

## Estudio teórico y diseño de cajas acústicas en baja frecuencia

Basilio Pueo Ortega

Escuela Universitaria de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia.

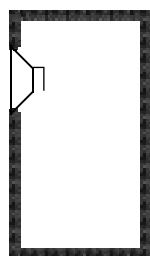
Ctra. Nazaret-Oliva, s/n. 46730 Gandía

Synthesis of the basic parameters of a complete loudspeaker system or an enclosure for a given loudspeaker driver to achieve some desired performance constitutes a major part of the loudspeaker system design problem. A method is described where the loudspeaker system parameters are chosen to achieve some specific transfer functions. The method is illustrated by designing four low frequency loudspeaker systems. Closed-box, vented-box, passive-radiator and band-pass systems are considered, in which the method is successfully applied.

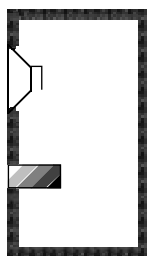
### Introducción

El autor del presente trabajo pretende un doble objetivo: por un lado, poner en actualidad el tema en base a una revisión bibliográfica en la que se han considerado los trabajos más relevantes en la evolución conceptual y en el desarrollo técnico de esta especialidad con el fin de desarrollar y analizar todos los conceptos que intervienen. Por otra parte, se pretende realizar una recopilación de las ortodoxias existentes para el diseño de cajas acústicas, analizando los métodos propuestos por cada autor y, del estudio de los mismos, proponer nuevos métodos mejorados que satisfagan determinadas necesidades.

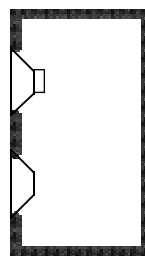
Antes de profundizar en el estudio de los sistemas de radiación directa, o cajas acústicas, en la banda de baja frecuencia, conviene introducir los sistemas existentes. Se pueden distinguir cuatro tipos, dentro de los cuales existen variantes. El sistema más sencillo es la Caja Cerrada, consistente en un recinto hermético al que se le ha adosado un altavoz. A continuación, se tiene la Caja Abierta o Bass Reflex, en la que se ha practicado un orificio a modo de resonador que es sintonizado convenientemente para extender la respuesta en baja frecuencia. La Caja de Radiador Pasivo es análogo al sistema anterior, sólo que se ha sustituido el tubo resonador por un altavoz sin motor que se mueve como consecuencia de las variaciones de presión originadas en el interior de la caja. Dentro de este sistema existe una variante mejorada que pone en juego distintas cavidades y radiadores pasivos convenientemente acoplados entre sí, de modo que se consigue una extensión importante en baja frecuencia. Finalmente, se tiene la Caja de Carga Simétrica o paso banda, en la que un resonador de Helmholtz filtra acústicamente la radiación de salida para conseguir una respuesta de tipo filtro paso banda, perfectamente definida.



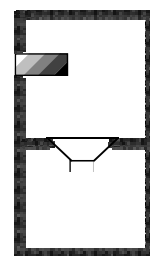
Caja Cerrada



Caja Abierta



Caja Radiador Pasivo



Caja Carga Simétrica

## Desarrollo

Dentro del procedimiento seguido en este trabajo, i.e., Estudio, Diseño, Simulación, Prototipo, Medida y Ajuste final, la fase del diseño entraña gran dificultad. Así es, de la dualidad caja acústica-filtro paso alto desarrollada por Thiele y Small, se realiza un estudio de la función de transferencia  $G(s)$  para cada sistema por lo que se obtienen las variables que influyen en el mismo. De la combinación de estas variables se obtienen los Parámetros del sistema. El diseño convencional seguía una elección de los parámetros según unos ajustes (alignments) que definen el comportamiento del filtro. Sin embargo, el diseño propuesto por el autor reduce los parámetros asociando los existentes para condiciones reales de funcionamiento. La reducción de parámetros tiene siempre un límite para cada sistema: los grados de libertad de diseño. Así, por ejemplo, para la caja abierta, en la que existe un grado de libertad, se reducen los parámetros a uno. Del mismo modo, se tiene la tabla siguiente:

Tipo de sistema	Grados de libertad en el diseño	Parámetros convencionales	Parámetros reducidos
Caja Cerrada	0	2	No
Caja Abierta	1	4	1
Radiador pasivo	2	4	2
Carga simétrica	1	2	1

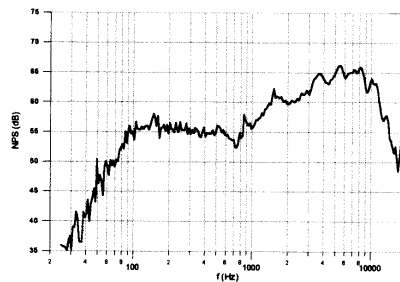
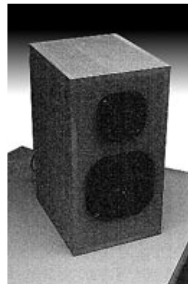
Si la reducción de parámetros en cualquier diseño es deseable, para el caso del diseño de cajas acústicas, supone un importante avance ya que permite el diseño sobre la base de un número reducido de gráficas paramétricas.

Las medidas de los distintos prototipos se realizaron en cámara anecoica, según la norma IEC 286-5. Sin embargo, y como medida de apoyo y comprobación del método, se realizaron medidas según la técnica de campo cercano. Este método alternativo no necesita ambientes anecoicos y el equipo utilizado es mínimo; sin embargo, las medidas son solo válidas hasta frecuencias del rango del pistón. A modo de ejemplo, véase la fotografía, en la que se aprecia la milimétrica distancia microfónica con lo que se consiguen medidas válidas hasta 650 Hz.

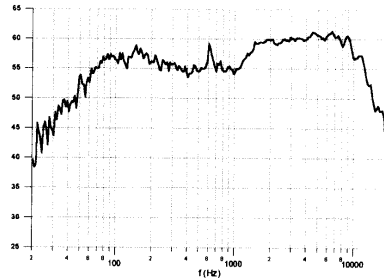


## Resultados

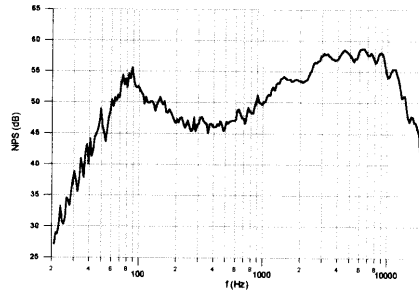
Con el fin de comprobar de modo experimental los nuevos métodos de diseño, se construyeron y midieron prototipos para cada uno de los sistemas. De la observación de las respuestas de los sistemas, se puede afirmar que los resultados corroboran la validez del método propuesto. Se presentan aquí los prototipos junto con su respuesta en frecuencia. Todos ellos han sido completados con la correspondiente unidad de agudos, concretamente una unidad Focal TDX 90, y un filtrado eléctrico adecuado.



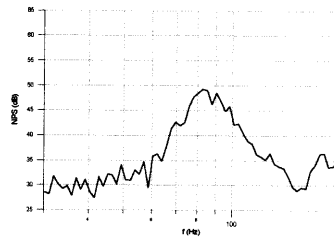
El prototipo de caja cerrada es el más sencillo ya que sólo incorpora una unidad de graves y una unidad de agudos. Por la respuesta en frecuencia, se puede concluir su pobre respuesta en bajas frecuencias.



El segundo prototipo, el de caja abierta, incorpora dos unidades de graves Focal 5N411L ya que se pretendía conseguir una extensa respuesta en bajas a frecuencias, pero que además ésta fuera potente. Como el volumen de aire equivalente  $V_{AS}$  del altavoz es extremadamente pequeño, es posible montar estas dos unidades en configuración compuesta y radiando en fase, con un volumen del recinto mínimo: 14 litros. El tubo resonador aparece en la parte superior del recinto.



El prototipo de radiador pasivo se diseña con unidades Beyma 10B60, cuyo  $V_{AS}$  es muy alto. Por tanto, para no recurrir a volúmenes excesivamente elevados, se montan dos unidades activas de graves en configuración push-pull en la parte superior del recinto. Así, el volumen ha disminuido sin menoscabo de la potencia de la salida debido a las características de los altavoces de graves, como se puede apreciar en la respuesta en frecuencia. De este modo, el prototipo incorpora cuatro altavoces: dos unidades activas push-pull, una unidad pasiva en la parte frontal y una unidad de agudos.



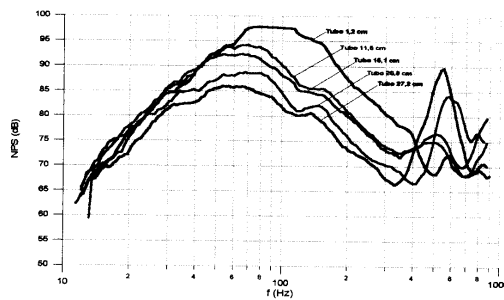
Finalmente, el prototipo más complejo es el del sistema de carga simétrica, del cual se presenta el sistema completo: Subwoofer, un recinto de cuarto orden, y dos satélites, recintos cerrados de dos vías. La caja en carga simétrica es simplemente un cajón del que sólo se distingue un orificio, el resonador, que define la frecuencia de corte superior. En la figura, se muestra la respuesta tipo paso banda de esta caja que, junto con la radiación de los satélites, completa el rango de frecuencias audibles. Del mismo modo que en el recinto de radiador pasivo, se decide montar una configuración push-pull de dos unidades Beyma 10B60 para reducir al máximo el volumen.

Se pueden extraer tres conclusiones importantes:

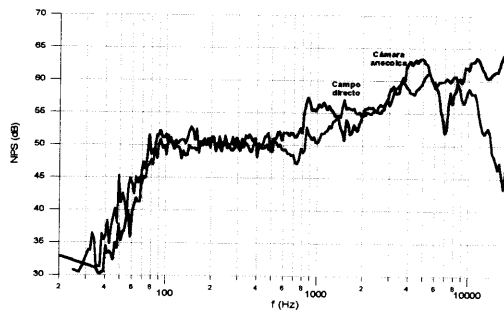
1. Validez del método propuesto. El método que reduce el número de parámetros de diseño no sólo es válido para predecir el comportamiento de una caja en cuanto a respuesta en frecuencia, dis-

torsión, respuesta de potencia, etc. antes de construirla, sino que permite un diseño automatizado en el que se hallan los parámetros del sistema para una determinada respuesta. Este último aspecto es fundamental para la realización de programas informáticos de diseño de cajas acústicas.

2. Necesidad de ajustes finales. En los sistemas que intervienen procesos de sintonización, las variables físicas con las que se cuenta como longitud, diámetro y masa, introducen gran cantidad de error, lo que conduce inevitablemente a unos ajustes finales que fijen correctamente las frecuencias de resonancia. En este sentido, se muestra en la figura distintas sintonizaciones para un tubo de diámetro fijo al que se le ha variado la longitud  $D_V$ . Nótese como, a medida que se aumenta la longitud  $L_V$ , disminuye la frecuencia de resonancia. Sin embargo, esta reducción de  $F_S$  se lleva cabo a costa de dos efectos negativos: por un lado, la radiación sonora es menor y, por otro lado, aparecen modos propios de vibración en forma de campanas estrechas a frecuencias mayores que la de resonancia (para el caso de  $L_V=27,2\text{cm}$ , la radiación del modo propio es mayor que la de la frecuencia de resonancia). Por tanto, el par  $L_V - D_V$  debe ajustarse minuciosamente para conseguir una sintonización óptima.



3. Comprobación del método de medida en campo cercano. Se ha comprobado experimentalmente por comparación con medidas en cámara anecoica que el método de medida en campo cercano es válido solo para frecuencias dentro del rango del pistón. La figura muestra una comparación de ambos métodos para el caso de la unidad de graves de la caja abierta. Según la teoría de campo directo, no se esperan medidas válidas por encima de 4 kHz, por lo que, efectivamente, se produce una dispersión importante de las respuestas a partir de esta frecuencia máxima.



## Bibliografía

- A. N. Thiele, "Loudspeakers in Vented Boxes", J. Audio Eng. Soc., vol 19, Pt. 1, 2.
- R. H. Small, "Direct-Radiator Loudspeakers System Analysis", J. Audio Eng. Soc., vol 20.
- R. H. Small, "Closed-Box Loudspeakers System", J. Audio Eng. Soc., vol 20, Pt 1, 2.
- R. H. Small, "Vented-Box Loudspeakers System", J. Audio Eng. Soc., vol 21, Pt 1, 2, 3, 4.
- R. H. Small, "Passive-Radiator Loudspeakers System", J. Audio Eng. Soc., vol 22, Pt 1, 2.
- E. R. Geddes, "An Introduction to Band-Pass Loudspeakers System", J. Audio Eng. Soc., vol 37.
- M. Colloms, High Performance Loudspeakers, (Pentech Press, London 1982)