

Análisis de Sistemas de Altavoces para Sub-Bajos Pasa Banda

Ricardo Saldías
Sergio Matamala
Justo Concha
Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales
Brown Norte 290, Ñuñoa, Santiago, Chile
Teléfonos: (56-2) 2745432; (56-2) 2235926
Fax: (56-2) 2238825
E-mail: laujus@entelchile.net

PACS NUMBER 43.38. B,D,F

ABSTRACT

This article shows an analysis of band pass bass reflex loudspeakers systems obtaining their analog electric circuit and using the electric circuits rules to find the frequency and impedance responses, so to predict their performance.

This systems are built with one or two small transducers in an enclosure divided in two or three chambers conected for ports. The enclosure has a band pass acoustic filter performance where the frequency response is about of 20 to 250 Hz and its efficiency is better than any direct radiation system with the same kind of transducers.

This analysis show than the responses functions have an order and this order depend of the chambers number. The last port is flared to reduce the vortex and harmonic distortion in the edge in large particles velocity.

Resumen

En este trabajo se muestra un análisis de los sistemas de altavoces pasa banda tipo reflector de bajos a través de su circuito eléctrico análogo y aplicando las leyes de circuitos eléctricos para obtener las funciones de respuesta de frecuencia y respuesta de impedancia del sistema y así obtener una predicción de su comportamiento.

Estos sistemas están constituidos por uno o dos transductores de pequeñas dimensiones en el interior de un recinto dividido en dos o tres cámaras de aire conectadas entre sí por tubos que provocan un acoplamiento múltiple. El recinto se comporta como un filtro acústico pasa banda cuya respuesta de frecuencia abarca la región de frecuencias bajas, normalmente de 20 a 250 Hz y su rendimiento permite obtener niveles superiores que cualquier sistema de radiación directa usando el mismo tipo de transductores.

De acuerdo a este análisis se muestra que las funciones corresponden a las de filtros acústicos pasa banda cuyo orden es mayor mientras más cámaras tenga. El ducto que radia potencia al aire normalmente tiene un contorno variable para reducir las turbulencias y la distorsión armónica que se produce en tubos cilíndricos a altas velocidades de flujo.

1. Introducción

Los altavoces tienen una impedancia electromecanoacústica, es decir, tienen una parte eléctrica, una mecánica y una acústica que determinan una función de respuesta tipo filtro pasa banda donde la frecuencia de corte superior de esta respuesta está determinada principalmente por la masa del diafragma y la frecuencia de corte inferior está determinada por la rigidez de las suspensiones. Por esto, un sistema de reproducción sonora debe contar con un sistema de altavoces donde se combinen distintos transductores para obtener la respuesta de frecuencia extendida. Dependiendo del tamaño del transductor se le aplica una banda de frecuencia limitada a través de un circuito crossover, dando origen así, a los sistemas multivías. Un sistema de altavoces, entonces, puede estar compuesto por dos, tres, cuatro o cinco vías, donde cada vía radia solo una porción del espectro de audio. Los sistemas de refuerzo sonoro cuentan con componentes de gran tamaño y si el recinto lo exige se debe agregar tantos componentes como sea necesario para lograr un nivel total adecuado para la cantidad de público que asistirá al evento. Los sistemas domésticos tienen algunas desventajas al respecto,

Para ello se han diseñado los sistemas para sub-bajos pasa banda. Estos sistemas están compuestos por uno o dos transductores de dimensiones pequeñas (5, 6") dentro de un recinto con varias cámaras comunicadas entre sí a través de ductos produciéndose múltiples resonancias que superpuestas son radiadas al exterior a través de un último ducto. El recinto es un verdadero filtro acústico pasa banda producto de las tres o cuatro resonancias internas y los transductores sólo sirven para excitar tales resonancias por lo que la excursión de sus diafragmas es mínima. El resultado es un gran rendimiento en frecuencias bajo los 250 Hz.

2. Glosario de Símbolos

B: Inducción efectiva del imán de un altavoz electromagnético.
 Cab: Compliancia acústica de un volumen de aire
 Cas: Compliancia acústica de las suspensiones de la membrana.
 Cms: Compliancia mecánica de la suspensión de la membrana.
 l: Longitud efectiva de la bobina en el entrehierro del imán.
 Map: Masa acústica de un ducto incluyendo la carga de aire.
 Mas: Masa acústica de la membrana del altavoz, incluyendo la carga de aire.
 Mms: Masa mecánica de la membrana del altavoz, incluyendo la carga de aire.
 Po: Presión de la fuente del circuito análogo acústico.
 Qes: Q eléctrico del altavoz.
 Qms: Q mecánico del altavoz.
 Qts: Q total del altavoz, incluyendo todas las resistencias del altavoz.
 Rat: Resistencia acústica del altavoz en el circuito análogo acústico del altavoz
 Re: Resistencia eléctrica a la corriente continua de la bobina móvil.
 Rms: Resistencia mecánica de la suspensión de la membrana.
 s: frecuencia compleja variable, = $j\omega + \sigma$
 Sd: Area efectiva de la membrana del altavoz.
 Zvc: Impedancia eléctrica en los terminales del altavoz del sistema completo.
 ω : Frecuencia angular del mínimo en la respuesta de impedancia.

3. Análisis de un altavoz electromagnético al aire libre

Un altavoz electromagnético puede ser representado y analizado a través de su circuito eléctrico análogo.

La impedancia de la fuente puede ser despreciada así como la inductancia de la bobina móvil también porque dentro del rango de frecuencia donde se realiza el análisis (frecuencias bajas) su valor es muy pequeño. La impedancia del recinto es representada por z_a o movilidad acústica que es la inversión de la impedancia acústica Z_a .

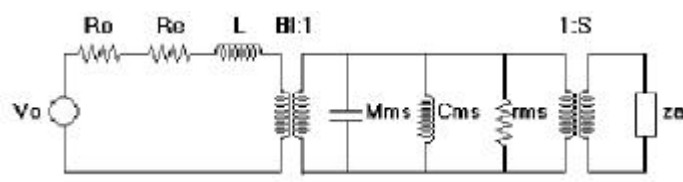


Figura 1. Circuito análogo de un altavoz electromagnético al aire libre tipo movilidad.

Según Richard Small la excursión del cono puede ser definida como

$$X(s) = \frac{1}{sCas} \frac{Ud(s)}{Po(s)} \quad (1)$$

Donde $Ud(s)$ es la velocidad de volumen de la membrana del altavoz.

La impedancia eléctrica en los terminales del altavoz puede ser obtenida transformando todos los elementos mecánicos y acústicas a sus equivalentes eléctricos.

La impedancia eléctrica de la figura 2 está dada por

$$Z_{vc}(s) = \frac{V_o(s)}{i(s)} = \frac{s^2 \operatorname{Re} MmsCms + s(\operatorname{Re}(RmsCms + ZaSd^{-2}Cms) + CmsB^{-2}l^2) + \operatorname{Re}}{s^2 MmsCms + s(RmsCms + ZaSd^{-2}Cms) + 1} \quad (2)$$

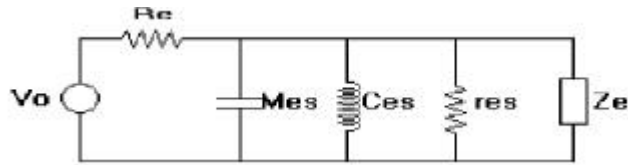


Figura 2. Circuito análogo del altavoz con los elementos mecánicos y acústicos transformados en el lado eléctrico.

Usando las relaciones

$$Ts^2 = MmsCms = MasCas \quad (3)$$

$$Cas = Sc^2 Cms \quad (4)$$

$$\frac{Ts}{Qes} = \frac{CmsB^{-2}l^2}{\operatorname{Re}} \quad (5)$$

$$\frac{Ts}{Qms} = RmsCms \quad (6)$$

$$\frac{1}{Qts} = \frac{1}{Qes} + \frac{1}{Qms} \quad (7)$$

Tenemos que

$$Z_{vc}(s) = \operatorname{Re} \frac{s^2 Ts^2 + s(Ts / Qts + CasZa) + 1}{s^2 Ts^2 + s(Ts / Qms + CasZa) + 1} \quad (8)$$

Al calcular Ud de la figura 2 y usar

$$\frac{Ts}{Qts} = RatCas \quad (9)$$

Entonces la excursión del cono X(s) puede ser calculada con la ecuación (1)

$$X(s) = \frac{1}{s^2 Ts^2 + s(Ts / Qts + CasZa) + 1} \quad (10)$$

Comparando las ecuaciones (8) y (10) se llega a la conclusión que la impedancia de entrada Zvc(s) del altavoz puede ser encontrada a través de la expresión de X(s) por

$$Z_{vc}(s) = \operatorname{Re} \frac{D(s)}{D'(s)} \quad (11)$$

Donde D(s) es el denominador de X(s). D'(s) puede ser obtenida reemplazando Qts por Qms en la expresión de D(s). Note que en general Za es una expresión donde el numerador y el denominador están expresados en s.

Usando la expresión (7), la ecuación (11) puede ser escrita también como

$$Z_{vc}(s) = \operatorname{Re} \left[1 + \frac{sTs}{Qes} X'(s) \right] \quad (12)$$

Donde X'(s) es obtenida de X(s) reemplazando Qts por Qms.

4. Sistemas de altavoces Pasa Banda

La filosofía de altavoces tipo sub-bajos Band Pass parte de la necesidad de lograr un gran rendimiento y una respuesta de frecuencia bajo los 250 Hz aproximadamente con altavoces que ocupen poco espacio y así poder esconderlos en el mobiliario del hogar.

De ahí, que se piense que para obtener un sistema subwoofer basta basarse en filtros eléctricos tipo pasa banda. En general, los filtros pasa banda están constituidos por un filtro pasa altos seguido de un pasa bajos de tal forma que la frecuencia de corte del pasa altos es menor que la del pasa bajos. Si se colocan varios filtros en cascada el orden irá aumentando progresivamente.

Ahora bien, si el altavoz se monta en un panel que se instala en el interior de un recinto del tal forma que la radiación frontal y la posterior dan para volúmenes diferentes estaremos en presencia de filtros pasa banda. Por ende el recinto estará subdividido en cámaras que en el fondo darán el orden de este filtro.

Uno de estos sistemas es el Bose AM-5 que está diseñado para ser utilizado en instalaciones domésticas. Consta de dos altavoces satélites de dimensiones pequeñas que, a su vez, están constituidos por dos cubos unidos por un eje de forma de poder cambiar la orientación de los altavoces. Estos satélites radian un espectro de frecuencias medias altas y altas con una gran eficiencia. El subwoofer es un recinto tipo band pass en cuyo interior se montaron dos altavoces de 5", cada uno conectado a los canales L y R de un amplificador. La radiación frontal y posterior son utilizadas para comprimir las partículas de aire contenidas en dos volúmenes frontal y posterior respectivamente para posteriormente desembocar en una cámara común que los comunica con el exterior. El dibujo esquemático describe el diseño.

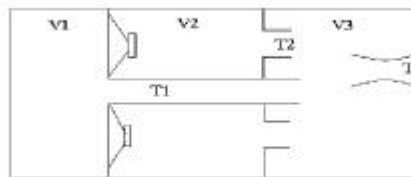


Figura 3. Diagrama del subwoofer Bose

La radiación frontal de los altavoces hace vibrar las partículas de aire contenidas en el volumen V1. La radiación posterior de los altavoces hace vibrar las partículas contenidas en el volumen V2. El volumen V1 está comunicado con el volumen V3 a través del tubo T1 y el volumen V2 está comunicado al volumen V3 a través de dos tubos que actúan como si fueran uno solo que llamaremos T2. El volumen V3 se comunica con el exterior a través de un último tubo acampanado T3.

El circuito análogo del sistema band pass es mostrado en la figura 4. Este circuito tiene una Z_a equivalente que es la que se reemplaza en la expresión (2).

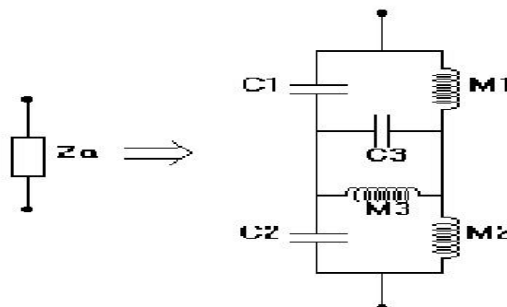


Figura 4. Circuito análogo tipo impedancia del subwoofer del la figura 5

El último tubo que da al exterior tiene forma acampanada para reducir las turbulencias y la distorsión armónica. El largo efectivo de este ducto está dado por

$$L_{\text{eff}} = \int_0^L \frac{S_0}{S(x)} dx \quad (24)$$

En esta ecuación, L es la longitud física de la puerta y x es la coordenada a lo largo del eje de la puerta. La fórmula (24) asume un flujo uniforme en cada sección transversal del ducto. No es una hipótesis precisa en los extremos del ducto, el flujo complejo ahí puede ser tomado en cuenta introduciendo correcciones de extremo.

5. Predicción matemática

La impedancia acústica del recinto es

$$Z_a = \frac{s^2 \text{Map1Map3Cab1} + \text{Map2s}^4 \text{Map1Cab1Cab3Map3} + \text{Map2s}^2 \text{Map1Cab1} + \text{Map2Map3s}^2 \text{Cab1} + \text{Map1s}^4 \text{Map2Cab2Cab3Map3} + \text{Map1s}^2 \text{Cab3Map3} + \text{Map1Map3s}^2 \text{Cab2} + \text{Map1s}^2 \text{Map2Cab2} + \text{Map1} + \text{Map2s}^2 \text{Cab3Map3} + \text{Map2Map3s}^2 \text{Cab2} + \text{Map2}}{(s^4 \text{Map1Map3Cab1Cab2} + s^4 \text{Map2Cab2Cab3Map3} + s^2 \text{Map2Cab2} + s^6 \text{Map2Cab2Map1Cab1Cab3Map3} + s^4 \text{Map2Cab2Map1Cab1} + s^4 \text{Map2Cab2Map3Cab1} + \text{Map3s}^2 \text{Cab2} + s^2 \text{Cab3Map3} + 1 + s^4 \text{Map1Cab1Cab3Map3} + s^2 \text{Map1Cab1} + \text{Map3s}^2 \text{Cab1})}$$

Si reemplazamos este valor en la ecuación (10) podemos obtener la función de desplazamiento del diafragma de los transductores.

$$X(s) = \frac{1}{(s^2 t s^2 + s(t s / Q_{ms} + s C_{as} ((\text{Map1Map2Cab2Cab3Map3} + \text{Map2Map1Cab1Cab3Map3}) s^4 + (\text{Map1Cab3Map3} + \text{Map2Map1Cab1} + \text{Map1Map3Cab1} + \text{Map2Cab3Map3} + \text{Map1Map3Cab1} + \text{Map2Map3Cab2} + \text{Map1Map2Cab2}) s^2 + \text{Map1} + \text{Map2})) / (s^6 \text{Map2Cab2Map1Cab1Cab3Map3} + (\text{Map2Cab2Cab3Map3} + \text{Map1Map3Cab1Cab2} + \text{Map2Cab2Map3Cab1} + \text{Map2Cab2Map3Cab1} + \text{Map2Cab2Map1Cab1} + \text{Map1Cab1Cab3Map3}) s^4 + (\text{Map2Cab2} + \text{Cab3Map3} + \text{Map3Cab2} + \text{Map3Cab1} + \text{Map1Cab1}) s^2 + 1) + 1)}$$

Si se reemplaza Q_{ms} por Q_{ts} en esta expresión trabajaremos con $X'(s)$ que puede ser agregada a la expresión (12) y así obtener la impedancia eléctrica del sistema

$$Z_{vc}(s) = \text{Re} \left[1 + \frac{s T s}{Q_{es}} X'(s) \right]$$

Si evaluamos esta expresión reemplazando los parámetros del sistema se obtiene la siguiente gráfica:

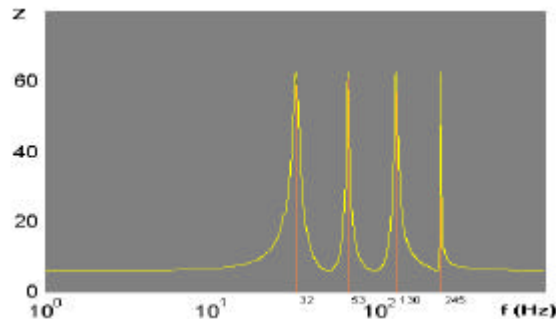


Figura 5. Respuesta de impedancia de la bobina móvil teórica.

En la figura se aprecian cuatro peaks de impedancia y tres depresiones. Las tres depresiones se producen en 44, 80 y 190 Hz y corresponden a las frecuencias de resonancia acústica del

sistema. En estas frecuencias se produce mínima excursión del diafragma de los altavoces resultando que la mayor contribución al nivel total de salida del sistema se debe a las resonancias de las subcámaras internas. Esta es la gran diferencia con las gráficas experimentales, y esos factores van desde pérdidas no consideradas hasta acoples mutuales que están fuera del análisis.

La diferencia básica con la gráfica de respuesta de impedancia medida es la amplitud de los peaks. Esto puede deberse a que se están omitiendo elementos resistivos que son difíciles de cuantificar como las pérdidas producidas en el interior por las paredes del recinto y en los tubos. Normalmente estos elementos son llamados Rab y Rap debido a la caja y a la puerta respectivamente. También puede haber un factor de pérdida por filtraciones a pesar que por inspección el recinto parece muy bien sellado.

La función de respuesta de frecuencia se denomina G(s) y su expresión aparente es

$$G(s) = \frac{s^2 t_s^2 / (s^2 t_s^2 + s(t_s / Q_{ms} + s C_{as})) (Map_1 Map_2 Cab_3 Map_3 + Map_2 Map_1 Cab_1 Cab_3 Map_3) s^4 + (Map_1 Cab_3 Map_3 + Map_2 Map_1 Cab_1 + Map_1 Cab_1 + Map_2 Cab_3 Map_3 + Map_1 Map_3 Cab_2 + Map_2 Map_3 Cab_1 + Map_2 Map_3 Cab_2 + Map_1 Map_2 Cab_2) s^2 + Map_1 + Map_2}{(s^6 Map_2 Cab_2 Map_1 Cab_1 Cab_3 Map_3 + (Map_2 Cab_2 Cab_3 Map_3 + Map_1 Map_3 Cab_1 Cab_2 + Map_2 Cab_2 Map_3 Cab_1 + Map_2 Cab_2 Map_1 Cab_1 + Map_1 Cab_1 Cab_3 Map_3) s^4 + (Map_2 Cab_2 + Cab_3 Map_3 + Map_3 Cab_2 + Map_3 Cab_1 + Map_1 Cab_1) s^2 + 1) + 1}$$

$$G(s) = \frac{(a_1^2 a_2^2 t_s^2 t_b^2 t_3^2 t_1^2 s^8 Q_{ms} + t_s^2 Q_{ms} (t_b^2 t_3^2 a_3 a_2 + t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^2 t_3^2 a_1 a_2 + t_b^3 t_1^2 a_3 a_1) a_1 a_2 s^6 t_s^2 Q_{ms} (t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^3 t_1^2 a_3 a_2 + a_3 t_b^3 t_1^2 a_1) a_1 a_2 s^4 + t_s^2 Q_{ms} a_1^2 a_2^2) / (a_1^2 a_2^2 t_s^2 t_b^2 t_3^2 t_1^2 s^8 Q_{ms} + a_1^2 a_2^2 t_s t_b^2 t_3^2 t_1^2 s^7 + a_1 a_2 (t_s^2 t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_s^2 t_b^3 t_1^2 a_3 a_1 + t_s^2 t_b^2 t_3^2 a_3 a_2 + t_s^2 t_b^2 t_3^2 a_1 a_2 + t_s^2 t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + Cas Map_1 t_b^2 t_3^2 a_1 a_2 + Cas Map_2 t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^2 t_3^2 t_1^2 a_1 a_2) s^6 Q_{ms} + a_1 a_2 (t_s t_b^2 t_3^2 a_3 a_2 + t_s t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_s t_b^3 t_1^2 a_3 a_1 + t_s t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + t_s t_b^2 t_3^2 a_1 a_2) s^5 + a_1 a_2 (t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_s t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + Cas Map_2 t_b^2 t_1^2 a_1 a_2 + Cas Map_1 t_b^3 a_1 a_2 + t_s t_b^2 a_1 a_2 + Cas Map_3 t_b^2 a_1 a_2 + Cas Map_2 t_b^3 a_1 a_2 + t_b^2 t_3^2 a_1 a_2 + t_b^3 t_1^2 a_1 a_2 + t_b^3 t_1^2 a_3 a_1 + t_b^2 t_3^2 a_3 a_2 + t_s^2 a_3 t_b^3 a_2 + t_s t_b^2 a_1 a_2 + t_s a_3 t_b^3 a_2) s^3 + a_1 a_2 (t_b^3 a_3 a_2 + a_3 t_b^3 a_2 a_1 + Cas Map_2 a_1 a_2 + t_s^2 a_1 a_2 + Cas Map_1 a_1 a_2 + t_b^2 a_1 a_2) s^2 Q_{ms} + a_1^2 a_2^2 t_s + a_1^2 a_2^2 Q_{ms})$$

Donde $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ corresponden a las razones de compliancias de los transductores y las compliancias del recinto Cab1, Cab2, Cab3 respectivamente
 t_s es la constante de tiempo de los altavoces al aire libre $1/\omega_s$
 t_{b1}, t_{b2} y t_{b3} corresponden a las constantes de tiempo de las frecuencias de resonancia del recinto

6. Conclusiones.

Sin duda que la aparición de estos sistemas ha mejorado notablemente la reproducción de los sistemas de alta fidelidad. Primero que nada, se elimina el factor de la distorsión generada por la vibración forzada de los altavoces de frecuencias altas producto de la radiación del altavoz de frecuencia baja cuando estos comparten el mismo recinto. Se demuestra que con pequeños altavoces y con un recinto de pequeñas dimensiones se logran rendimiento y respuesta de frecuencia más allá de sus limitaciones. Conocer este tipo de diseños es indispensable para poder realizar innovación tecnológica y poder aplicarlos, quizás, en sistemas de mayor envergadura tales como auditorios, salas de cine e incluso sistemas de refuerzo sonoro. El sistema Bose Am-5 es un excelente ejemplo de lo que se puede hacer a nivel doméstico, el siguiente paso será saber si es posible y práctico usar la misma teoría para diseñar sistemas de alta potencia.

7. Referencias

- (1) R.H Small "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis." J. Audio Eng. Soc. Vol.20 pp383-395 (Junio 1972)
- (2) A. P. Berkhoff. "Impedance Analysis of Subwoofer Systems." J. Audio Eng. Soc. Vol. 42. N°1/2 Enero-Febrero
- (3) N. Bert Roozen, Marije Bockholts, Pascal van Eck, A. Hirschberg. "Vortex Sound in Bass-reflex Ports of Loudspeakers. Part I: Observation of Response to Harmonic Excitation and Remedial Measures; and Part II: A Method to Estimate the Point of Separation". J. Acoustical Soc. Am. N° 104. October 1998