



ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL AUMENTO DE TEMPERATURA EN EL RENDIMIENTO DE ALTAVOCES

Jaime Ramis¹, Jesús Carbajo¹, José Martínez², Enrique G. Segovia³

¹Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante

jramis@ua.es, jesus.carbajo@ua.es

²Acústica Beyma S.L

j.martinez@beyma.com

³Departamento de Ingeniería Civil

enrique.gonzalo@ua.es

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología numérica simplificada basada en el método de los elementos finitos, para el análisis del efecto que provocan pequeños cambios en la configuración del motor y del conjunto móvil de un altavoz electrodinámico de radiación directa en el aumento de la temperatura de la bobina que, a su vez induce un incremento de la temperatura del imán, provocando una disminución del rendimiento del transductor. Los modelos numéricos se han ajustado en base a resultados experimentales.

Palabras-clave: Transductores, Altavoces, Elementos Finitos,

Abstract

In this work, a simplified numerical methodology based on the Finite Element Method (FEM) for the analysis of the thermal behaviour of an electrodynamic speaker is presented. Small variations in the configuration of the speaker driver results in an increase of the magnet temperature, which in turns worsens the transducer performance. The numerical models developed have been fitted from experimental testss

Keywords: Transducers, loudspeakers , Finite Element Method.

PACS no.43.38.Ar



1 Introducción

Uno de los grandes retos de la industria de diseño y fabricación de altavoces dinámicos de baja frecuencia es reducir el deterioro que sufren los mismos debido al elevado calentamiento de la bobina cuando están funcionando en régimen de alta potencia. Este calentamiento no solo tiene un efecto negativo en el rendimiento electro-acústico del altavoz [1], sino que además reduce su vida útil y por tanto su margen de aplicabilidad. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar técnicas experimentales [2] y modelos de predicción [3-7] que permitan estudiar los fenómenos de transferencia térmica que tienen lugar entre los distintos componentes de un altavoz. Así mismo, estas metodologías sirven para analizar las causas de este deterioro y proponer nuevos sistemas [8] que ayuden a prevenir el mismo. El presente trabajo se ha llevado a cabo en el contexto de un proyecto cuyo objetivo es realizar una contribución a este tipo de procedimientos que sirva de ayuda al diseño y desarrollo de nuevas soluciones para la extracción térmica activa en este tipo de altavoces.

A raíz de la problemática anterior y de las necesidades que ésta genera se deriva una propuesta científica cuyos objetivos generales se enumeran a continuación:

- Desarrollo de procedimientos experimentales que permitan evaluar la temperatura en el bobinado y demás componentes del circuito electromagnético del altavoz.
- Implementación de modelos numéricos para el estudio y análisis del comportamiento térmico de altavoces.
- Propuesta de nuevos diseños y soluciones alternativas a las ya existentes para mejorar la extracción térmica en altavoces.

En concreto, se han llevado a cabo una serie de tareas que contribuyan a los objetivos generales anteriores y que se resumen en:

- Implementación de modelos numéricos para el estudio de los fenómenos de transferencia térmica entre los distintos componentes de un altavoz.
- Validación de los modelos numéricos en base a medidas experimentales en prototipos reales fabricados al efecto.
- Aplicación de la metodología anterior al análisis de nuevos diseño de mejora (p. ej.: integrando difusores, conductos de extracción térmica,...).

2 Metodología

Para la ejecución de las tareas anteriores se hace uso de herramientas de simulación numérica que implementan el Método de los Elementos Finitos o FEM (Finite Element Method, en inglés) y permiten estudiar problemas de transferencia de calor y de propagación acústica. Para los dos primeros objetivos específicos asociados a la transferencia de calor se realizarán estudios térmicos puros y electro-térmicos; mientras que para el tercero se empleará el módulo de acústica de COMSOL Multiphysics [9]. Los tipos de análisis a llevar a cabo son estático y transitorio para el de transferencia de calor y armónico para el acústico. Cabe destacar que en el primer caso se implementarán modelos eminentemente térmicos y electro-térmicos para poder modelar la bobina de forma global o detallada, respectivamente. En todos los casos se partirá de un dibujo de referencia (preparado a partir un diseño



suministrado por la empresa) para la implementación del modelo geométrico, mientras que los parámetros de entrada asociados a las propiedades de los materiales de los distintos componentes (tales como conductividad térmica, calor específico,...) se han obtenido de ábacos [10] u hojas técnicas de los respectivos fabricantes. Las simulaciones se ehan efectuado en una estación de trabajo con 6 procesadores de 3.47 GHz y 24 GB de memoria RAM. A partir de las simulaciones numéricas se extraerán resultados tales como la temperatura de cada elemento del altavoz cuando éste alcanza el régimen permanente, su evolución temporal hasta alcanzar dicho estado o la densidad de disipación térmica en su circuito acústico. Con el fin de validar la metodología numérica, se compararon los resultados numéricos con las medidas experimentales, siendo susceptible de realizarse un ajuste de algunos de los parámetros térmicos de los materiales por la elevada incertidumbre que estos puedan presentar. Además, se ha tomado la información correspondiente a la fuente empleada en estos ensayos como un parámetro más de entrada a los modelos para, de esta forma, poder realizar una comparativa fehaciente entre ambos procedimientos.

Para abordar los objetivos específicos planteados se propone la agrupación de las tareas asociadas a los mismos en dos fases:

FASE I - Estudio de los fenómenos de transferencia térmica en un altavoz. Puesta a punto de los modelos numéricos

La primera fase servirá para la puesta a punto de los modelos numéricos que permitan estudiar los fenómenos de transferencia térmica (convección natural y conducción) en un altavoz. Dichos modelos contemplarán resistencias térmicas (aire, adhesivos y barnices) y cuerpos conductores. Además, en las simulaciones electro-térmicas también se modelará la parte correspondiente al circuito eléctrico (bobinado). Se analizarán las siguientes configuraciones:

- Bobina en aire y en aire en el seno del circuito electromagnético.
- Bobina en distintos tipos de soporte: aislante (polímero) y conductor (aluminio).
- Bobinado simple, doble bobinado y bobina corta.
- Soporte sin y con difusor térmico.

FASE II – Análisis de los efectos de la temperatura en el funcionamiento del altavoz.

En la segunda fase se elaborarán modelos numéricos acústicos para estudiar el efecto del circuito acústico en los mecanismos de extracción térmica del altavoz. A partir de estas nuevas simulaciones y de los resultados obtenidos en la FASE I se discutirán algunos de los efectos derivados del aumento de temperatura o calentamiento de los distintos elementos del altavoz:

- El efecto del circuito acústico en la disipación térmica del altavoz.
- Corrientes de Foucault producidas en el circuito electromagnético.
- Rendimiento del altavoz y no linealidades.

La información extraída de ambas fases pretende constituir una base de utilidad para el diseño nuevos altavoces que mejoren los mecanismos de extracción térmica respecto a diseños anteriores

3 Resultados y discusión

A continuación se presenta un breve resumen de algunos de los resultados más representativos de cada fase así como una breve discusión sobre los mismos.

3.1 Resultados Fase I

En la Figura 1 se muestra un dibujo del altavoz que sirvió de referencia para las simulaciones llevadas a cabo.

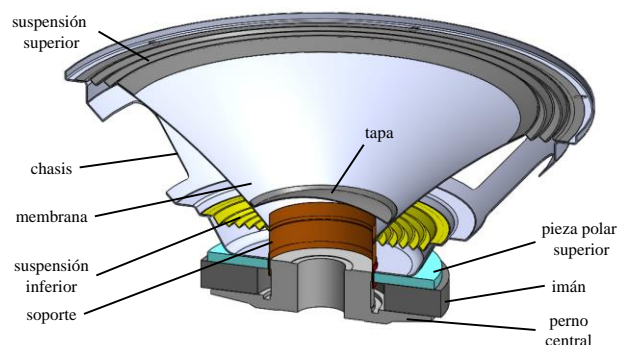


Figura 1. Dibujo del altavoz de referencia empleado para los modelos numéricos.

Este dibujo sirvió de punto de partida para los modelos implementados, cuyos resultados se mostrarán posteriormente. Algunas de las propiedades de los materiales empleados para cada uno de los componentes del altavoz se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales empleados (componentes).

	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/(m·K))	Calor específico (J/(Kg·K))	Convección (W/m ² ·K)
Aire	1	0.030	1000	1
Aluminio (soporte y difusor)	2705	234	900	3
Polímero (soporte)	1020	0.2256	1386	2
Cobre (bobina)	8900	390	390	32.5
Hierro (perno central)	7870	49.8	448	3
Cerámico (imán)	4800	1.49	878	3

Los valores de las resistencias térmicas asociadas a los barnices, adhesivos (p.ej.: en la unión soporte-bobina) u otros contactos entre los distintos componentes se obtuvieron mediante ajuste en base a medidas experimentales preliminares. Para poder comparar los resultados experimentales con las predicciones, en los modelos implementados se tomó una fuente de potencia térmica W_t (W) calculada a partir de los ensayos experimentales según:

$$W_t = VI \quad (1)$$

siendo V la tensión aplicada en la bobina, de aproximadamente 18 V, e I la corriente que circula por ésta. Dicha potencia térmica varía con el tiempo entre 51 y 41 W para los ensayos realizados al verse el bobinado sometido a un calentamiento progresivo.

Cabe destacar que también se llevaron a cabo simulaciones de tipo electro-térmico para contemplar la parte eléctrica detallada (bobinado), obteniendo resultados muy similares las realizadas con térmico puro, ratificándose de esta forma la simplificación adoptada en ese último tipo de estudios. Para estas simulaciones se ha calculado la resistividad eléctrica ρ del material que conforma el bobinado como:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (2)$$

donde $R = V/I$, S es la sección transversal del hilo de bobinado y l la longitud total del mismo.

El análisis transitorio se calculó para un periodo de 120 minutos con el fin de poder comparar los resultados numéricos con las medidas experimentales, siendo necesario en ocasiones prolongarlas hasta 180 minutos para aproximarse más el estado estacionario. Los resultados aquí recogidos muestran la evolución temporal de la temperatura en el bobinado y en la pieza polar superior para los dos últimos casos. A continuación se presentan los resultados correspondientes a dichos análisis transitorios para las siguientes configuraciones:

Bobina en aire y en aire en el seno del circuito electromagnético

La Figura 2 muestra la evolución temporal de la temperatura en una bobina para dos configuraciones: bobina en aire y en aire en el seno del circuito electromagnético (cem). A la vista de los resultados se evidencia que el calentamiento de la bobina es menor en el seno de dicho circuito, siendo éste a su vez más lento. Además, se verifica que el modelo implementado se ajusta correctamente a los resultados experimentales para las medidas con la bobina en el seno del circuito electromagnético.

Bobina en soportes aislante (polímero) y conductor (aluminio)

En la Figura 3 se presenta el análisis armónico para la bobina en dos tipos de soporte: aislante (polímero) y conductor (aluminio). Las curvas muestran que al emplear un soporte conductor metálico (en este caso aluminio), la temperatura alcanzada en la bobina es menor, como era de esperar. El empleo de este tipo de soporte se podría entender pues como un mecanismo de extracción térmica pasiva para el bobinado. Cabe destacar que en esta ocasión las condiciones de simulación difieren del caso anterior, por lo que el estado estacionario se alcanza con anterioridad.

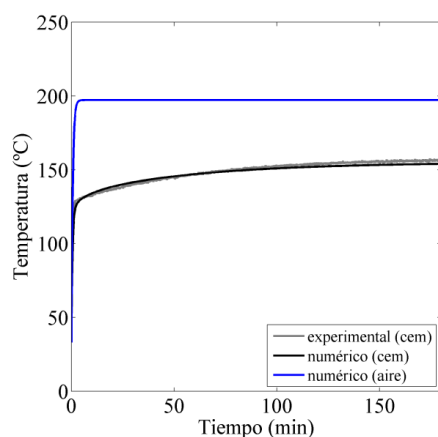


Figura 2. Análisis transitorio de bobina en aire y en aire en el seno del circuito electromagnético (cem).

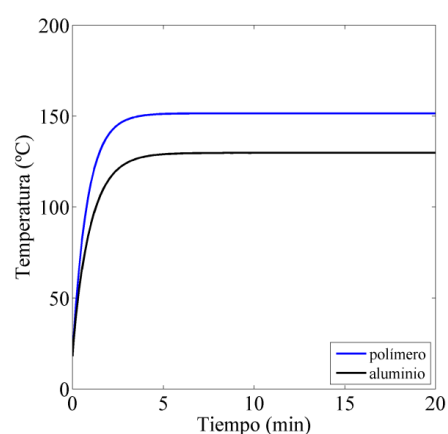


Figura 3. Análisis transitorio de la bobina en soporte aislante (polímero) y en soporte conductor (aluminio).

Bobina simple, bobina corta y doble bobinado

En una siguiente etapa se compararon diferentes configuraciones de bobina: simple (modelo de referencia), bobina corta y doble bobinado. En los tres casos el bobinado tiene la misma longitud, siendo menor el número de vueltas por bobina en la configuración de doble bobinado respecto al de referencia y mayor en el de bobina corta. La Figura 4 muestra dibujos esquemáticos de las dos nuevas configuraciones analizadas.

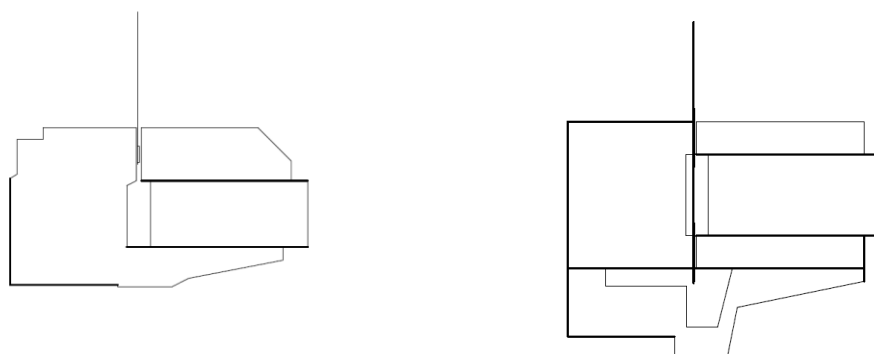


Figura 4. Esquemáticos de las dos nuevas configuraciones analizadas. Izquierda: bobina corta; derecha: doble bobinado.

Como se puede apreciar, el circuito electromagnético es diferente para cada una de estas dos nuevas configuraciones, por lo que también se evaluará la evolución temporal de la temperatura en la pieza polar superior. En la Figura 5 se presenta una comparativa para los tres casos, pudiendo apreciarse que la configuración de doble bobinado es aquella en la que más tiempo tarda en calentarse la bobina (el valor que se muestra es el promedio de ambos bobinados) y la pieza polar, siendo la solución escogida para incorporar el difusor térmico cuyos efectos se presentan a continuación.

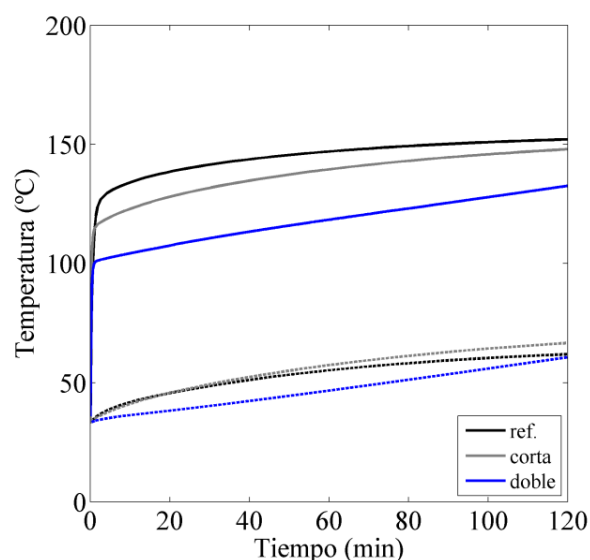


Figura 5. Análisis transitorio para las tres configuraciones: bobina simple, bobina corta y doble bobinado. Temperatura en bobina (—) y pieza polar (-----).

Soporte sin y con difusor térmico

Seguidamente, y con el fin de evaluar numéricamente uno de los nuevos mecanismos de extracción térmica, se analizó una configuración que incorporase un difusor térmico como el de la Figura 6 en la parte superior del soporte del altavoz. Dicho difusor, al estar fabricado de aluminio, permitiría reducir el calentamiento en el circuito electromagnético del altavoz disipando buena parte de su energía calorífica hacia la parte frontal del mismo.

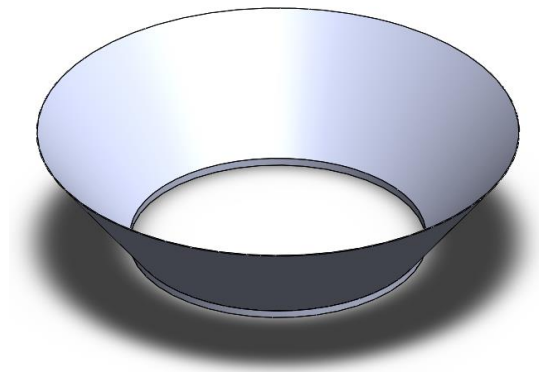


Figura 6. Difusor térmico incorporado en la parte superior del soporte.

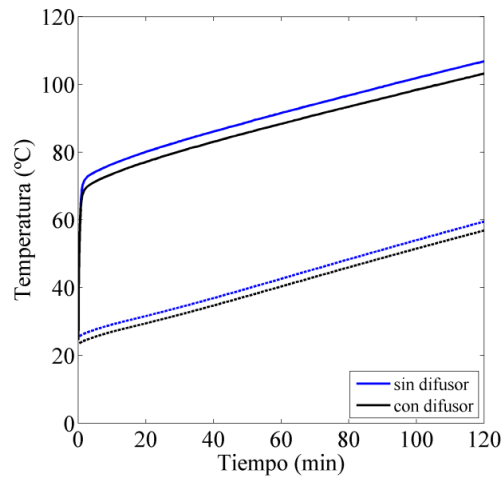


Figura 7. Análisis transitorio para las configuraciones sin y con difusor térmico. Temperatura en bobina (—) y pieza polar (----).

La Figura 7 evidencia este efecto al apreciarse que el incremento térmico para la configuración con difusor es menor que sin éste.

Adicionalmente, en la Figura 8 se ilustra la distribución de temperaturas cuando el sistema alcanza el régimen estacionario, confirmándose que para la configuración con difusor el calentamiento del altavoz es menor

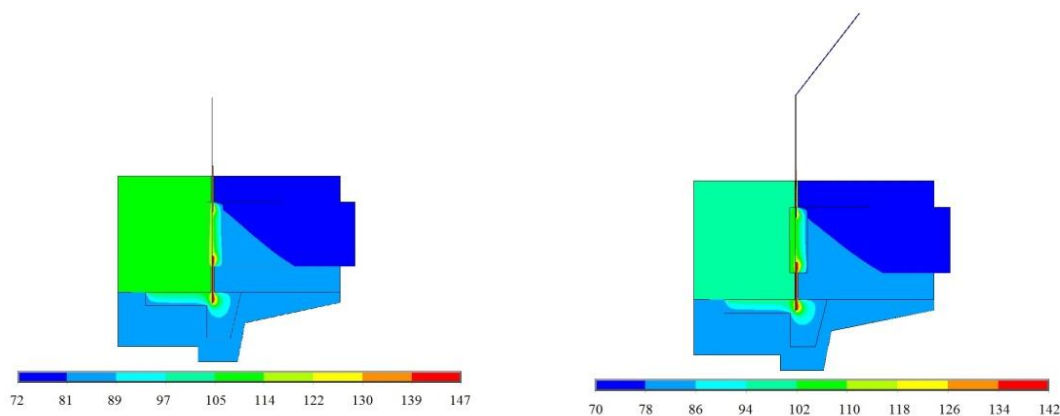


Figura 8. Distribución de temperatura en los distintos componentes del altavoz para la configuración de doble bobinado. Izquierda: sin difusor; derecha: con difusor.

3.2 Resultados Fase II

Una vez estudiados los mecanismos de transferencia térmica en el altavoz para distintas situaciones (vacío y aire), materiales (conductores y aislantes) y configuraciones (bobina simple, doble y corta), se evaluó la densidad de disipación de potencia térmica en el circuito acústico del altavoz.

Efecto del circuito acústico

Dicho parámetro no solo sirve de complemento a los análisis anteriores, sino que también permite plantear nuevos diseños de este circuito que mejoren las prestaciones de los empleados comúnmente. En este caso se emplea una fuente de velocidad en la región de la suspensión inferior, que es la que “sopla” el aire desde el entrehierro hacia el perno central para que se evacue por la parte frontal del altavoz (en este caso se examina una configuración con una tapa perforada).

La Figura 9 presenta la distribución de la densidad de disipación de potencia térmica en el circuito acústico del altavoz así como el campo de velocidades de partícula.

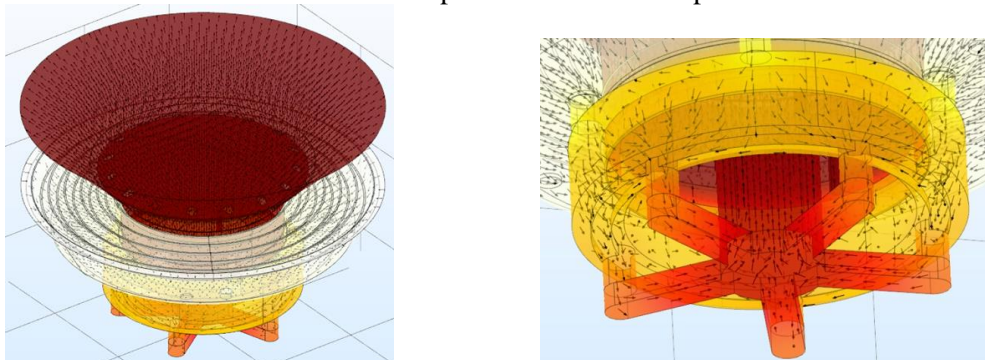


Figura 9. Distribución de la densidad de disipación de potencia térmica en el circuito acústico del altavoz así como el campo de velocidades de partícula (escala aleatoria). Izquierda: vista general; derecha: vista detallada.

La figura anterior muestra un singular diseño de la parte inferior del circuito acústico que ha constituido una nueva mejora en el mecanismo de extracción térmica del altavoz. Además, la tapa perforada facilita dicha extracción al evacuar el aire caliente del circuito electromagnético del altavoz, aumentando su rendimiento y evitando así un rápido deterioro del altavoz.

Corrientes de Foucault

Las corrientes de *Foucault*, o de *Eddy*, son corrientes eléctricas circulares inducidas en el interior del bobinado debido a los cambios en el campo magnético (Ley de inducción de *Faraday*) y que se oponen al flujo eléctrico. El efecto en el funcionamiento del altavoz es una menor circulación de corriente y un mayor calentamiento de las piezas de acero colindantes, con el perjudicial efecto que esto supone. Al depender de muchos factores (geometría, material, posicionamiento del bobinado,...), no resulta trivial ni sencillo estimar su efecto, siendo necesario recurrir a una combinación de métodos experimentales y simulaciones numéricas para cuantificar el mismo. Algunos de los parámetros que se emplean con este propósito son:

- Efecto de película. Responde a la tendencia de una corriente a distribuirse mayormente por su superficie, calculándose la profundidad de penetración δ según:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

donde f es la frecuencia (Hz), μ la permeabilidad magnética del material (H/m) y σ su conductividad (S/m). Aunque este efecto sería muy similar para los casos analizados, pues todos emplean un mismo tipo de material conductor para la bobina (cobre).



- Efecto de proximidad. Tiene lugar cuando circula una corriente por conductores muy próximos entre sí, provocando un incremento de la resistencia efectiva al concentrarse la corriente en las regiones de no interferencia. Este efecto será más notable en las configuraciones de bobina corta y doble bobinado.
- Potencia disipada W_d (W), sin considerar los efectos anteriores. Asumiendo materiales y campo magnético uniformes, ésta puede aproximarse como

$$W_d = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D} \quad (4)$$

donde B_p es el campo magnético de pico (T), d es el diámetro del hilo (m), $k = 2$ para un alambre fino, ρ es la resistividad del material y D su densidad (kg/m^3). Este fenómeno se manifiesta al emplear bobinas de mayor sección transversal. Para obtener la potencia disipada considerando los efectos anteriores se requiere complementar las simulaciones numéricas con ensayos experimentales utilizando un método inverso o de ajuste [11, 12].

Rendimiento y no linealidades

En condiciones ideales, un altavoz ofrece un incremento de potencia de salida lineal con el incremento de potencia de entrada. Sin embargo, en la práctica el calentamiento de la bobina provoca la aparición de una serie de no linealidades en la rigidez y el amortiguamiento del sistema que afectan a su rendimiento [13, 14]. La Tabla 2 muestra las desviaciones de estos y otros parámetros cuando se produce una variación de temperatura de 20 a 80°C:

Tabla 2. Desviación de algunos parámetros del altavoz al variar la temperatura [13].

Resistencia eléctrica de la bobina (R_e)	20 %
Factor de fuerza (Bl)	-13 %
Masa móvil (M)	-10 %
Compliance de la suspensión (C)	-9 %
Resistencia mecánica (R_m)	-42 %

Por este motivo, resulta de gran interés emplear procedimientos que modelen las no linealidades asociadas a la transferencia térmica en altavoces [15] y su efecto en el rendimiento de los mismos cuando estos operan en régimen de gran potencia

4 Conclusiones

Se han estudiado los fenómenos de transferencia de calor en altavoces de baja frecuencia que trabajan en régimen de gran potencia con el objetivo de desarrollar nuevos mecanismos de extracción térmica para los mismos. En concreto, se ha propuesto una metodología numérica para analizar las causas de deterioro de forma que ayuden a prevenir el mismo. Para ello se han analizado diferentes modelos contemplando distintas condiciones de contorno, varios materiales y configuraciones de bobinado. Además, se ha examinado el circuito acústico, discutiendo su impacto en los mecanismos de extracción térmica así como en otros efectos no deseados (corrientes de Foucault, no linealidades,...). Los análisis anteriores han servido de base a la empresa Acústica Beyma S. L. para elaborar un nuevo diseño y fabricar a partir de éste un prototipo que mejore las prestaciones de los sistemas convencionales.

A partir del trabajo llevado a cabo durante este proyecto, cuya corta duración no ha permitido profundizar lo esperado en algunos de los ítems tratados, se plantean nuevas líneas de trabajo que amplíen el conocimiento adquirido y sirvan de estímulo en el desarrollo de nuevas soluciones de mejora del rendimiento de los altavoces de baja frecuencia y gran potencia.

- Análisis numérico multifísica modelando las partes electromagnética, mecánica y acústica del sistema.



- Proponer soluciones analíticas o híbridas (analítica-numérica) que permitan abordar el problema de manera simplificada.
- Estudiar mecanismos de extracción térmica específicos, centrándose en un el diseño de un tipo de solución particular (difusor, tapa perforada, circuito acústico,...).
- Evaluar el impacto de los mecanismos de extracción térmica en el comportamiento vibratorio y en el rendimiento acústico del altavoz.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha llevado a cabo en parte en el contexto del proyecto “Nuevas soluciones para la extracción térmica activa en altavoces de bajas frecuencias y grandes potencias” de referencia IDI-20150024, financiado por el CDTI mediante fondos FEDER.

Referencias

- [1] Button, D. J. “Heat dissipation and power compression in loudspeakers”. JAES, 40, (1/2), 32-41, 1992.
- [2] Behler, G., Spätling, U. y Arimont, T. “Measuring the loudspeaker’s impedance during operation for the evaluation of voice coil temperature”. 98th AES Convention, Paris, Francia, 1995.
- [3] Henriksen C. A. “Heat transfer mechanisms in loudspeakers: analysis, measurement and design”. 80th AES Convention, Montreux, Switzerland, 1986.
- [4] Behler, G. “Modelling of the thermal behaviour of high power loudspeakers”. 15th ICA, Trondheim, Norway, 1995.
- [5] Chapman, P. J. “Thermal simulation of loudspeakers”. 104th AES Convention, Amsterdam, Dinamarca, 1998.
- [6] Hsu, T. S. “Temperature prediction of the voice coil of a moving coil loudspeaker by computer simulation”. JASJ, 21 (2), 57-62, 2000.
- [7] Blasizzo, F. “A new thermal model for loudspeakers”, JAES, 52 (1/2), 43-55, 2004.
- [8] Chapman, P. “Complete thermal protection of an active loudspeaker”. 108th AES Convention, París, Francia, 2000.
- [9] COMSOL Multiphysics - Acoustics module (reference manual), COMSOL, 2015.
- [10] Çengel, Y. y Ghajar, A. J. “Transferencia de calor y masa – Fundamentos y aplicaciones”, Ed. McGraw-Hill, 2011.
- [11] Vanderkooy, J. “A model of loudspeaker driver impedance incorporating Eddy currents in the pole structure”. 84th AES Convention, Paris, Francia, 1988.
- [12] Ning, W., Shen, Y. y Xu, X. “A study on lumped elements model and thermal effects of eddy currents in loudspeakers”. 119th AES Convention, Nueva York, USA, 2005.
- [13] Krump, G. “The temperature dependence of loudspeaker parameters”. DAGA, 1997.
- [14] Hutt, S. “Ambient temperature variations on OEM automotive loudspeakers”. 112th Convention of the AES, Munich, Alemania, 2002.
- [15] Klippel, W. “Nonlinear modeling of the heat transfer in loudspeakers”, JAES, 52 (1/2), 3-25, 2004