

UN MODELO ANALÍTICO-NUMÉRICO HÍBRIDO PARA EL ANÁLISIS DE MOTORES DE COMPRESIÓN

PACS: *43.88.Ja.

Jaime Ramis¹; Jesús Carbajo¹; Alejandro Espí²; José Martínez²

¹ Departamento de Física, Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig, 03080, San Vicente del Raspeig, España
{jramis@ua.es, jesus.carbajo@ua.es}

² Acústica Beyma, S. L.
C/Pont Sec 1, 46113 Moncada, Valencia
{alejandro.espi@beyma.com, j.martinez@beyma.com}

ABSTRACT

Existing analytical models of compression drivers make approximations regarding the complex phase plug geometry that involve some limitations in their practical design process. In this work, a hybrid analytical-numerical model is proposed to analyze the performance of such devices. The numerical analysis is implemented using the Finite Element Method (FEM). It allows identifying the modal behavior of the diaphragm-cavity system and also serves to illustrate the importance of using phase plug geometry design methods. The analytical solution uses the numerical data from the finite element model to handle the vibroacoustic behavior of the driver and the equivalent circuit theory to include the electromagnetic effects. A prototype system has been examined both via the hybrid methodology and experimental measurements, showing a good agreement between them.

RESUMEN

Los modelos analíticos de motores de compresión existentes realizan ciertas aproximaciones en cuanto a la compleja geometría de su corrector de fase que implican algunas limitaciones prácticas en su proceso de diseño. En este trabajo se propone un modelo analítico-numérico híbrido para analizar el rendimiento de dichos dispositivos. El análisis numérico se lleva a cabo utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). Éste permite identificar el comportamiento modal del sistema diafragma-cavidad y también sirve para ilustrar la importancia de utilizar métodos de diseño para la geometría del corrector de fase. La solución analítica utiliza los datos numéricos del modelo en elementos finitos para contemplar el comportamiento vibroacústico del motor de compresión y la teoría de circuitos equivalentes para incluir los efectos electromagnéticos. Se ha examinado un prototipo tanto a través de la metodología híbrida como de medidas experimentales, obteniendo una buena correlación entre ambos casos.

1. INTRODUCCIÓN

El modelado del comportamiento vibroacústico de los motores de compresión mediante aproximaciones analíticas [1-4] presenta una serie de limitaciones prácticas en cuanto a su diseño debido a la compleja geometría de sus componentes. Algunos autores han propuesto metodologías alternativas para analizar este tipo de dispositivos, bien de tipo numérico usando el Método de los Elementos Finitos (MEF) [5, 6] o bien mixtas combinando matrices de transmisión con dicho método [7, 8]. También se han propuesto metodologías basadas exclusivamente en matrices de transferencia y en las que los parámetros del motor de compresión se determinan a partir de medidas acústicas en tubo de impedancia [9] o medidas eléctricas [10]. Mark Dodd y Jack Oclee-Brown propusieron el empleo de modelos numéricos mejorados para el diseño de motores de compresión con correctores de fase curvos tanto de geometría radial [11] como anular [12]. Posteriormente, René Christensen [13] utilizó el MEF para simular un motor de compresión anular incluyendo los efectos viscotérmicos y realizar así un modelado más completo que tuviese en cuenta los mecanismos de pérdidas que tienen lugar en las zonas estrechas próximas al corrector de fase. Espí et al. [14] adoptaron alguna de estas metodologías para estudiar la interacción entre sistemas radiantes en un altavoz de compresión coaxial. Recientemente, Gasparini et al. [15] recurrieron a un modelado multifísica similar en un proceso de optimización heurístico del diseño de motores de compresión. Aunque la mayoría de los trabajos anteriores realizan un modelado en régimen lineal del motor de compresión, no hay que olvidar que este tipo de altavoces presentan una importante distorsión no lineal sobre cuyo estudio pueden encontrarse varios trabajos en la literatura ([16,17]).

En este trabajo se propone una metodología analítica-numérica híbrida para analizar el rendimiento de los motores de compresión. Mientras que el modelado vibroacústico se lleva a cabo con una herramienta que implementa el MEF, los efectos electromagnéticos se incorporan a partir de una solución analítica basada en el circuito equivalente de este tipo de altavoces. Así, a partir de la geometría del motor, las propiedades mecánicas de los materiales que conforman su conjunto móvil y los parámetros más relevantes del circuito electromagnético, es posible describir su comportamiento. Para ilustrar el procedimiento presentado, se ha modelado un prototipo experimental y comparado con medidas eléctricas y acústicas del mismo, obteniendo una buena correlación entre ambos casos.

2. EL MOTOR DE COMPRESIÓN

Un motor de compresión es un tipo de altavoz dinámico de bobina móvil de radiación indirecta que normalmente se acopla a una bocina, permitiendo así aumentar su eficiencia de radiación respecto a los altavoces de radiación directa ([18, 19]). La Figura 1 muestra la sección transversal de un motor de compresión típico con corrector de fase de tipo anular.

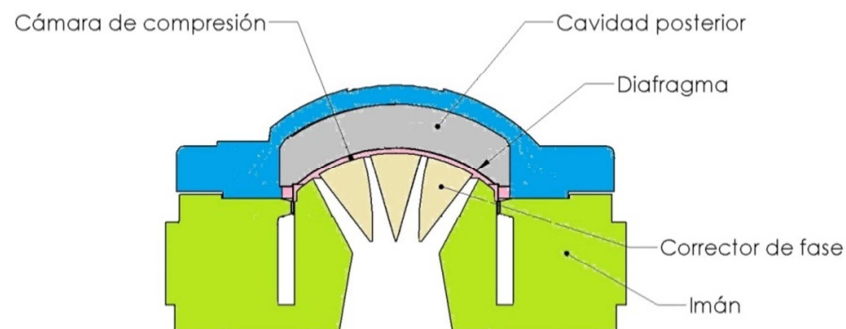


Figura 1 – Sección transversal de un motor de compresión con corrector de fase anular.

Éste consta de un diafragma de bobina móvil inmerso en el campo magnético de un imán y que se desplaza cuando por ella circula una corriente eléctrica. Detrás del mismo se deja una cavidad, normalmente rellena con algún tipo de material absorbente acústico para amortiguar el comportamiento modal de la misma, mientras que en su parte frontal tiene una cámara de compresión que incorpora un corrector de fase. Dicho corrector de fase está formado por una serie de estrechos canales que permiten ensanchar el ancho de banda de mayor resistencia de radiación y cuyo diseño pretende compensar las diferencias de fase para que la interferencia entre ellos en la garganta de la bocina sea constructiva, generando así un frente de ondas coherente.

La Figura 2 muestra el circuito equivalente en analogía admitancia de un motor de compresión, el cual puede dividirse en tres partes diferenciadas: una eléctrica, una mecánica y una acústica.

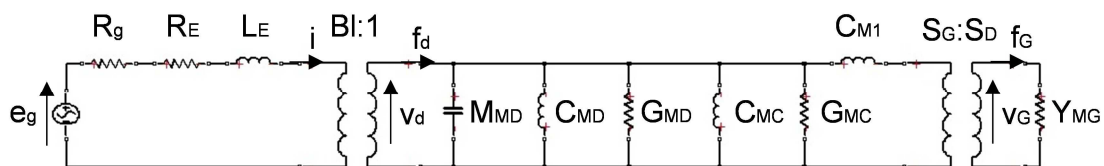


Figura 2 - Circuito equivalente en analogía admitancia de un motor de compresión.

donde e_g y R_g son la tensión en circuito abierto y resistencia del generador; R_E y L_E la resistencia e inductancia eléctrica de la bobina; i es la corriente eléctrica que la atraviesa; BI es el factor de fuerza; f_d y v_d la fuerza y velocidad del diafragma; M_{MD} , C_{MD} y G_{MD} la masa, compliancia y conductancia mecánica del diafragma; C_{MC} y G_{MC} la compliancia y conductancia mecánica de la cavidad posterior; C_{M1} la compliancia mecánica de la cámara de compresión junto con el corrector de fase; S_D y S_G los áreas del diafragma y de la garganta de la bocina; v_G y f_G la velocidad del aire y la fuerza en la garganta, e Y_{MG} la admitancia mecánica en la garganta.

A la vista del circuito simplificado anterior resulta evidente que el modelado del diafragma, la cámara de compresión y su corrector de fase a partir de éste presenta una serie de limitaciones en el diseño, además de no resultar práctico al analizar geometrías complejas como las que habitualmente presentan este tipo de dispositivos. Por ello, se justifica el empleo de herramientas numéricas más sofisticadas y que puedan contemplar dichas configuraciones.

3. MODELO ANALÍTICO-NUMÉRICO HÍBRIDO

Como se ha mencionado anteriormente, el presente trabajo propone una metodología analítica-numérica híbrida para analizar el rendimiento de los motores de compresión. Para ello, se distinguen dos fases de modelado diferenciadas: una numérica y otra analítica. La primera emplea el MEF para caracterizar la parte mecánico-acústica del motor realizando un análisis armónico del sistema asumiendo que éste trabaja en régimen lineal, mientras que la segunda permite completar el modelado incorporando la parte eléctrica del mismo.

El modelado numérico en elementos finitos parte de la geometría del motor de compresión a modelar y las propiedades mecánicas de los materiales que conforman su conjunto móvil, definiéndose así un problema multifísica en el que se distinguen dos tipos de dominio: mecánico y acústico.

El primero de ellos contempla el conjunto móvil (diafragma, soporte y bobina) y puede describirse a partir de la ecuación de un sólido elástico lineal

$$-\rho\omega^2\mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del sólido, ω la frecuencia angular, \mathbf{u} el vector de desplazamiento, $\boldsymbol{\sigma}$ el tensor de tensiones estructurales y \mathbf{F} el vector de fuerza volumétrica.

El segundo tipo de dominio permite simular el comportamiento acústico en la cavidad posterior y la cámara de compresión del motor, estando éste gobernado por la ecuación de Helmholtz

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

donde p es la presión acústica y $k = \omega/c$ es el número de onda, siendo c la velocidad de propagación del sonido en el aire.

Así mismo, para el modelado del comportamiento vibroacústico del motor de compresión deben definirse las condiciones de contorno que éste presenta, como la de desplazamiento nulo $\mathbf{u} = 0$ en los puntos de sujeción del diafragma o derivada normal de la presión nula $-\mathbf{n} \cdot (-\nabla p / \rho_0) = 0$ en los contornos rígidos del motor, siendo \mathbf{n} el vector unitario normal a dicho contorno que apunta hacia el exterior del dominio acústico y ρ_0 la densidad del aire. Por otra parte, para acoplar ambos tipos de dominio es necesario especificar condiciones de continuidad en aquellos contornos de interfaz entre ambos

$$\mathbf{F} = \mathbf{n}p \quad (3a)$$

$$-\mathbf{n} \cdot (-\nabla p / \rho_0) = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})\omega^2 \quad (3b)$$

Una vez implementado el modelo numérico es posible calcular la velocidad en la dirección axial de la bobina móvil al aplicar sobre ésta una fuerza, pudiendo así obtener la impedancia mecánica total vista desde la parte eléctrica del circuito equivalente de la Figura 2.

La solución analítica utiliza la información de la impedancia mecánica obtenida con el modelo numérico en elementos finitos para contemplar la parte mecánico-acústica del motor de compresión y los parámetros electromagnéticos para completar su circuito equivalente. Así, a partir de los datos anteriores y los del generador, pueden obtenerse el nivel de presión sonora y la impedancia eléctrica total del motor de compresión.

4. VERIFICACIÓN DEL MODELO

La Figura 3 muestra el prototipo de un motor de compresión coaxial de medios-agudos, que consta de dos diafragmas anulares fabricados a partir de un tejido de fibra de aramida el de medios y de una película polimérica el de agudos, ofreciendo ambos materiales unas buenas prestaciones para este tipo de aplicación. En el caso bajo estudio, las cavidades posteriores de ambos conjuntos no incorporan ningún tipo de espuma y el corrector de fase es común a ambos en el tramo final, incorporando éste una pieza de tipo bala. La salida del motor se acopla a un tubo de onda plana en el que se instala un micrófono para las medidas de presión sonora, mientras que se carga en pantalla "infinita" para las de impedancia eléctrica. El uso de MLSs [20] y la aplicación de un enventanado a las respuestas impulsivas obtenidas en las medidas de presión permiten suprimir el efecto de las reflexiones al final del tubo en el espectro calculado, tratando de emular así una condición de tubo con terminación "anechoica".

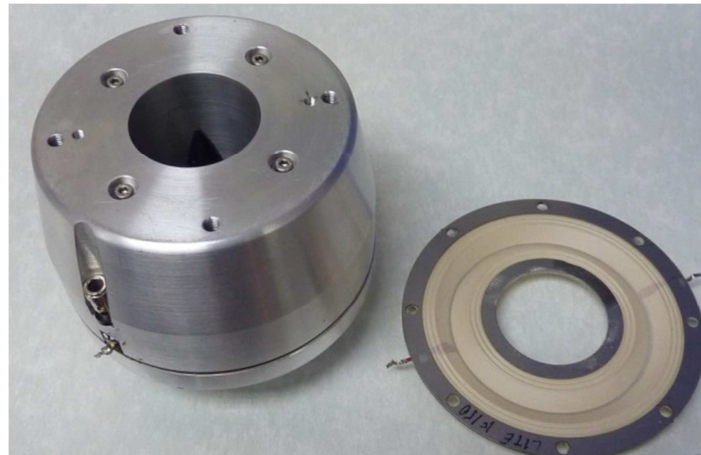


Figura 3 – Fotografía del prototipo de motor de compresión y del diafragma de medios.

La implementación del modelo numérico se ha llevado a cabo con el software de elementos finitos COMSOL Multiphysics®. Aprovechando la simetría de revolución del motor de compresión respecto a su eje longitudinal, se ha escogido la opción de axisimetría 2D para reducir el coste computacional de las simulaciones. La terminación “anecoica” del tubo se ha simulado empleando una condición de PML (Perfectly Matched Layer) en el extremo libre del mismo. Para el caso de carga en pantalla “infinita” se implementa una solución similar a una distancia razonable de la salida del motor. Las parámetros eléctricos y propiedades mecánicas de los materiales que conforman los conjuntos móviles han sido suministradas por sus respectivos fabricantes o bien determinadas a partir de métodos de identificación. La Figura 4 representa la geometría del prototipo cuyo modelo numérico se ha implementado.

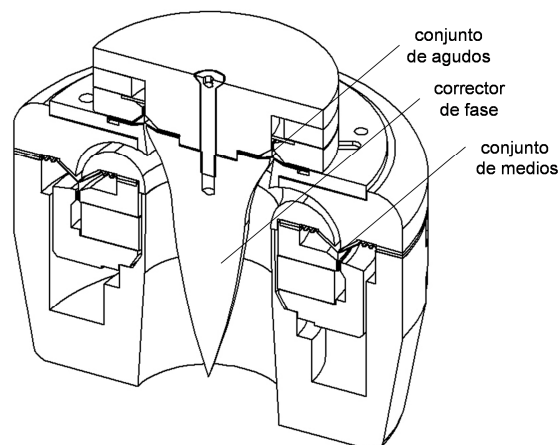


Figura 4 – Vista transversal del prototipo cuyo modelo numérico se ha implementado.

En las simulaciones se ha realizado un análisis armónico en el rango de 100 a 5000 Hz con una resolución de 10 Hz para posteriormente aplicar un suavizado de banda ancha a las respuestas en frecuencia y así compararlas con las medidas experimentales. El tamaño del mallado empleado ofrece una relación de 22 elementos por longitud de onda en el peor de los casos. En lo sucesivo solo se mostrarán los resultados correspondientes al conjunto de medios.

Las Figuras 5 y 6 muestran el nivel de presión sonora y la impedancia eléctrica total del conjunto de medios medidas experimentalmente y obtenidas a partir del modelo híbrido propuesto. Se puede apreciar que, aunque las frecuencias de resonancia coinciden, por lo general presentan diferente amplitud en las simulaciones y en las medidas. Ésto parece indicar que los mecanismos de pérdidas del motor de compresión no están siendo totalmente modelados, por lo que sería recomendable incorporar otros efectos (como las pérdidas viscotérmicas) o bien realizar un ajuste del modelo en base a dichas medidas. Por otra parte, al tratarse de un modelado 2D axisimétrico, cualquier tipo de desequilibrio o fenómeno derivado de la no completa axisimetría del conjunto móvil requeriría un análisis más exhaustivo del mismo (ver [21]).

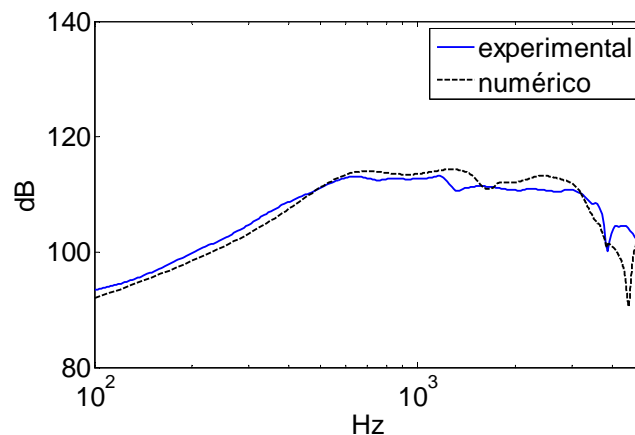


Figura 5 - Respuesta en frecuencia del nivel de presión sonora en tubo de onda plana del motor de compresión.

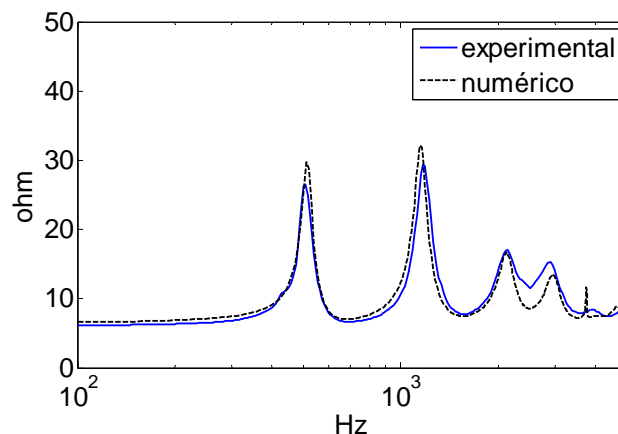


Figura 6 - Impedancia eléctrica de entrada del motor de compresión en pantalla "infinita".

Las Figuras 7a y 7b muestran el desplazamiento del diafragma de medios y la distribución espacial del campo de presión sonora en sus proximidades, respectivamente, para la frecuencia de 3750 Hz, que corresponde a un modo de vibración en su suspensión interior. Este tipo de representación ilustra otra de las ventajas de la parte de modelado numérico que permite evaluar la presión o el desplazamiento en regiones en las que en la práctica resulta inviable o muy complicado.

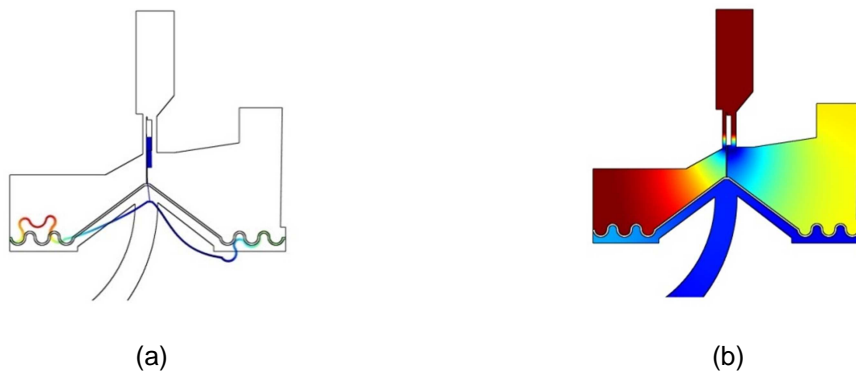


Figura 7 – Vista detallada de variables físicas para el sistema de medios del modelo numérico del motor de compresión a la frecuencia de 3750 Hz: (a) Desplazamiento del diafragma de medios (escala aumentada) y (b) distribución espacial del campo de presión sonora.

5. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología analítica-numérica híbrida para el modelado y análisis de motores de compresión. Dicha técnica permite analizar numéricamente el comportamiento modal del sistema diafragma-cavidad y el efecto de la geometría del corrector de fase en el rendimiento del sistema, incorporando los efectos electromagnéticos apoyándose en la teoría de circuitos equivalentes. Para verificar el modelo se ha desarrollado un prototipo de motor de compresión coaxial del cual se han realizado medidas de presión cargando éste sobre un tubo de impedancia y de impedancia eléctrica libre de carga. La comparativa de los resultados experimentales con las simulaciones muestra una buena correlación entre ambos, haciendo de la metodología propuesta una herramienta de diseño y análisis amplia y muy útil para los profesionales del sector.

AGRADECIMIENTOS

Éste trabajo ha sido financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial del Ministerio de Economía y Competitividad bajo el proyecto con referencia CDTI-2012-0789.

REFERENCIAS

- [1] B. H. Smith, *An investigation of the air chamber of horn type loudspeakers*, Journal of the Acoustical Society of America, 25 (2), 305-312, 1953.
- [2] B. N. Locanthi, *Application of electric analogies to loudspeaker design problems*, Journal of the Audio Engineering Society, 19 (2), 778-785, 1971.
- [3] W. M. Leach, *On the specification of moving-coil drivers for low-frequency horn-loaded loudspeakers*, Journal of the Audio Engineering Society, 27 (12), 950-959, 1975.
- [4] C. A. Henriksen, *Phase plug modelling and analysis: radial versus circumferential types*, presented at the 59th AES Convention, Hamburg, Germany, February 28-March 3, 1978.
- [5] C. I. Beltran, *Calculated response of a compression driver using a coupled finite element analysis*, presented at the 105th AES Convention, San Francisco, USA, September 1, 1998.

- [6] M. Dodd, *The development of forward radiating compression driver by the application of acoustic, magnetic and thermal finite element methods*, presented at the 115th AES Convention, New York, USA, October 1, 2003.
- [7] R. Morgans, D. J. Murphy, *Modelling compression drivers using T matrices and finite element analysis*, presented at the 119th AES Convention, New York, USA, October 10, 2005.
- [8] A. Voishvillo, *Simulation of horn-driver response by combination of matrix analysis and FEA*, presented at the 129th AES Convention, San Francisco, November 4-7, 2010.
- [9] G. K. Behler, M. Makarski, *Two port representation of the connection between horn driver and horn*, Journal of the Audio Engineering Society, 51 (10), 883-897, 2003.
- [10] M. Makarski, *Determining two-port parameters of horn drivers using only electrical measurements*, presented at the 116th AES Convention, Berlin, Germany, 2004.
- [11] M. Dodd, J. Ocleo-Brown, *A new methodology for the acoustic design of compression driver phase plugs with radial channels*, presented at the 125th AES Convention, San Francisco, USA, October 2-5, 2008.
- [12] M. Dodd, J. Ocleo-Brown, *New methodology for the acoustic design of compression driver phase plugs with concentric annular channels*, Journal of the Audio Engineering Society, 57 (10), 771-87, 2009.
- [13] R. Christensen, U. Skov, *Simulation of a 4" compression driver using a fully coupled vibroacoustic finite element analysis including viscous and thermal losses*, presented at the 132nd AES Convention, Budapest, Hungary, April 26-29, 2012.
- [14] A. Espí, W. A. Cardenas, J. Martínez, J. Ramis, J. Carbajo, *Study of the interaction between radiating systems in a coaxial loudspeaker*, presented at the 133rd AES Convention, San Francisco, USA, October 26-29, 2012.
- [15] M. Gasparini, S. Cecchi, F. Piazza, E. Capucci, R. Romolo, *Multiphysic modeling and heuristic optimization of compression driver design*, presented at the 136th AES convention, Berlin, Germany, April 26-29, 2014.
- [16] W. Klippel, *Nonlinear system models for horn loudspeakers*, presented at the 99th AES Convention, New York, USA, October 6-9, 1995.
- [17] A. Voishvillo, *Nonlinearity in horn drivers – where the distortion comes from?*, presented at the 113th AES Convention, Los Angeles, USA, October 5-8, 2002.
- [18] L. L. Beranek, T. Mellow, *Sound fields and transducers*, Academic Press, New York, 2012.
- [19] M. Colloms, P. Darlington, *High performance loudspeakers*, John Wiley and Sons, New York, 2007.
- [20] J. Vanderkooy, *Aspects of MLS Measuring systems*, Journal of the Audio Engineering Society, 42 (4), 219-231, 1994.
- [21] E. Segovia, J. Carbajo, A. Espí, J. Ramis, *Numerical analysis of the vibrational behavior of the moving assembly of a dynamic loudspeaker*, Revista Internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, N, P, A.