

Atenuación de los tonos acústicos de una cavidad abierta recubriendo sus paredes con paneles microperforados

C. González, S. Ortiz, P. Cobo & F. Montero de Espinosa

^a *Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano 144, 28006 Madrid, España, crisobal.g.diaz@csic.es*

RESUMEN: El ruido de cavidades abiertas es uno de los ruidos estructurales más importantes de un avión comercial en la fase de aproximación al aterrizaje. La interacción del flujo de aire con la cavidad abierta genera un ruido aeroacústico de alto nivel. Cuando el flujo turbulento de aire excita las resonancias acústicas de la cavidad, se originan, en el interior y alrededor de la misma, tonos intensos a frecuencias discretas, también conocidos como tonos de cavidad. La reducción de estos tonos de cavidad puede lograrse por medios pasivos, tales como el recubrimiento de las paredes con materiales absorbentes. Cuando no hay flujo de aire se pueden utilizar materiales porosos. Sin embargo, en presencia de flujo de aire, los paneles microperforados (MPP) son más recomendados. En este trabajo, se utilizan unos MPPs recientemente desarrollados, y relativamente baratos, fabricados mediante técnicas de infiltración, para recubrir una cavidad abierta. Se presentan resultados experimentales de la reducción de los niveles en el interior, y en los alrededores, de una cavidad abierta recubierta con estos MPPs.

KEYWORDS: Tonos de cavidad, fuente puntual, paneles microperforados.

1. INTRODUCCIÓN

En un trabajo previo, Ortiz *et al.* [1] estimaban las resonancias acústicas de una cavidad abierta 3D mediante un método rápido y eficiente que modela la respuesta temporal en cualquier punto como la convolución de la forma de onda de la fuente con la respuesta impulsiva de la cavidad. La respuesta impulsiva se obtiene mediante la secuencia de impulsos, retardados y atenuados, de las fuentes real e imagen (método de las fuentes imagen, ISM). La transformación de la respuesta temporal al dominio de la frecuencia proporciona las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF) en cada punto de la cavidad. Los picos de la FRF son identificados entonces como las frecuencias de resonancia de la cavidad abierta.

El método ISM propuesto fue validado experimentalmente en una cavidad cúbica 3D con paredes de madera de 3 cm y dimensiones $(W, L, D)=(53, 32, 38)$ cm. Como fuente, se usó un altavoz Sonavox Honeycomb de 4", situado en el centro de la pared frontal. Como los picos de la respuesta en frecuencia del altavoz pueden ser malinterpretados como resonancias de la cavidad, se ecualizó su respuesta usando la técnica de filtrado inverso propuesta por Cobo *et al.* [2].

Aunque el método ISM asume una fuente puntual, el altavoz de 4" no puede ser considerado como una fuente pequeña en comparación con las dimensiones de la cavidad abierta. Por consiguiente, se decidió implementar una aproximación mejor a una fuente puntual, usando el diseño de cono inverso propuesto por Polack *et al.* [3]. Este diseño fue aplicado con éxito por Cobo *et al.* [4] para construir una fuente omnidireccional para la medida de la impedancia del suelo. Esta fuente, sin embargo, es grande y pesada, y no puede ser usada para la medida de las resonancias de una cavidad pequeña. Por tanto, se diseñó una fuente con el diseño de Polack, más apropiada para esta aplicación [5].

Se pueden atenuar las resonancias de una cavidad abierta mediante técnicas de control del ruido. Una de estas técnicas consiste en recubrir sus paredes interiores con material absorbente. Aunque los materiales porosos proporcionan una absorción de banda ancha, su uso está desaconsejado en presencia de flujo de aire. Ya que los tonos de las cavidades abiertas generalmente son excitados por un flujo de aire (tren de aterrizaje de aviones, cavidades que forman el alojamiento de los bogies en trenes, coches con techos solares), han de usarse materiales absorbentes alternativos. Los paneles microperforados (MPP) han sido reconocidos como los materiales absorbentes de nueva generación. Además, pueden ser usados en presencia de flujo de aire [6].

El principal inconveniente de los MPPs, su alto coste de fabricación, puede ser soslayado usando la técnica de infiltración propuesta recientemente por Cobo y Montero de Espinosa [7]. Esta técnica consiste en mezclar granos de sal común de tamaño y cantidad controlados con una resina epoxy comercial. Cuando la mezcla cura, se introduce en un tanque de agua, donde los granos de sal se disuelven, apareciendo perforaciones con la forma y tamaño de los granos de sal.

El objetivo de este trabajo es ilustrar la atenuación de los tonos de una cavidad abierta cuando se recubren sus paredes con MPPs fabricados por infiltración, usando una de las fuentes puntuales desarrolladas en [5].

2. LA CAVIDAD ABIERTA

Para un trabajo anterior se construyó una cavidad abierta con paneles de madera DM de 3 cm de espesor, de dimensiones $(W, L, D)=(53, 32, 38)$ cm. En la parte superior abierta se insertó

un baffle de madera para evitar que la radiación hacia atrás del altavoz alcance la cavidad, Figura 1. Esta misma cavidad será usada en este trabajo, con las siguientes modificaciones:

- El altavoz inicial de 4" será sustituido por la fuente puntual descrita en la Sección 3.
- Las paredes interiores serán recubiertas con los MPPs descritos en la Sección 4.

Las FRFs entre la fuente puntual y un micrófono que se mueve a través de la cavidad serán medidas mediante el procedimiento explicado en la Sección 5.



Figura 1: *La cavidad abierta 3D*

3. LA FUENTE PUNTUAL

Polack *et al.* [3] propusieron un diseño original de fuente puntual/omnidireccional basado en la aproximación de fuente pequeña. Según esta aproximación, una fuente que radia a través de una abertura pequeña constituye una implementación razonable de una fuente puntual. El diseño de Polack consiste en un altavoz montado en una cavidad cilíndrica que excita una abertura pequeña a través de un cono invertido. El funcionamiento de una fuente tal depende de los siguientes parámetros:

- El volumen de la cavidad.
- La longitud del cono.
- Los diámetros pequeño y grande del cono invertido
- Los parámetros Thiele-Small del altavoz.

Se ha usado un modelo electroacústico convencional del altavoz acoplado a una línea de transmisión que describe el cono invertido para predecir el funcionamiento de esta fuente.

A partir del resultado de este modelo, se decidió construir una fuente puntual con una cavidad de 1.5 litros, un cono invertido con una apertura de 7.5 mm y una longitud de 200 mm. La Figura 2 muestra la fuente puntual resultante.



Figura 2: La Fuente puntual, antes (izquierda) y después (derecha) de insertar el cono con la apertura pequeña

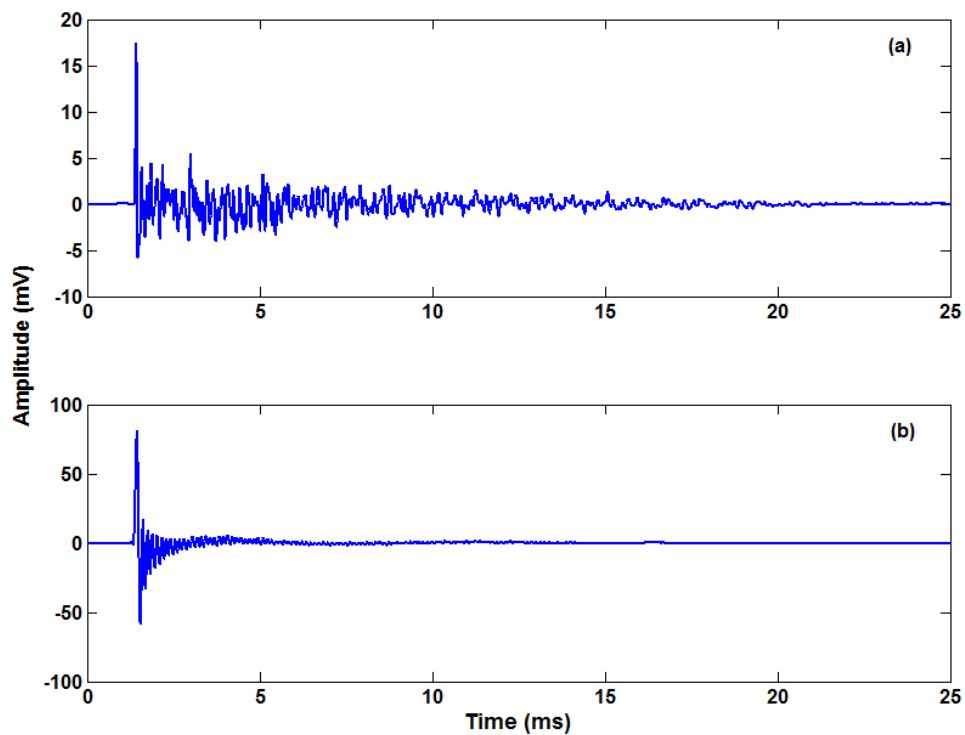


Figura 3: Forma de onda de la fuente puntual, antes (a) y después (b) de aplicar el filtrado inverso

Un efecto negativo de radiar a través de un cono invertido es que se producen fuertes resonancias como consecuencia de la vibración de la columna de aire en dicho cono. Afortunadamente, estos picos de la respuesta en frecuencias de la fuente puntual se pueden ecualizar mediante filtrado inverso [2, 4]. El diseño del filtro inverso requiere la medida previa de la respuesta en frecuencia anecoica de la fuente. Se ha diseñado un filtro de fase mínima y amplitud coseno con parámetros $(g, f_1, f_2, C)=(0.04, 100 \text{ Hz}, 8 \text{ kHz}, 0.05)$, siendo g el exponente de la función coseno, (f_1, f_2) las frecuencias inferior y superior de la respuesta del filtro, y C la constante de regularización [2]. La Figura 3 muestra la forma de onda de la fuente puntual antes y después de aplicar el filtrado inverso. El acortamiento drástico de la forma de onda es claramente visible en la Figura 3b. El efecto ecualizador del filtro se aprecia mejor en la respuesta en frecuencias de la fuente puntual, Figura 4.

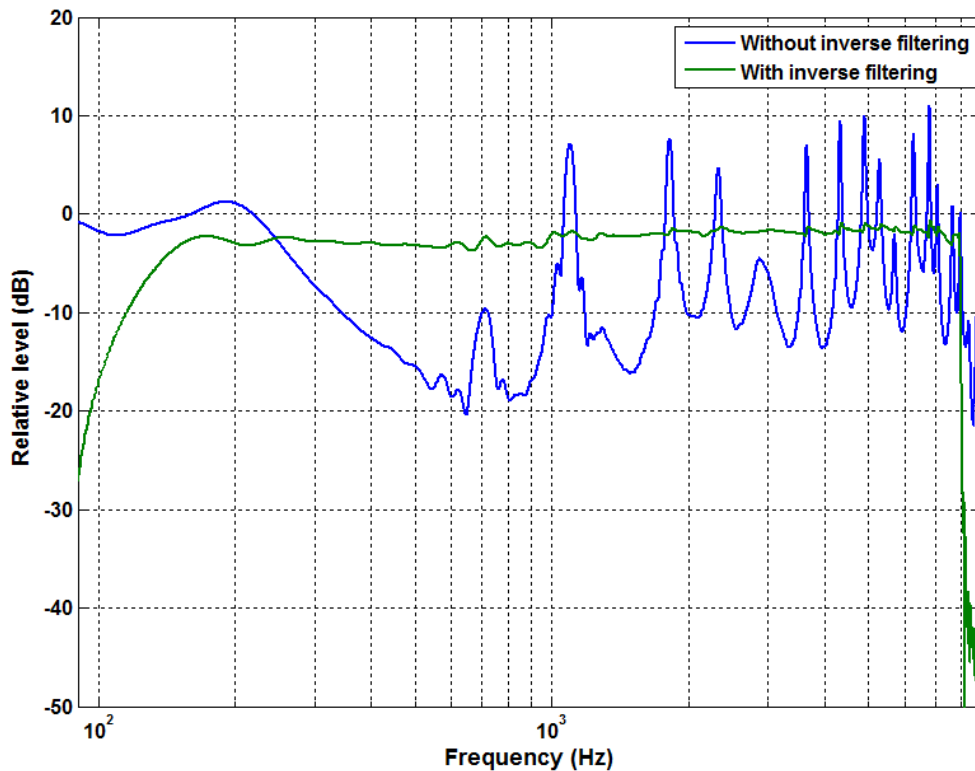


Figura 4: Respuesta en frecuencias de la fuente puntual, antes y después de aplicar el filtrado inverso

4. LOS MPPs

Se han propuesto varios modelos para el diseño de los MPPs. El trabajo de Maa [8, 9] modelaba la impedancia de entrada del MPP incluyendo tres términos: el de las perforaciones, el de los bordes, y el de la cavidad de aire.

Atalla y Sgard [10] propusieron el modelo de fluido equivalente para caracterizar la impedancia de entrada de un MPP como

$$Z_{AS} = i\omega\rho_0\alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma\phi}{i\omega\rho_0\alpha_\infty} \left(1 + i \frac{4\omega\rho_0\mu\alpha_\infty^2}{\sigma^2\phi^2r^2} \right)^{1/2} \right] \frac{t}{\phi} - iZ_0 \cot(kD) \quad , \quad (1)$$

donde (d, t, ϕ, D) son el diámetro de las perforaciones, el espesor del panel, el porcentaje de perforación, y la profundidad de la cavidad de aire, respectivamente, μ , ρ_0 y Z_0 son la viscosidad, densidad e impedancia característica del aire, respectivamente, $k = \omega/c$ es el número de onda,

$$\alpha_\infty = 1 + \frac{2\epsilon_e}{t} \quad , \quad (2)$$

es la tortuosidad geométrica

$$\epsilon_e = 0.48\sqrt{\pi r^2} (1 - 1.14\sqrt{\phi}) \quad , \quad (3)$$

es el exceso de masa vibrante en los extremos de las perforaciones, $r=d/2$, y

$$\sigma = \frac{32\mu}{\phi d^2} \quad , \quad (4)$$

es la resistividad al flujo. Los modelos de Maa y fluido equivalente proporcionan valores similares de impedancia de entrada de un MPP.

Uno de los inconvenientes principales de un MPP es su alto coste de fabricación. Cobo y Montero de Espinosa [7] propusieron una técnica de infiltración para fabricar MPPs más baratos. El procedimiento se simplifica si $d=t$. Los MPPs fabricados por infiltración tienen perforaciones irregulares distribuidas desigualmente en el panel. Cobo y Montero demostraron que se puede usar el modelo fluido equivalente para predecir el funcionamiento de estos MPPs siempre que se modifiquen ligeramente los parámetros constitutivos. Concretamente, se puede seguir usando el modelo fluido equivalente para la impedancia de entrada de estos MPPs siempre que se usen las ecuaciones siguientes para la resistividad al flujo y la tortuosidad geométrica

$$\sigma = s_\sigma \frac{32\mu}{\phi d^2} \quad , \quad (5)$$

$$\alpha_\infty = s_{\alpha_\infty} \left(1 + \frac{2\epsilon_e}{t} \right) \quad . \quad (6)$$

donde s_σ y s_{α_∞} son dos parámetros de ajuste.

Se usó el modelo fluido equivalente modificado para diseñar dos MPPs que absorban en la banda entre 700 y 2000 Hz. Los MPPs propuestos tienen los parámetros resumidos en la Tabla 1. La Figura 5 muestra las curvas de absorción en incidencia normal para ambos MPPs con $D=2$ cm y $(s_\sigma, s_{\alpha_\infty})=(1.4, 0.7)$. El MPP1 tiene una banda de absorción mitad de (670, 1310) Hz, centrada en 920 Hz. El MPP2 absorbe en la banda de frecuencias de (728, 1623) Hz, centrada en 1073 Hz.

Tabla 1: *Parámetros de los MPPs propuestos*

MPP	d (mm)	t (mm)	ϕ (%)
MPP1	0.55	0.55	0.50
MPP2	0.4	0.4	0.52

Se fabricaron varias muestras de los absorbentes MPP1 y MPP2. A continuación, se recubrieron las paredes interiores de la cavidad abierta con los MPPs fabricados, Figura 6.

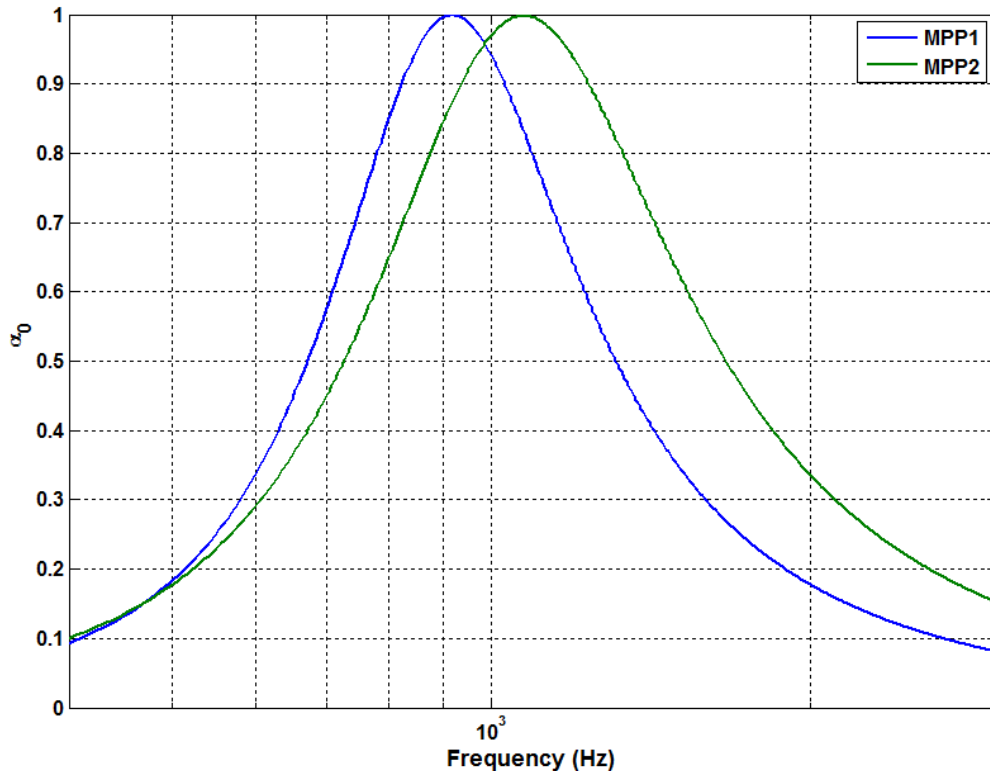


Figura 5: Coeficientes de absorción en incidencia normal para los dos MPPs con $D=2$ cm, y $(s_{\sigma} s_{\alpha\sigma})=(1.4,0.7)$

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema de medida proporciona la respuesta temporal entre la fuente puntual fija y un micrófono B&K 4939-A moviéndose a través de la cavidad. Las medidas se realizaron con un Instrumento Virtual de diseño propio, que usa una tarjeta de adquisición NI DAQ PCI-MIO-16E, y se basa en la técnica MLS.

Ya que el micrófono tiene una respuesta plana, y la respuesta del altavoz ha sido ecualizada por filtrado inverso, la respuesta temporal medida es esencialmente la de la cavidad. La transformada de Fourier de esta respuesta temporal proporciona entonces la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) de la cavidad.

Asumiendo un sistema de coordenadas cartesianas con origen en el centro de la cavidad, la fuente puntual está en $(x_s, y_s, z_s)=(-0.195, -0.16, 0.1)$. Las Figuras 7-9 muestran las FRFs en tres puntos de medida. En el primer punto, Figura 7, la máxima reducción (unos 30 dB) se consigue a 2300 Hz. Por debajo de 700 Hz y por encima de 3400 Hz, algunos picos se atenúan y otros se refuerzan. La atenuación de los picos de la FRF en el segundo punto, Figura 8, es menor, ya que también los tonos tienen niveles más bajos. No obstante, los picos se atenúan en hasta 15 dB a frecuencias entre 1600 y 2100 Hz. Nótese que también se obtiene una atenuación significativa entre 4000 y 4300 Hz. Las amplitudes de los picos en el punto fuera de la cavidad, Figura 9, son inferiores a las de los picos en los puntos dentro de la cavidad. En este punto, el recubrimiento con MPPs proporciona reducciones menores que 10 dB entre 700 y 4500 Hz.



Figura 6: La cavidad abierta con las paredes interiores recubiertas de MPPs

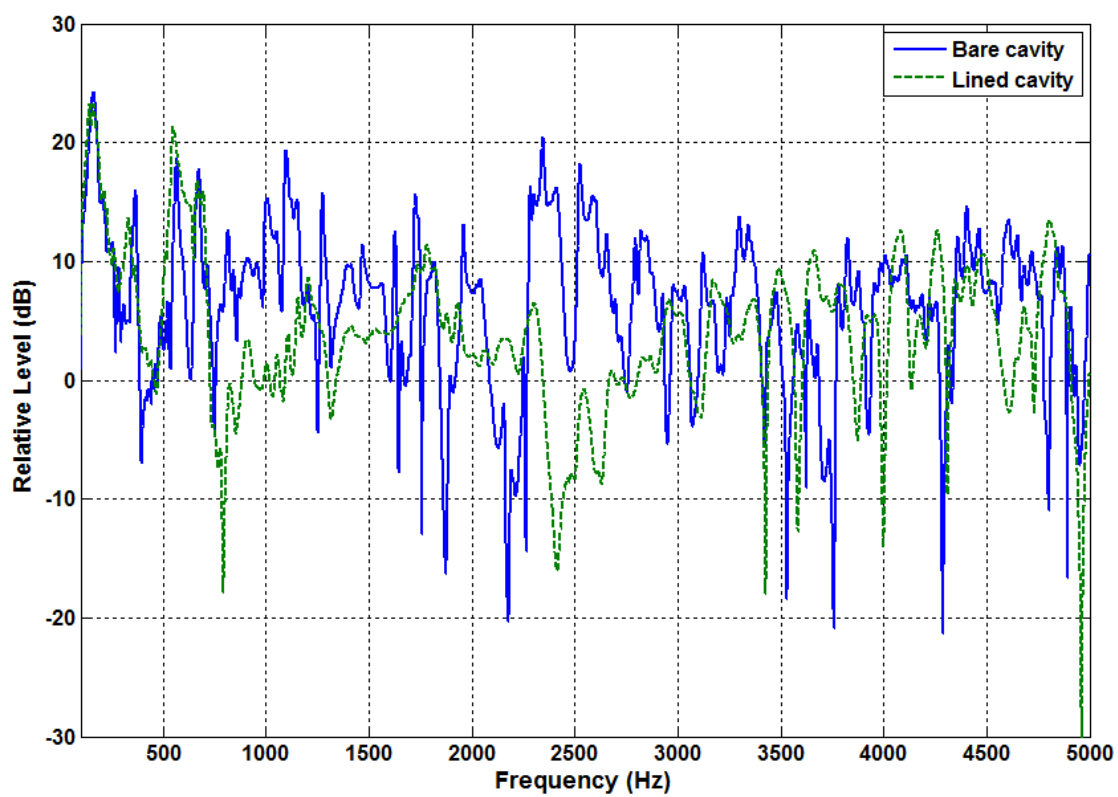


Figura 7: FRF, con y sin recubrimiento con MPPs, en el punto interior a la cavidad con coordenadas (0.035, 0.11, 0.14).

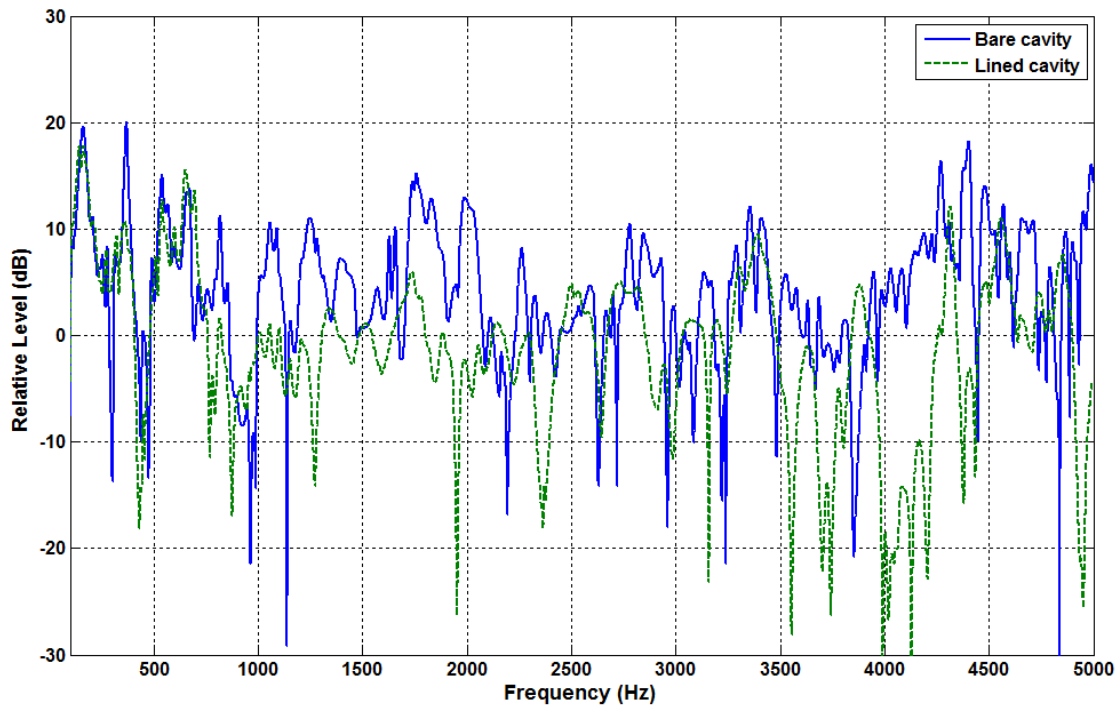


Figura 8: *FRF*, con y sin recubrimiento con MPPs, en el punto interior a la cavidad con coordenadas (0.185, -0.04, 0.14).

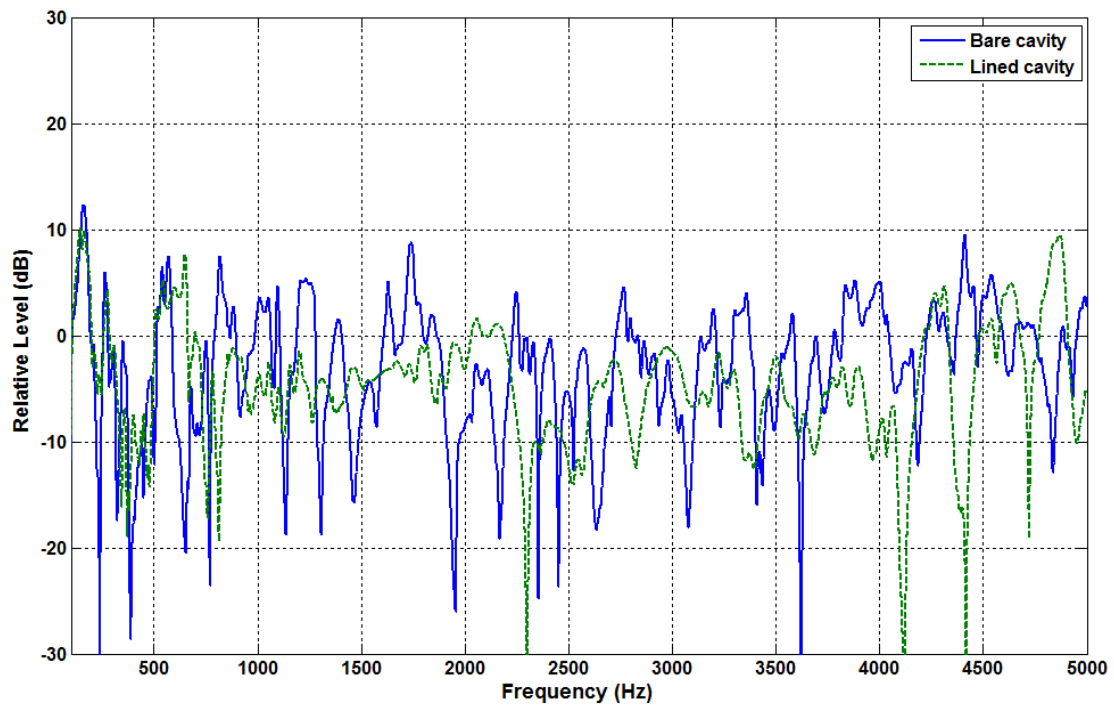


Figura 9: *FRF*, con y sin recubrimiento con MPPs, en el punto exterior a la cavidad con coordenadas (0.085, 0.21, 0.24).

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado experimentalmente el efecto del recubrimiento de las paredes interiores de una cavidad abierta con MPPs en el campo acústico dentro y encima de la cavidad. Se ha usado una cavidad de paredes de 3 cm de madera DM construida previamente, cambiando el altavoz original de 4" por una fuente puntual.

Como material absorbente, se han usado unos MPPs contruidos mediante una técnica de infiltración. Los MPPs se han diseñado para proporcionar absorción en la banda desde 800 hasta 2000 Hz.

Se han determinado experimentalmente las frecuencias de los tonos midiendo la respuesta impulsiva entre la fuente puntual y un micrófono moviéndose dentro y fuera de la cavidad. La FFT de las respuestas impulsivas proporciona las FRF en cada punto. Los picos de estas FRFs identifican las frecuencias de los tonos de la cavidad.

El efecto del recubrimiento de las paredes con MPPs ha sido la atenuación de los tonos de cavidad en la banda de frecuencias de absorción de los MPPs.

6. AGRADECIMENTOS

Uno de los autores (C. González) agradece el apoyo financiero de la Unión Europea a través del Proyecto PIEF-GA- 2011-301287.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ortiz, S., Le Plenier, C. & Cobo, P. Efficient modelling and experimental validation of acoustic resonances in three-dimensional rectangular open cavities." *Appl. Acoust.*, 74, 949-957 (2013).
- [2] Cobo, P., Fernández, A. & Cuesta, M. Measuring short impulse responses with inverse filtered maximum-length sequences. *Appl. Acoust.*, 68, 820-830 (2007).
- [3] Polack, J.D., Chistensen L.S. & Juhl, P.M. An innovative design for omnidirectional sound sources. *Acta Acustica uw ACUSTICA*, 87, 505-512 (2001).
- [4] Cobo, P., Ortiz, S., Ibarra, D. & De la Colina, C. Point source equalised by inverse filtering for measuring ground impedance. *Appl. Acoust.*, 74, 561-565 (2013).
- [5] Ortiz, S., Kolbrek, B., Cobo, P., González, L. & De la Colina, C. Point source loudspeaker design: Advances on the inverse horn approach. *J. Audio Eng. Soc.*, 62, 345-354 (2014).
- [6] Cobo, P., Ruiz, H. & Alvarez, J. Double-layer microperforated panel/porous absorber as liner for anechoic closing of the test section in wind tunnels. *Acta Acustica uw ACUSTICA*, 96, 914-922 (2010).
- [7] Cobo, P. & Montero de Espinosa, F. Proposal of cheap microperforated panel absorbers manufactured by infiltration. *Appl. Acoust.*, 74, 1069-1075 (2013).
- [8] Maa, D.Y. Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Eng. J.*, 29, 77-84 (1987).
- [9] Maa, D.Y. Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104, 2861-2866 (1998).
- [10] Atalla, N. & Sgard, J.F. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *J. Sound Vib.* 303, 195-208 (2007).