. Es un volumen de aire cerrado, por lo que la F_b (frecuencia de sintonía, frecuencia de resonancia del altavoz dentro de la caja) será siempre mayor que F_s (frecuencia de resonancia de un altavoz sin caja), por ello conviene utilizar altavoces con F_s baja.

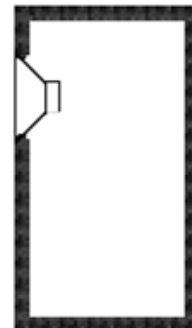


Figura 1: Caja Infinita [1]

Alguna de sus ventajas es su tamaño moderado y respuesta temporal buena.

Como desventaja, la frecuencia de corte no es muy baja utilizando un tamaño de caja normal. Además, el aire contenido en dicha caja, a gran nivel de presión sonora actúa como un muelle y se crea una gran distorsión a volumen alto.

2.1 Cálculo de una caja infinita

A continuación se describe el procedimiento de diseño para una caja acústica infinita.

2.1.1 Curva amplitud/frecuencia

Es posible determinar en una caja cerrada su coeficiente de sobretensión Q , el cual depende de los

parámetros mecano acústico del altavoz elegido, así como del material con el que será construida la caja que se instalará dicho altavoz.

A continuación, se muestra la forma de la curva de respuesta de una caja cerrada en el extremo grave, en función del coeficiente de sobretensión de la caja en su frecuencia de resonancia (frecuencia con la que vibra el sistema) [2].

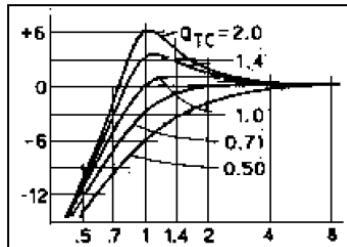


Figura 2: Curva amplitud [dB] vs. Frecuencia normalizada para caja cerrada

2.1.2 Frecuencia de resonancia (F_C)

$$F_C = \frac{Q_{TC} \times F_S}{Q_{TS}} \quad (1)$$

Donde:

F_S = Frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre.

Q_{TC} = Coeficiente de sobretensión del sistema en la frecuencia de resonancia de la caja.

Q_{TS} = Coeficiente de sobretensión total del altavoz.

2.1.3 Frecuencia de corte en -3 dB (f_{-3})

$$F_{-3} = F_C \times \sqrt{\frac{A + \sqrt{4 + A^2}}{2}} \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{Q_{TC}^2} - 2 \quad (3)$$

2.1.4 Cálculo del volumen de la caja

$$\alpha = \left(\frac{F_C}{F_S}\right)^2 - 1 \quad (4)$$

$$V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha} \quad (5)$$

$$\frac{F_C}{F_S} = \sqrt{\alpha + 1} \quad (6)$$

V_{AB} = Volumen de aire equivalente a la elasticidad acústica del aire de la caja.

V_{AS} = Volumen de aire equivalente a la elasticidad de la suspensión del altavoz.

$V_B = \frac{V_{AB}}{1.2}$ Caja Amortiguada

$V_B = V_{AB}$ Caja No Amortiguada

V_B = Volumen de la caja.

2.1.5 Nivel acústico en cada frecuencia

$$F_{dB} = 10 \log \left(\frac{F_N^4}{F_N^4 + A F_N^2 + 1} \right) \quad (7)$$

F_X = Frecuencia en la que se calcula la atenuación o la sobretensión del sistema.

Resultado positivo = sobretensión

Resultado nulo = curva plana

Resultado negativo = atenuación.

F_N = Razón de F_X a F_C .

F_{dB} = Nivel de atenuación o de sobretensión en decibel (dB). [2]

3. CAJA PASO BANDA

Se trata de una caja con una pared interior donde se encuentra el altavoz. En uno de los lados hay una sub-caja bass-reflex y en el otro puede haber una bass-reflex (caja de 6º orden), o una caja sellada (4º orden).

Las cajas deben estar muy bien construidas porque la presión en el interior es muy grande, estas cajas generan la sensación que sólo se oye una frecuencia [2]

El volumen de aire contenido en cada sub-caja actúa como una masa móvil, que hace bajar la frecuencia de sintonía F_b , proporcionando una extensión en graves muy importante. Posee una eficiencia baja y mala respuesta temporal.

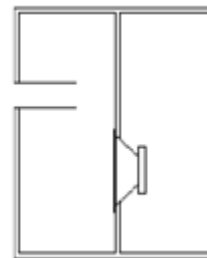


Figura 3: Caja paso-banda 4º orden [2]

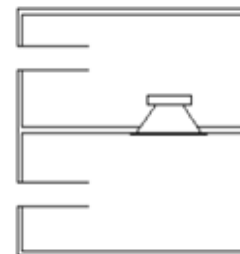


Figura 4: Caja paso-banda 6º orden [2]

3.1 Cálculo de una caja de carga simétrica de 4º Orden

El altavoz posee en la cara delantera un resonador, y en la cara trasera una caja cerrada. El resonador delantero tiene el objetivo de ajustar el sistema y hace la función de filtro acústico paso-bajo.

Este tipo de principio está reservado para uso en el extremo grave [2]

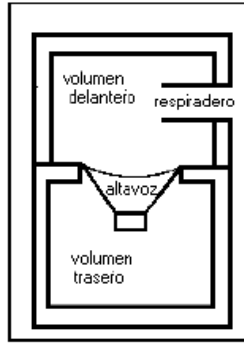


Figura 5: Caja simétrica de 4º orden [2]

3.1.1 Curva amplitud/frecuencia

La forma de la curva amplitud/frecuencia depende de las características del altavoz elegido y de los dos volúmenes de la caja, así como del respiradero.

3.1.2 Cálculo de la frecuencia Normalizada

$$F = \frac{F_R}{Q_{ts}} \quad (8)$$

F_R : Frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre.

Q_{ts} : Coeficiente de sobretensión total del altavoz.

3.1.3 Cálculo del volumen delantero (V_B)

$$V_B = 4 \times S^2 \times V_{AS} \times Q_{ts}^2 \quad (9)$$

3.1.4 Frecuencia de corte alta (F_{CH})

La frecuencia de corte F_{CH} no debe ser superior a los 120 Hz como máximo.

$$R = Q_{ts} \times \frac{F_{CH}}{F_R} \quad (10)$$

3.1.5 Cálculo de Q_{TE}

$$Q_{TE} = Q_{ts} \times \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_F}} \quad (11)$$

V_F : Volumen Trasero.

Sobre la familia de curvas se determina el parámetro en Q_{TE} , la curva correspondiente a la frecuencia de corte alta en -3 dB (igual a R). Marcar sobre la red de corte baja en -3 dB (F_{CB}) nuevo valor de R. Calcular la frecuencia de corte baja en -3 dB (F_{SB}).

$$\frac{F_{CB}}{F_R} \times Q_{ts} = R \rightarrow F_{SB} = F_R \times \frac{R}{Q_{ts}} \quad (12)$$

3.1.6 Cálculo del volumen trasero

$$V_F = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TE}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad (13)$$

3.1.7 Cálculo de las dimensiones del respiradero

$$\frac{L_V}{S_V} = \frac{3000}{F_B^2 \times V_B} \quad (14)$$

$$F_B = \frac{Q_{TE}}{Q_{ts}} \times F_R \quad (15)$$

L_V = Longitud del respiradero.

S_V = Sección del respiradero.

F_B = Frecuencia de resonancia de la caja.

3.1.8 Factor de extremidad

$$l_v = L_V - 0.88 \times \sqrt{S_V} \quad (16)$$

Da como resultado un respiradero en forma de tubo.

L_V : Longitud definitiva del respiradero.

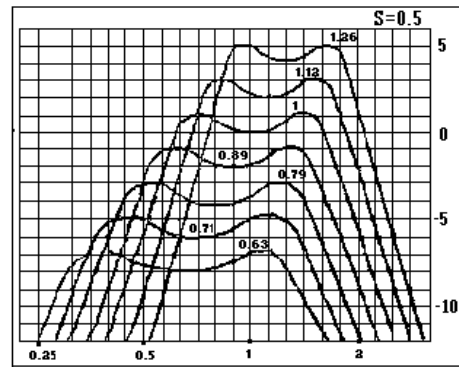


Figura 6: Curva de respuesta en función del Q_{ts} , para un coeficiente de sobretensión $S=0.5$ [2]

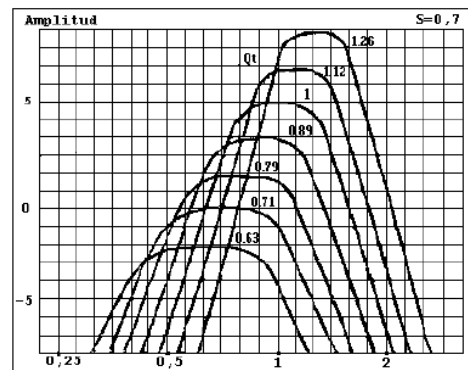


Figura 7: Curva de respuesta en función del Q_{ts} , para un coeficiente de sobretensión $S=0.7$ [2]

4. CAJA BASS REFLEX

Un sistema Bass Reflex es un tipo de caja acústica que utiliza el sonido de la parte trasera del diafragma

para incrementar la eficiencia del sistema en frecuencias bajas, con respecto a otros tipos de cajas.

Un *puerto de reflexión* es la característica distintiva de este tipo de caja. El diseño trata de mejorar la reproducción de las frecuencias bajas que son generadas por el woofer. Este puerto normalmente consiste en uno o más tubos montados en el frente o en la parte trasera de la caja. Dependiendo de las características constructivas como el volumen, relleno (si es que hay alguno) y las dimensiones del tubo, la eficiencia de la reproducción de las frecuencias bajas puede ser mejorada [4].

4.1 Principio de Funcionamiento

A diferencia de las cajas cerradas, un sistema bass-reflex tiene una abertura llamada *puerto* o *respiradero*, que generalmente tiene la forma de un tubo (normalmente es de sección circular o rectangular). La masa de aire en esta abertura resuena con el aire que está dentro de la caja en una manera similar a como el aire que está dentro de una botella resuena cuando una corriente es dirigida a la abertura. La frecuencia a la cual se da esta resonancia depende de las características constructivas de la caja.

Cuando la frecuencia de resonancia del tubo es elegida de tal manera que es menor que la frecuencia de resonancia normal del reproductor de bajos, ocurre un fenómeno interesante: la onda trasera del reproductor invierte su polaridad para todo el rango comprendido entre las dos frecuencias. Ahora, ya que la onda trasera es emitida en oposición de fase con respecto a la onda frontal, esta inversión de polaridad hace que las dos emisiones se pongan en fase (aunque la emisión del *puerto* estará atrasada por un ciclo), y por lo tanto se refuerzan [5].

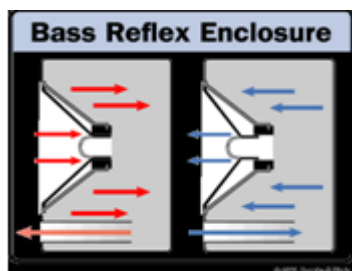


Figura 8: Movimiento de aire en cajas Bass Reflex

4.2 VENTAJAS

Un puerto bass-reflex bien diseñado permite extender la respuesta en frecuencia en graves de un recinto acústico.

Según la teoría de construcción de cajas acústicas, se deduce que para mejorar la eficiencia de una caja acústica cerrada debemos fabricar una caja de mayor volumen, lo que permitiría un mayor recorrido del diafragma (o, lo que es lo mismo, si reducimos el volumen de una caja, perdemos eficiencia o extensión). También podemos deducir que al mejorar la extensión, o perdemos eficiencia o debemos agrandar el volumen de la caja.

Comparado con un diseño bass-reflex, podremos conseguir una eficiencia de +3 dB sin sacrificar extensión. Incluso podemos reducir hasta un 50% el tamaño de la caja sin sacrificar extensión.

4.3 INCONVENIENTES

Para conseguir todo lo anterior, es notorio que por el puerto bass-reflex se “empujará” una gran cantidad de aire. Este aire deberá salir por un puerto, por lo que será fácil que se generen turbulencias.

Detrás del diseño de una caja acústica hay un amplio estudio de ingeniería que resulta en una serie de márgenes de tolerancia. Según cómo se apliquen estos márgenes, los efectos secundarios pueden provocar vibraciones no deseadas (y por lo tanto, ruido), respuestas en frecuencias falsas, la necesidad de una colocación física de la caja mucho más precisa, etc.

De hecho, un ajuste mal realizado puede ofrecer unos resultados peores al uso de una versión “cerrada”. De manera paralela, el uso del bass-reflex provoca que los cambios eléctricos (impedancias, inductancias, etc.) se produzcan más a menudo y de manera más rápida, demandando una electrónica más precisa y tolerante (refiriéndonos a la que ya equipa el propio subwoofer) [6].

4.4 Cálculo de una caja Bass Reflex

A continuación se describe el procedimiento de diseño para una caja acústica bass-reflex.

4.4.1 Curva amplitud/frecuencia

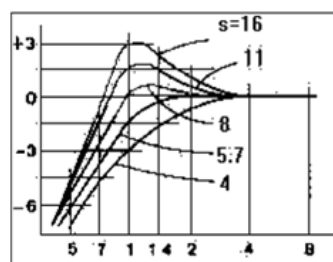


Figura 9: Curva amplitud/frecuencia Amplitud [dB] vs. Frecuencia normalizada.

4.4.2 Cálculo del volumen de la caja para una curva de respuesta recta

$$V_B = 20 \times V_{AS} \times QTS^{3.3} \quad (14)$$

$$F_3 = \sqrt{\frac{V_{AS} \times F_R^2}{V_B}} \quad (15)$$

Donde

V_B = Volumen de la caja

V_{AS} = Volumen de aire equivalente del altavoz al aire libre

QTS = Coeficiente de sobretensión del transductor

F_R = Frecuencia de resonancia del transductor al aire libre

F_3 = Frecuencia de corte de la caja en -3dB

4.4.3 Cálculo del coeficiente de sobretensión de la caja (S)

$$S = \frac{V_B / V_{AS}}{QTS^2} \quad (16)$$

4.4.4 Cálculo del volumen de la caja y de la frecuencia de corte para un S dado.

$$V_B = S \times V_{AS} \times QTS^2 \quad (17)$$

$$F_3 = \sqrt{\frac{V_{AS} \times F_R^2}{V_B}} \quad (18)$$

4.4.5 Frecuencia de resonancia del altavoz montado en la caja. (FSB)

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_B} \quad (19)$$

$$F_3 = F_{SB} \times \alpha^{0,44} \quad (20)$$

$$F_B = F_{SB} \times \alpha^{0,31} = \frac{F_3}{\alpha^{0,31}} \quad (21)$$

$$F_{SB} = \frac{F_3}{\alpha^{0,44}} = \frac{F_B}{\alpha^{0,31}} \quad (22)$$

4.4.6 Longitud del respiradero

Siendo la elasticidad del aire en la caja

$$C_{AB} = \frac{V_B}{140449} \quad (23)$$

La masa acústica del respiradero será:

$$M_{AP} = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times F_B^2 \times C_{AB}} \quad (24)$$

La longitud del respiradero será:

$$L = \frac{M_{AP} \times S_V}{1.18} \quad (25)$$

Donde S_V es la superficie del respiradero. Conviene efectuar una corrección de extremidad. La columna de aire que es opuesta en movimiento en el respiradero, arrastra el aire próximo a sus extremidades, provocando un aumento de la masa

acústica del respiradero. Por lo tanto conviene reducir la longitud teórica y hacer una corrección.

$$L_V = 0,82 \times \sqrt{S_V} \quad (26)$$

La longitud definitiva será:

$$L_D = L - L_V \quad (27)$$

5. CONCLUSIONES

Como se pudo ver durante el desarrollo del trabajo, la solución al inconveniente de la emisión de ondas en contrafase por la parte posterior del altavoz puede ser encontrada en el uso de las diversas cajas acústicas aquí presentadas. Se pudo apreciar que cada una tiene diferentes ventajas e inconvenientes frente a las demás, y también las situaciones en las que es mejor usar una que otra.

No se puede llegar a decir que un tipo sobresale sobre el resto, pero sí que es necesaria una comprensión cabal del problema a resolver antes del realizar el diseño propiamente dicho. De lo contrario podría incurrirse en gastos innecesarios, o incluso en la no resolución del problema planteado.

Las aplicaciones de cada tipo de caja son variadas, y será el trabajo del ingeniero el determinar cuáles características se adaptan mejor a sus necesidades, y encontrar una solución de compromiso que satisfaga al cliente y a él mismo.

Es nuestro deseo el haber podido realizar una presentación que sirva de herramienta para otros ingenieros y para futuras referencias propias, y que pueda facilitar el estudio y solución de problemas relacionados con la elección y diseño de las diferentes cajas acústicas.

6. REFERENCIAS

- [1] Pueo Ortega Basilio, “Estudio teórico y diseño de cajas acústicas en baja frecuencia”, *Tecniacústica*, Valencia, 1997.
- [2] García Puertas Carlos, “Diseño de cajas Acústicas”, Trabajo de Grado para la Cátedra Electroacústica. Ingeniería en Telecomunicaciones y Telemática. Universidad del País Vasco. España.
- [4] (1) Wikipedia, Online enciclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Bass_reflex.
- [5] Gilabert Alberto, “Porque el bass réflex”, Revista CEC, vol 13, Junio de 2004.

7. DATOS BIOGRÁFICOS

José C. Quero, nacido en Libertador General San Martín, Jujuy el 19/12/1986. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Del 09/2010 al 02/2011 fue pasante en la empresa C&S – Communications and Systems en Wolfrenbüttel – Alemania. Sus intereses son: Auralización, realidad Acústica Virtual, Espacialización y Física Acústica.

E-mail: 50209@electrónica.frc.utn.edu.ar

Costantino Simón, nacido en Rio Tercero, Córdoba el 24/11/1986. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Electrónica de potencia, Electrónica industrial, Automatización y diseño de cajas acústicas.

E-mail: 50446@electrónica.frc.utn.edu.ar

Acosta Diego Nazario, nacido en Rio Tercero, Córdoba el 31/03/1987. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Electrónica de potencia, Automatización, Auralización y acústica de recintos.

E-mail: 50447@electrónica.frc.utn.edu.ar