



# Análisis de Sistemas de Altavoces para Sub-Bajos Pasa Banda

*Ricardo Saldías*

Ingeniero de Ejecución en Sonido

*Rodrigo Muñoz*

Licenciado en Ciencias de la Ingeniería

*Justo Concha*

Ingeniero de Ejecución en Sonido

**Nda. Este paper fue presentado en II Congreso Iberoamericano de Acústica organizado por la FIA (federación Internacional de Acústica) en octubre de 2000 en Madrid-España**

## Resumen

Este artículo muestra un análisis de un sistema de altavoces sub-bajos pasa banda de 8° orden que se utiliza principalmente en sistemas Home Theater y que logra un gran rendimiento y una respuesta de frecuencias bajas excelente con altavoces muy pequeños.

El objetivo de este trabajo es que este análisis dé como resultado la obtención de las funciones de respuesta de frecuencia y de impedancia para poder establecer procedimientos de diseños. Esta es la primera etapa de una línea de investigación en el área de la Electroacústica iniciada en la Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales cuyo propósito principal es practicar innovación tecnológica y crear una escuela de conocimiento en Latinoamérica.

## 1. Introducción

Con la aparición de la tecnología digital se ha conseguido extender las capacidades de los sistemas de audio a límites insospechados hasta hace poco, e incluso en la actualidad es difícil hablar de límites. Respuestas de frecuencia que van más allá del rango audible y rangos dinámicos que exceden largamente las capacidades del oído humano son características comunes de los componentes de audio digital. Pero, este mejoramiento se ha visto entrabado por la transducción electromecanoacústica, es decir, aquella etapa donde la señal de audio vuelve a convertirse en sonido.

Los altavoces tienen una impedancia que es 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.

Mientras más pequeño sea el altavoz mejor reproductor de frecuencias altas será, con el gran problema de la radiación de potencia al tener que mover un gran volumen de aire con una membrana pequeña. La solución es dotarlos de un adaptador de impedancia acústica, la bocina, constituyendo los llamados sistemas de radiación indirecta.

Mientras más grande sea el altavoz mejor radiador de frecuencias bajas será, donde la capacidad de excursión de la membrana determina la potencia del sistema en los llamados sistemas de radiación directa. Para controlar la radiación de aquellas frecuencias cuya longitud de onda sea semejante o mayor a las dimensiones del altavoz, se instala el transductor en un recinto o caja acústica el cual puede ser cerrado o ventilado. En este caso el sistema de altavoz está constituido por el transductor y la caja acústica.

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, el espacio y el valor estético que deben cumplir dentro de un hogar. Sería ilógico y poco estético tener un sistema casero con altavoces de 18" para poder escuchar las frecuencias bajas que uno desea, además que estos componentes están diseñados para trabajar a grandes potencias y distancias. El problema está en lograr un buen rendimiento en frecuencias bajas con un transductor de dimensiones reducidas.

Es así, como últimamente se ha hecho muy popular el concepto de altavoz Sub-bajo (Sub-Woofer) tipo band pass dentro de los sistemas domésticos, especialmente en los promocionados Home Theater.

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.

Como grupo de trabajo se trazó el objetivo de analizar estos sistemas para poder encontrar las funciones de respuesta de impedancia y de frecuencia paso necesario para poder llegar a algún método de diseño y poder experimentar con algunas innovaciones tecnológicas. Los modelos que ya existen en el mercado como ya se mencionó difieren en el número de transductores y de cámaras del recinto. Para desarrollar este trabajo se optó por analizar el sistema BOSE AM-5 por su popularidad y eficiencia. Los resultados de este análisis permitirán diseñar sistemas a partir de los parámetros del transductor o de las respuestas requeridas.



## 2. Glosario de Símbolos

*B*: Inducción efectiva del imán de un altavoz electromagnético.

*c* : Velocidad del sonido.

*Cab*: Compliancia acústica de un volumen de aire

*Cas*: Compliancia acústica de las suspensiones del woofer.

*Cat*: Compliancia acústica combinada de la suspensión del transductor y del recinto.

*Cms*: Compliancia mecánica de la suspensión del woofer.

*D(s)*: Polinomio característico.

*D'(s)*: *D(s)* reemplazando *Qts* por *Qms*.

*D*: Diámetro de un ducto

*Vo*: Voltaje de salida a circuito abierto de la fuente.

*F*: Fuerza de la bobina móvil sobre el cono del altavoz.

*i*: Flujo de corriente a través de la bobina móvil.

*l*: Longitud efectiva de la bobina en el entrehierro del imán.

*L*: Largo de los ductos.

*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 equivalente total 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 del woofer.

*s*: frecuencia compleja variable,  $= j\omega + \sigma$

*Sd*: Area efectiva de la membrana del altavoz.

*u*: Velocidad de la bobina móvil inducida por el voltaje de la fuente.

*Ud*: Velocidad de volumen de la membrana del altavoz.

*v*: Velocidad de la bobina móvil.

*X(s)*: Función de desplazamiento, relacionando la excursión del cono al voltaje de entrada.

*X'(s)*: *X(s)* reemplazando *Qts* por *Qms*.

*Za*: Impedancia acústica del recinto del altavoz vista por la membrana del altavoz.

*Zvc*: Impedancia eléctrica en los terminales del altavoz del sistema completo.

$\alpha$ : Razón de la compliancia del altavoz a la compliancia del recinto.

$\rho_o$ : Densidad del aire.

$\omega$ : Frecuencia angular del mínimo en la respuesta de impedancia.

$\omega_b$ : Frecuencia angular de la resonancia de los reflectores de bajos.

## 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 fuente resulta ser el amplificador de potencia. Este se comporta como una fuente de voltaje donde  $V_o$  corresponde al voltaje a circuito abierto. Su impedancia de salida es muy baja en relación a la impedancia del transductor y suele despreciarse. En la figura 1, la impedancia de salida del amplificador está representada por  $R_o$  que es la resistencia eléctrica de salida. La parte eléctrica del transductor consta de una parte resistiva,  $R_e$  y una parte reactiva correspondiente a la inductancia de la bobina móvil,  $L$ . Para fines del análisis, entendiendo que el foco estará en el rango del pistón, es decir, el rango de frecuencia más bajo en que responde el transductor, en varios pasajes se observará que este elemento será despreciado. La parte mecánica está dada por la masa mecánica del sistema móvil,  $M_{ms}$ , la compliancia total de las suspensiones,  $C_{ms}$  y la responsabilidad mecánica de las suspensiones,  $r_{ms}$ , que resulta ser el inverso de la resistencia mecánica de las suspensiones  $R_{ms}$ . Cuando se dice que el altavoz está al aire libre se refiere a que no está montado en un recinto o caja. En este caso, la impedancia de carga resulta ser la impedancia acústica del aire. En este caso, como se está usando la analogía tipo movilidad, se usa la representación  $z_a$  correspondiente a la movilidad acústica del aire, el inverso de la impedancia acústica del aire,  $Z_a$ .

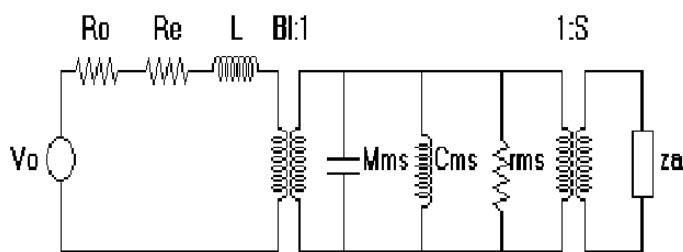


Figura 1. Circuito análogo de un altavoz electromagnético al aire libre tipo movilidad.

Según Richard Small la excursión del cono puede ser definida como

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

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 acústicos al lado eléctrico.

La impedancia eléctrica de la figura 2 está dada por...



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

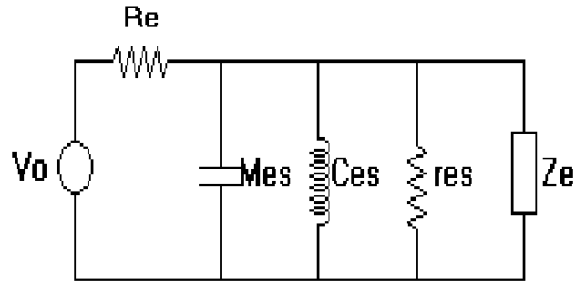


Figura 2. Circuito análogo del altavoz con los elementos mecánicos y acústicos transformados en el lado eléctrico.

Como se puede apreciar en la figura 2, desaparecieron los transformadores y salvo  $V_o$  y  $R_o$ , los otros elementos son los equivalentes eléctricos.

Usando las relaciones

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

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

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

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

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

Tenemos que

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



Como se puede apreciar en la función (8), tanto el numerador como el denominador resultan ser un polinomio complejo (en  $j\omega$ ) de segundo orden.

Al calcular  $U_d$  de la figura 2 y usar

$$\frac{T_s}{Q_{ts}} = RatCas \quad (9)$$

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

$$X(s) = \frac{1}{s^2 T_s^2 + s(T_s / Q_{ts} + CasZ_a) + 1} \quad (10)$$

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

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

Donde  $D(s)$  es el denominador de  $X(s)$ .  $D'(s)$  puede ser obtenida reemplazando  $Q_{ts}$  por  $Q_{ms}$  en la expresión de  $D(s)$ . Note que en general  $Z_a$  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

$$Z_{vc}(s) = Re \left[ 1 + \frac{sT_s}{Q_{es}} X'(s) \right] \quad (12)$$

Donde  $X'(s)$  es obtenida de  $X(s)$  reemplazando  $Q_{ts}$  por  $Q_{ms}$ .

#### 4. Sistemas de altavoces Band Pass

El concepto 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.

El diseño de sistemas de altavoces de radiación directa ha sido ampliamente difundido en los últimos treinta años a tal punto de que hoy en día casi todos los transductores de nivel profesional especifican sus parámetros mecánicos. Los trabajos de Olson, Beranek, Thiele y Small han permitido predecir, en un alto porcentaje, el comportamiento de estos sistemas ya sea de caja cerrada o tipo reflector de bajos. Estos trabajos se basan en el análisis de los sistemas usando la teoría de circuitos eléctricos como se demostró en la sección anterior con el análisis del transductor al aire libre. 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.

El sistema de radiación directa tipo caja cerrada resulta tener la función de un filtro pasa altos de 2° orden dentro del rango del pistón. El sistema de radiación directa tipo reflector de bajos resulta tener una función de un filtro pasa altos de 4° orden dentro del rango del pistón.

Ahora bien, si el altavoz se monta en un panel que se instala en el interior de un recinto de 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.

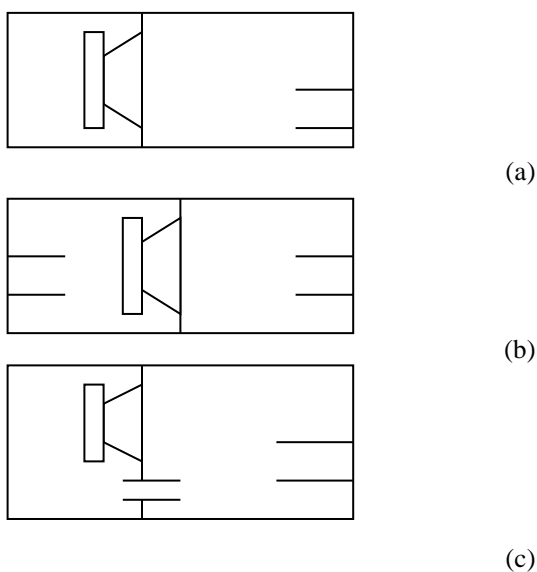


Figura 3. Ejemplos de sistemas Band pass básicos.

Como se aprecia en la figura 3 (a) el altavoz está montado de tal forma que la radiación posterior da a un volumen cerrado y la radiación frontal a un volumen ventilado. El compartimiento 1 (cerrado) está combinado con la compliancia acústica  $Cas$  del altavoz en la compliancia acústica  $Cat$  de la siguiente manera:

$$Cat = \frac{Cas \cdot Cab1}{Cas + Cab1} \quad (13)$$

La frecuencia de resonancia del altavoz cargado por el volumen del compartimiento 1 está definido por

$$\frac{1}{(2\pi Fc1)^2} = Tc1^2 = MasCat \quad (14)$$



La impedancia típica posee dos peaks y un mínimo. Este último está dado por la resonancia entre el ducto y el volumen frontal.

El diseño de la figura 3(b) considera el montaje del altavoz de tal forma que la radiación frontal y posterior, actúa sobre sendos volúmenes ventilados donde aparecen  $Cab1$  y  $Map1$  de la radiación posterior y  $Cab2$  y  $Map2$  de la radiación frontal que interactúan entre sí dando lugar a...

$$T_{B1}^2 = Map1Cab1 \quad (15)$$

$$T_{B2}^2 = Map2Cab2 \quad (16)$$

El prototipo de la figura 3 (c) corresponde a un diseño con un altavoz montado de tal forma que la radiación posterior da a un volumen ventilado a un segundo volumen ventilado al exterior donde se encuentra con la radiación frontal. Por supuesto la sintonía de ambas subcámaras es diferente para reducir las cancelaciones por oposición de fase. La curva de impedancia dará un resultado parecido al diseño 3(b).

## 5. Sistema de Altavoces BOSE AM-5

El sistema de altavoces Bose AM-5 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 (ver Figura 4). Estos satélites radian un espectro de frecuencias medias altas y altas con una gran eficiencia. La señal de entrada es filtrada mediante un circuito crossover contenido en el subwoofer. La señal proveniente del amplificador de potencia se conecta a las entradas del subwoofer. Como son dos canales el subwoofer tendrá una entrada L y una R. Los satélites son alimentados de las salidas del subwoofer, es decir del crossover.



Figura 5. Sistema Bose AM-5

El subwoofer que se aprecia al fondo de la figura 5 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.

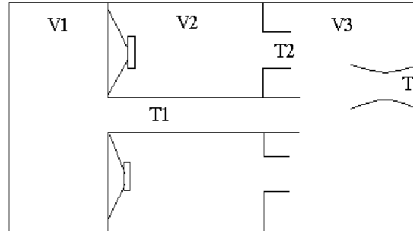


Figura 6. Diagrama del subwoofer Bose

A cada altavoz dentro del subwoofer se le aplica una señal de espectro completo dado que el sistema es un filtro acústico pasa banda. Esto quiere decir que el circuito crossover es un simple pasa altos que filtra la señal que recibirán los altavoces satélites.

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 7. Este circuito tiene una  $Z_a$  equivalente que es la que se reemplaza en la expresión (2). Para poder evaluar esta expresión es necesario conocer los parámetros del sistema los que son dados en la tabla 1.

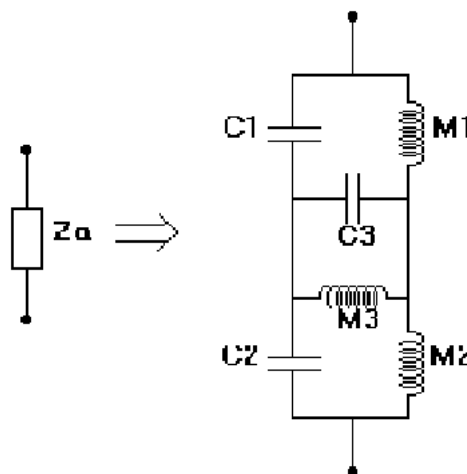


Figura 7. Circuito análogo tipo impedancia del subwoofer de la figura 6



El circuito de la figura 7, representa la carga acústica que le ofrece el recinto al transductor de la figura 2. Como se puede apreciar es un circuito doble delta, lo que genera una respuesta de complejas interrelaciones entre sus elementos.

## 6. Masa Acústica de un Ducto Acampanado

En niveles de presión sonora altos, la puerta reflectora de bajos cilíndrica típica de los altavoces produce sonidos tipo soplidos, especialmente en el caso de cajas de altavoces pequeñas con puertas reflectoras de bajos angostas. Los sonidos tipo soplidos son causados por la desembocadura del flujo acústico en el extremo exterior de la puerta a velocidades de flujo altas. Se ha observado que las ondas estacionarias acústicas en la dirección longitudinal de la puerta son excitadas por pulsos generados periódicamente por los bordes. Esto es demostrado por mediciones históricas de los sonidos turbulentos de un sistema de altavoz con una puerta reflectora de bajos emitiendo una señal armónica. El sonido de turbulencia de banda ancha parece ser más débil que estos sonidos determinísticos. Se ha descubierto que, en frecuencia de resonancia cercana a 1 kHz, el nivel de potencia de los sonidos soplantes pueden ser reducidos en 8 dB usando una sección transversal que diverge gradualmente hacia ambos extremos de la puerta con un ángulo-pendiente en los extremos de la puerta de alrededor de  $6^\circ$  y redondeando los bordes en ambos extremos.

En el caso de las así llamadas cajas tipo reflector de bajos se aplica una puerta. La puerta es un ducto abierto que conecta el volumen de aire encerrado dentro de la caja con el ambiente que lo rodea. La puerta contribuye a la reproducción en la parte más baja del rango de frecuencia alrededor de la frecuencia de Helmholtz del sistema caja-puerta. Sin una puerta, el volumen de la caja debería ser aproximadamente el doble para lograr el mismo rendimiento acústico.

La frecuencia de Helmholtz puede ser calculada con la fórmula

$$F_B = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{L_{eff}V}} \quad (17)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $S_0$  es un área transversal de referencia de la puerta,  $V$  es el volumen de la caja y  $L_{eff}$  está definido como

$$L_{eff} = \int_0^L \frac{S_0}{S(x)} dx \quad (18)$$

En esta ecuación,  $L$  es la longitud física de la puerta,  $x$  es la coordenada a lo largo del eje de la puerta y por tanto,  $S(x)$  es la función con que varía la sección del ducto. La expresión (18) 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.

En el caso de cajas con un volumen  $V$  pequeño, el área transversal  $S_0$  tiene que ser pequeña debido a una longitud  $L$  física de la puerta limitada y una frecuencia de resonancia dada. Esto significa que, en cajas pequeñas, con un área transversal pequeña, la velocidad del flujo



acústico en la puerta tiene que ser alto para obtener un nivel de presión sonora en frecuencias bajas comparable con el nivel de presión sonora que puede ser obtenido con sistemas reflectores de bajos más grandes.

Si el ducto es cilíndrico y por tanto la sección es constante, la expresión general de masa acústica es:

$$Ma = \frac{\rho_0 L}{S_0} \quad (19)$$

Donde L es:

$$L = L_{eff} + L'$$

L' es la corrección de extremos.

## 7. Predicción matemática

La impedancia acústica del recinto es

$$Z_a = \frac{s^2 Map1 Map3 Cab1 + Map2 s^4 Map1 Cab1 Cab3 Map3 + Map2 s^2 Map1 Cab1 + Map2 Map3 s^2 Cab1 + Map1 s^4 Map2 Cab2 Cab3 Map3 + Map1 s^2 Cab3 Map3 + Map1 Map3 s^2 Cab2 + Map1 s^2 Map2 Cab2 + Map1 + Map2 s^2 Cab3 Map3 + Map2 Map3 s^2 Cab2 + Map2}{(s^4 Map1 Map3 Cab1 Cab2 + s^4 Map2 Cab2 Cab3 Map3 + s^2 Map2 Cab2 + s^6 Map2 Cab2 Map1 Cab1 Cab3 Map3 + s^4 Map2 Cab2 Map1 Cab1 + s^4 Map2 Cab2 Map1 Cab1 + s^4 Map2 Cab2 Map3 Cab1 + Map3 s^2 Cab2 + s^2 Cab3 Map3 + 1 + s^4 Map1 Cab1 Cab3 Map3 + s^2 Map1 Cab1 + Map3 s^2 Cab1)}$$

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

$$X(s) = \frac{1}{(s^2 ts^2 + s(ts/Qms + sCas((Map1 Map2 Cab2 Cab3 Map3 + Map2 Map1 Cab1 Cab3 Map3)s^4 + (map1 Cab3 Map3 + Map2 Map1 Cab1 + Map1 Map3 Cab1 + Map2 Cab3 Map3 + Map1 Map3 Cab1 + Map2 Map3 Cab2 + Map1 Map2 Cab2)s^2 + Map1 + Map2)/(s^6 Map2 Cab2 Map1 Cab1 Cab3 Map3 + (Map2 Cab2 Cab3 Map3 + Map1 Map3 Cab1 Cab2 + Map2 Cab2 Map3 Cab1 + Map2 Cab2 Map3 Cab1 + Map2 Cab2 Map1 Cab1 + Map1 Cab1 Cab3 Map3)s^4 + (Map2 Cab2 + Cab3 Map3 + Map3 Cab2 + Map3 Cab1 + Map1 Cab1)s^2 + 1)) + 1)}$$

Si se reemplaza Qms por Qts en esta expresión trabajaremos con X'(s) que puede ser agregada a la expresión (12) y así obtener la impedancia eléctrica del sistema

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

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



Parámetros de los altavoces	
Fs	60 Hz
Re	5.5 $\Omega$
Bl	13.3 Tm
Le	0.0025 He
Mms	14.9 gm
Cms	$4.722 \times 10^{-4}$ m/N
Cas	$6.029 \times 10^{-8}$ m <sup>5</sup> /N
Qes	0.419
Qms	3.96
Qts	0.378
Sd	0.0113m <sup>2</sup>
Parámetros de la caja	
Ca1 (volumen 1)	$2.5 \times 10^{-8}$ m <sup>5</sup> /N
Ca2 (volumen2)	$4.43 \times 10^{-8}$ m <sup>5</sup> /N
Ca3 (volumen 3)	$6.8 \times 10^{-8}$ m <sup>5</sup> /N
Ma1 (puerta 1)	39 Kg/m <sup>4</sup>
Ma2 (2 puertas)	180 Kg/m <sup>4</sup>
Ma3 (puerta 3)	50 Kg/m <sup>4</sup>

Tabla. Resumen de parámetros del sistema

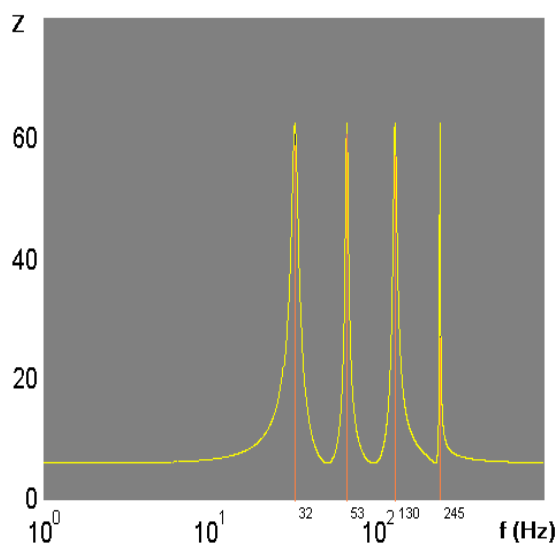


Figura 8. Respuesta de impedancia de la bobina móvil teórica.

En la figura 8 se aprecian cuatro peaks de impedancia y tres depresiones entre ellos. 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  $R_{ab}$  y  $R_{ap}$  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

$$G(s) = \frac{s^2 t s^2 / (s^2 t s^2 + s(t s / Q_{ms} + s C a s (Map1 Map2 Cab3 Map3 + Map2 Map1 Cab1 Cab3 Map3) s^4 + (Map1 Cab3 Map3 + Map2 Map1 Cab1 + Map1 Cab1 + Map2 Cab3 Map3 + Map1 Map3 Cab2 + Map2 Map3 Cab1 + Map2 Map3 Cab2 + Map1 Map2 Cab2) s^2 + Map1 + Map2) / (s^6 Map2 Cab2 Map1 Cab1 Cab3 Map3 + (Map2 Cab2 Cab3 Map3 + Map1 Map3 Cab1 Cab2 + Map2 Cab2 Map3 Cab1 + Map2 Cab2 Map1 Cab1 + Map1 Cab1 Cab3 Map3) s^4 + (Map2 Cab2 + Cab3 Map3 + Map3 Cab2 + Map3 Cab1 + Map1 Cab1) s^2 + 1)) + 1)$$

$$G(s) = \frac{(\alpha_1^2 \alpha_2^2 t s^2 t b^2 t b^3 t b^1 s^8 Q_{ms} + t s^2 Q_{ms} (t b^2 t b^3 \alpha_3 \alpha_2 + t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t b^2 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t b^2 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + t b^3 t b^1 \alpha_3 \alpha_1) \alpha_1 \alpha_2 s^6 t s^2 Q_{ms} (t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t b^2 \alpha_1 \alpha_2 + t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + t b^3 \alpha_3 \alpha_2 + \alpha_3 t b^3 \alpha_1) \alpha_1 \alpha_2 s^4 + t s^2 Q_{ms} \alpha_1^2 \alpha_2^2) / (\alpha_1^2 \alpha_2^2 t s^2 t b^2 t b^3 t b^1 s^8 Q_{ms} + \alpha_1^2 \alpha_2^2 t s^2 t b^2 t b^3 t b^1 s^7 + \alpha_1 \alpha_2 (t s^2 t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 t b^3 t b^1 \alpha_3 \alpha_1 + t s^2 t b^2 t b^3 \alpha_3 \alpha_2 + t s^2 t b^2 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 t b^2 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map1 t b^2 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map2 t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t b^2 t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2) s^6 Q_{ms} + \alpha_1 \alpha_2 (t s^2 t b^2 t b^3 \alpha_3 \alpha_2 + t s^2 t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 t b^3 t b^1 \alpha_3 \alpha_1 + t s^2 t b^2 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 t b^2 t b^3 \alpha_1 \alpha_2) s^5 + \alpha_1 \alpha_2 (t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map2 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map1 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 t b^2 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map3 t b^2 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map2 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + t b^2 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + t b^3 t b^1 \alpha_1 \alpha_2 + t b^3 t b^1 \alpha_3 \alpha_1 + t b^2 t b^3 \alpha_3 \alpha_2 + t s^2 \alpha_3 t b^3 \alpha_2 + t s^2 t b^2 \alpha_1 \alpha_2 + t s \alpha_3 t b^3 \alpha_2) s^3 + \alpha_1 \alpha_2 (t b^3 \alpha_3 \alpha_2 + \alpha_3 t b^3 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map2 \alpha_1 \alpha_2 + t s^2 \alpha_1 \alpha_2 + C a s Map1 \alpha_1 \alpha_2 + t b^1 \alpha_1 \alpha_1 + t b^2 \alpha_1 \alpha_2) s^2 Q_{ms} + \alpha_1^2 \alpha_2^2 t s + \alpha_1^2 \alpha_2^2 Q_{ms})$$

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

Se dice que estas expresiones son aparentes porque no han podido ser evaluadas y poder así comparar una gráfica agregando los parámetros del sistema con el gráfico de respuesta de frecuencia mostrada anteriormente en la figura 8.

Una de las principales características que tendría este sistema es que, al tener tres cámaras, su respuesta es muy compleja y la zona de resonancia resulta ser más ancha en comparación con sus contrapartes de 4° y 6° orden. Por lo tanto, el sub-bajos tipo band pass de 3 cámaras, tendrá un mayor ancho de banda, pudiendo llegar su respuesta de frecuencia a rangos del orden de 250 Hz o más.



## 8. 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.

## Referencias bibliográficas

- (1) L.L. Beranek, *Acoustics*. American Institute of Physics for the Acoustical Society of America. New York. 1986
- (2) R.H Small "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis." J. Audio Eng. Soc. Vol.20 pp383-395 (Junio 1972)
- (3) A. P. Berkhoff. "Impedance Analysis of Subwoofer Systems." J. Audio Eng. Soc. Vol. 42. N°1/2 Enero-Febrero
- (4) 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