

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO EN LA RADIACIÓN DE ALTAVOCES DEL TIPO DML MEDIANTE HOLOGRAFÍA ACÚSTICA DE CAMPO CERCANO

J. Ramis<sup>1</sup>, W. A. Cárdenas<sup>1</sup>, L. Godinho<sup>2</sup>, J. Torres<sup>1</sup>, J. Carbajo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y la Tecnología, Universidad de Alicante, España.

(jtr17@alu.ua.es, wacp1@alu.ua.es, [jramis@ua.es](mailto:jramis@ua.es), [jesus.carbajo@ua.es](mailto:jesus.carbajo@ua.es))

<sup>2</sup>CICC, Dep. Eng. Civil da Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra  
{[lgodinho@dec.uc.pt](mailto:lgodinho@dec.uc.pt)}

### Resumen

Como es sabido, la técnica de Holografía Acústica de Campo cercano (NAH), implica la realización de registros en un plano muy cercano a la superficie vibrante (que se denomina holograma por analogía con la holografía óptica). A partir de estos registros es posible obtener la velocidad de vibración en la superficie de la fuente así como el campo acústico en campo lejano. En esta comunicación se aplica esta técnica para analizar la influencia de las condiciones de contorno del panel de un altavoz de modos distribuidos manteniendo constante la posición de los actuadores

**Palabras-clave:** Holografía acústica de campo cercano, Altavoces DML, condiciones de contorno.

### Abstract

As is known, Near Field Acoustic Holography (NAH) technique, involves making records in a plane close to the vibrating surface (called a hologram by analogy with optical holography). From these registers is possible to obtain the vibration velocity on the surface of the source and the far-field sound field. In this paper we apply this technique to analyze the influence of boundary conditions panel distributed mode loudspeaker maintaining constant the position of the actuators

**Keywords:** Near Field Acoustic Holography, DML loudspeakers, Boundary conditions

**PACS no.** 43.58.+z, 43.60.Sx.

## 1 Introducción y planteamiento

En este trabajo se aplica la técnica de Holografía Acústica de Campo Cercano para visualizar las diferencias en cuanto al comportamiento vibratorio de un panel de un altavoz DML cuando se aplican dos condiciones de contorno distintas (en la práctica, dos pegamentos distintos en los bordes de fijación). El trabajo se inscribe en el contexto de un proyecto cuyo objetivo es determinar las condiciones de fijación óptimas de sistemas radiantes basados en actuadores, en recintos de pequeño tamaño, en los que se desea que los sistemas radiantes no sean visibles por los ocupantes

Como es sabido, la técnica de Holografía Acústica de Campo cercano (NAH), implica la realización de registros en un plano muy cercano a la superficie vibrante (que se denomina holograma por analogía con la holografía óptica). A partir de estos registros es posible obtener la velocidad de vibración en la superficie de la fuente así como el campo acústico en campo lejano. En esta comunicación se aplica esta técnica para analizar la influencia de las condiciones de contorno del panel de un altavoz de modos distribuidos manteniendo constante la posición de los actuadores.

La técnica NAH permite obtener magnitudes acústicas y una evaluación visual del comportamiento vibratorio de placas y estructuras multicapa sometidas a una excitación acústica, a partir de medidas realizadas con un array de micrófonos en un plano paralelo y cercano a las superficie de estudio, detectando modos de vibración o incluso fracturas de los materiales. Conocidas las magnitudes acústicas en el plano de medida es posible determinar dichas magnitudes en cualquier otro plano utilizando un propagador con el que se realizará la reconstrucción. El procesado de las medidas implica el filtrado de la señal de entrada en el espacio número de onda (espacio  $k$ ) para obtener una buena resolución de la imagen reconstruida.

## 2. CONCEPTOS

El campo sonoro de cualquier fuente monocromática puede descomponerse en un espectro angular, definido en el espacio del número de onda, como la superposición de ondas planas viajando en direcciones diferentes, no todas estas ondas se propagan normalmente, algunas decaen exponencialmente con la distancia. La técnica Holografía Acústica de Campo es un procedimiento para reconstruir el campo sonoro y la velocidad de vibración de un objeto o fuente sonora a partir de medidas con micrófonos, en un plano paralelo y cercano a la fuente, como se aprecia en la figura 1. Gracias a las medidas en campo cercano se capturan las ondas evanescentes (ondas subsónicas que decaen exponencialmente con la distancia a la fuente) creadas por la fuente sonora, y que contienen detalles de alta resolución acerca de dicha fuente [1] [2] [3]. Esta técnica envuelve la grabación de la amplitud de presión sonora y la fase con un array plano de micrófonos.

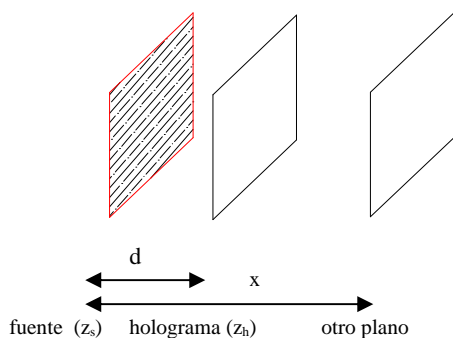


Figura 1- Tres planos de medida, plano fuente, holograma y plano lejano paralelo a la fuente.

A partir del teorema de Green, se puede derivar una integral que describe la presión acústica en cualquier lugar del espacio medio entre la fuente y un plano de medida. La presión compleja en cualquier punto en el espacio libre puede expresarse como una función de la presión compleja ( $\bar{p}$ ) en el plano de la fuente  $z_s$ , donde  $\bar{p}_s(x', y', z_s)$  es la distribución de presión compleja en  $z_s$ , y  $\bar{G}'(x-x', y-y', z-z_s)$  es la derivada normal de la función de Green que satisface la condición límite Dirichlet homogénea en  $z_s$ . [4]

$$\bar{p}(x, y, z) = - \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_s(x', y', z_s) \times \bar{G}'(x-x', y-y', z-z_s) dx' dy' \quad (1)$$

Si se considera que todos los puntos están localizados en el plano de medida, denominado holograma,  $z_h$ . La ecuación anterior se convierte en

$$\bar{p}_h(x, y, z_h) = \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_s(x', y', z_s) \times \bar{G}'(x-x', y-y', z_h-z_s) dx' dy' \quad (2)$$

Como  $z_h - z_s$  es una constante, la ecuación (12) describe una convolución 2D, entre la presión compleja en el plano  $z_s$  y la función de Green modificada, que se convierte en un producto simple en el espacio del número de onda:

$$\bar{p}_h(k_x, k_y, z_h) = \bar{p}_s(k_x, k_y, z_s) \cdot \bar{G}'(k_x, k_y, z_h - z_s) \quad (3)$$

donde  $z_h - z_s$  se define como la distancia entre el plano de la fuente y el plano del holograma.

En la realización de medidas con holografía acústica utilizando un array de micrófonos, existen tres factores cruciales a tener en cuenta: la distancia entre el holograma (plano de medida) y la fuente, la separación entre micrófonos y las dimensiones del array. A continuación se desarrolla cada factor exponiendo qué restricciones impone. En primer lugar, es necesario fijar una distancia fuente-holograma,  $d$ , pequeña [1]. Esto permite medir el campo cercano a la fuente, capturando las componentes de onda evanescentes, fundamentales para la reconstrucción. La distancia  $d$  debe cumplir la siguiente desigualdad en relación con la distancia entre micrófonos del array en los ejes  $x$  e  $y$ , respectivamente ( $\Delta x, \Delta y$ ): [5]

$$\min(\Delta x, \Delta y) \leq d \leq 2 \min(\Delta x, \Delta y) \quad (4)$$

La distancia entre micrófonos fija el límite superior de frecuencia de trabajo. La máxima separación entre micrófonos debe ser menor o igual a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia más alta de interés:

$$\max(dx, dy) \leq \frac{c}{2 f_{max}} = \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

La distancia entre micrófonos también influye en la resolución de la fuente. Durante el proceso de reconstrucción es necesario calcular la transformada de Fourier en 2 dimensiones (FFT2D) de la matriz de presiones, y ésta requiere puntos de medida espaciados uniformemente en las dos dimensiones  $x$  e  $y$ . Además, el número de puntos de medida del holograma debe ser par, ya que la FFT2D necesita  $N$  puntos donde  $N$  es una potencia de dos. Cabe resaltar que el número de puntos de medida puede ser par pero no potencia de dos, en este caso se puede rellenar con ceros hasta conseguir la potencia de dos más cercana. El límite inferior de la frecuencia de trabajo viene fijado por las dimensiones del array, después del relleno con ceros. Así, las dimensiones del array tienen que ser como mínimo una longitud de onda de la frecuencia más baja de interés [3] [4]:

$$f_{min} = \frac{c}{\lambda_{max}} \quad \lambda_{max} = \max(L_x, L_y) \quad (6)$$

Debido a que el proceso de reconstrucción introduce componentes de onda evanescentes no deseadas, que no están asociadas al fenómeno acústico, es necesario realizar un filtrado en el espacio- $k$  con el propósito de suprimirlas. Durante el proceso de reconstrucción, justo antes de realizar la transformada de Fourier inversa en dos dimensiones, se debe aplicar un filtro en el espacio- $k$ . Este filtrado es necesario porque el error causado por la utilización de un plano de medida finito y el ruido introducido en los datos de medida se amplifica exponencialmente al reconstruir el campo en la superficie de la fuente [6]. Como resultado de esta amplificación exponencial, se amplifican más las componentes con mayor número de onda. Si el ruido es del mismo orden de magnitud que los datos medidos, los efectos de aquél pueden ser considerables. Para eliminar este ruido en el espacio- $k$  de alta frecuencia se aplica un filtro paso-bajo espacial. Dos de los filtros más utilizados son el Wiener y el Butterworth. La expresión analítica para el primero es:

$$W(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{k_r - k_c}{\alpha}} & \text{si } k_r \leq k_c \\ \frac{1}{2} e^{-\frac{k_r - k_c}{\alpha}} & \text{si } k_r > k_c \end{cases} \quad (7)$$

donde  $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ . Los parámetros ajustables del filtro son  $k_c$  y  $\alpha$ . El número de onda de corte proporciona el valor de  $k_c$  mientras que la forma de la pendiente la fija  $\alpha$ . El parámetro  $k_c$  puede tomar valores que cumplan  $0 < k_c < k_{max}$ , y  $k_{max}$  se calcula como  $k_{max} = \frac{\pi}{dx}$ . En la práctica, se suele multiplicar  $k_{max}$  por un factor entre 0 y 1 para obtener  $k_c$ . De este modo, un valor posible de  $k_c$  sería, por ejemplo  $k_c = 0.6 k_{max}$ . El valor de  $\alpha$  también varía entre 0 y 1, es decir  $0 < \alpha < 1$ . Así, se pueden variar ambos parámetros  $k_c$  y  $\alpha$ , obteniendo diferentes filtros, cada uno cortará a un determinado número de onda  $k_c$ , y la forma de cortar dependerá del valor de  $\alpha$ , permitiendo suavizar el corte o, por el contrario, hacerlo más abrupto.

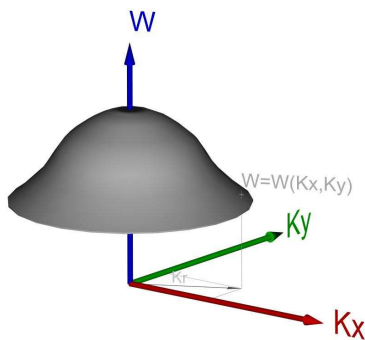


Figura 2. Representación de un filtro genérico en el espacio-k

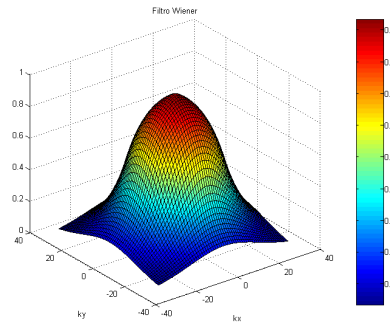


Figura 3. Filtro Wiener con  $k_c = 0.3 k_{max}$ ,  $\alpha = 0.5$

Para visualizar gráficamente el filtro en el espacio-K se puede utilizar un sistema de tres ejes coordenados. Los ejes tradicionalmente llamados X e Y en el espacio convencional pasan a ser  $k_x$  y  $k_y$  en el espacio-k, mientras que en el eje Z se representa el valor del filtro W. Como  $W = W(k_x, k_y)$ , se obtiene una superficie en el *espacio-k*, véase figuras 2 y 3. El filtro espacial actúa del siguiente modo: se realiza el producto de la transformada de Fourier en dos dimensiones del campo sonoro por la función filtro, trabajando en el espacio-k. Si, para un cierto valor de  $k_r$  (distancia al eje Z), el valor del filtro W es próximo a 1, ese número de onda no se altera. Si, por el contrario, el valor de W es próximo a 0, entonces se está atenuando ese número de onda. Se puede obtener una interpretación de las imágenes 3D del filtro: el filtro utilizado es tipo paso-bajo, no afecta a los bajos números de onda pero atenúa los altos números de onda. En la figura 3, se observa como el valor de W en las proximidades del origen (0,0) es próximo a 1, y va disminuyendo hacia 0 al alejarse de él. El valor de  $k_r = k_c$  representa una circunferencia sobre el plano  $k_x, k_y$ , y fija el valor de número de onda, a partir del cual "corta" el filtro, gráficamente está ubicado en las cercanías del "desnivel" en la superficie. La forma de la pendiente del "desnivel" en el gráfico viene fijada por  $\alpha$ .

El filtro Butterworth obedece a la siguiente ecuación:

$$B(k_x, k_y) = \frac{1}{1 + \left(\frac{k_r}{k_c}\right)^{2n}} \quad (8)$$

Donde  $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  es la distancia al origen en el espacio-k. Se puede modificar el número de onda de corte  $k_c$  y el orden del filtro, representado por  $n$  [7] [8].  $k_c$  fija el valor de número de onda a partir del cual los efectos del filtro son notables. En este filtro, para controlar la forma de la zona de transición se utiliza el parámetro  $n$ , denominado orden del filtro. El orden del filtro puede tomar el valor de números naturales, así  $n = 1, 2, 3, 4, etc.$  Al aumentar el orden del filtro se consigue una pendiente mayor, con lo que el corte es más abrupto, más preciso. En la figura 4 se muestran imágenes del valor del filtro Butterworth para diferentes valores de los parámetros ajustables  $k_c$  y  $n$ . Se observa que el alcance del filtro en términos de número de onda  $k$  varía en función de los parámetros que se tomen. Cuanto mayor es  $k_c$ , el filtro actúa sobre una parte menor del espectro ya que la parte de superficie que está próxima a  $B = 0$  es cada vez menor y sólo se recortarán los números de onda altos. Por su parte, el orden del filtro modifica la pendiente: a mayor orden, la pendiente es mayor, con

lo que el corte es más preciso; con orden pequeño se consigue una transición suave en las cercanías de  $k_c$ .

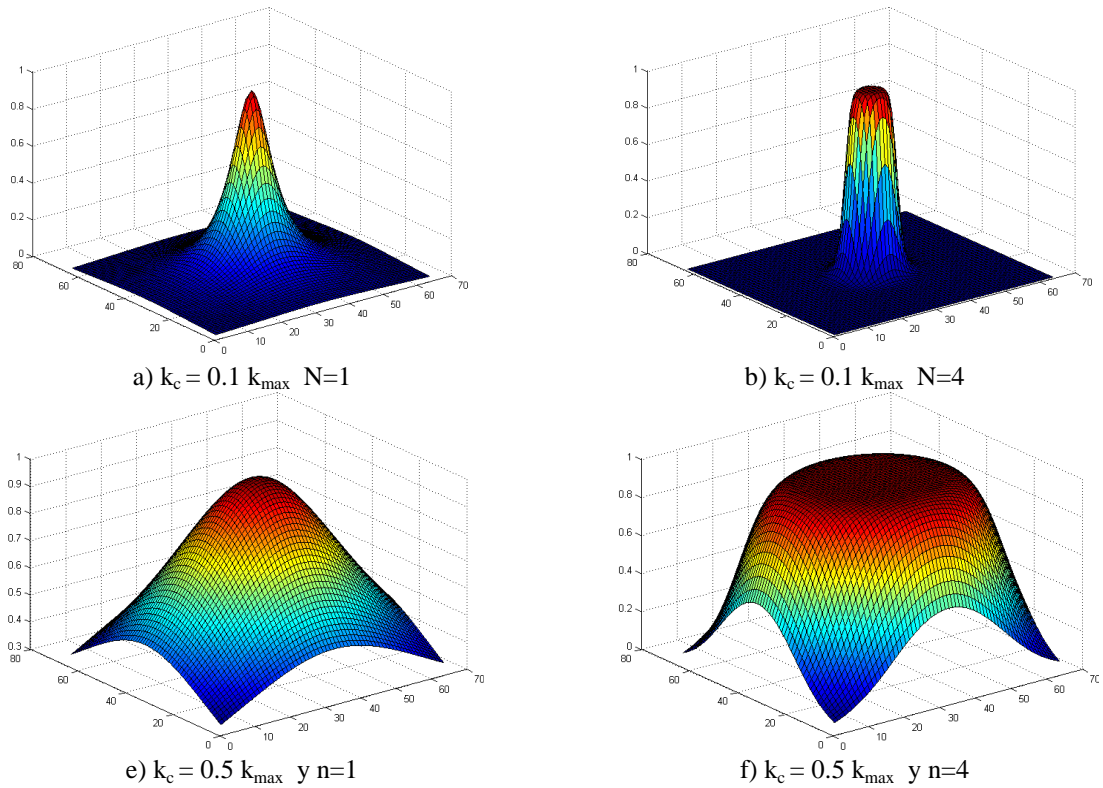


Figura 4. Representación del filtro Butterworth para diferentes  $k_c$  y distintos órdenes

### 3 Desarrollo

La base experimental utilizada para llevar a cabo las medidas ha sido un altavoz de modos distribuidos que se muestra en la figura donde se muestra la parte delantera y la trasera donde se observa la posición de los dos actuadores (que son los originales del altavoz).



Figura 5. Altavoz DML utilizado en el trabajo tal como se comercializa: a) Parte delantera, b) Parte trasera donde se puede visualizar la posición de los actuadores.

El panel se ha instalado en otro soporte como se muestra en la figura 6 sin cambiar la posición de los actuadores y se han llevado a cabo medidas del tipo NAH para dos tipos de condiciones de contorno. En la práctica estas condiciones de contorno han consistido en dos pegamentos distintos : uno más rígido que el otro (figura 6 b)

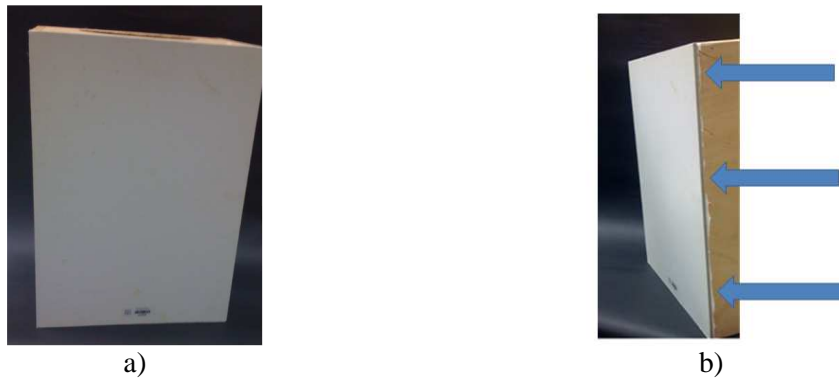


Figura 6 – Dispositivo experimental para llevar a cabo las medidas a) Vista frontal b) Vista lateral desde la que se puede visualizar el pegamento utilizado (condición de contorno)

Tomando como referencia esta base experimental, se han llevado a cabo, previamente al experimento real un experimento numérico con el objeto de tener un orden de magnitud de la ubicación de las frecuencias modales.

En cuanto a los detalles concretos de los registros para NAH son los siguientes. La distancia a la que se ha situado el micrófono ha sido de 5 mm, el tamaño de la ventana espacial de 0.6x0.6 m, la distancia entre posiciones de micrófono 1 cm, la pendiente del filtro,  $\alpha = 0.1$ , el número de onda de la frecuencia de corte,  $k_c = 0.6$

En la figura se presenta el filtro utilizado

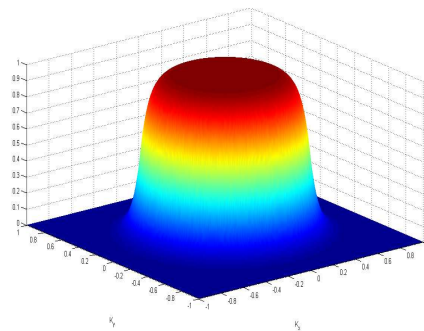


Figura 7- Representación del filtro utilizado en el espacio k.

En las figura 8 se presentan en forma de tabla los resultados del experimento numérico comparando con el procesado de NAH. En la figura 9 se presentan la representación de las velocidades de vibración para para mismas frecuencias comparando los dos pegamentos (condiciones de contorno) manteniendo fijos los actuadores y alimentando con la misma potencia los actuadores.

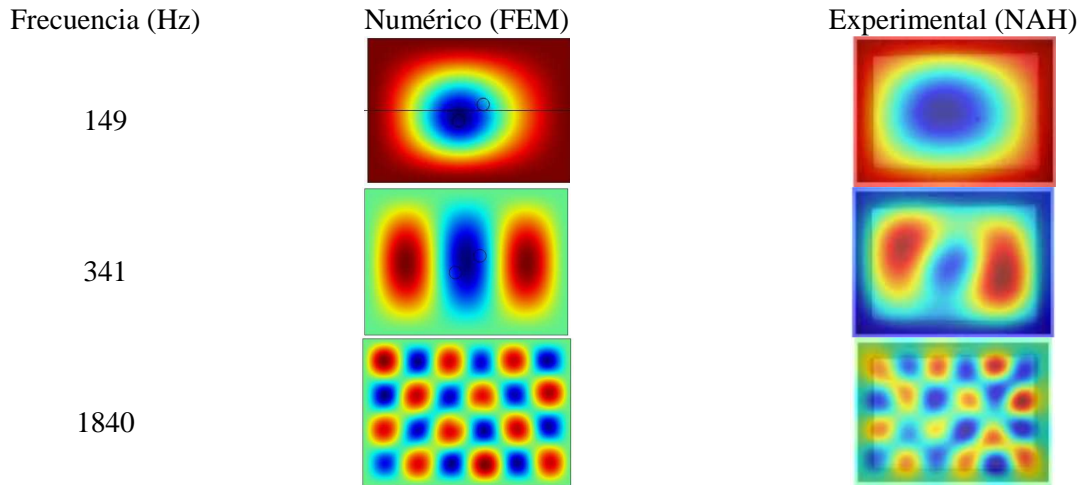


Figura 8 – Comparativa del experimento numérico en FEM con los resultados de NAH (para el pegamento más rígido).

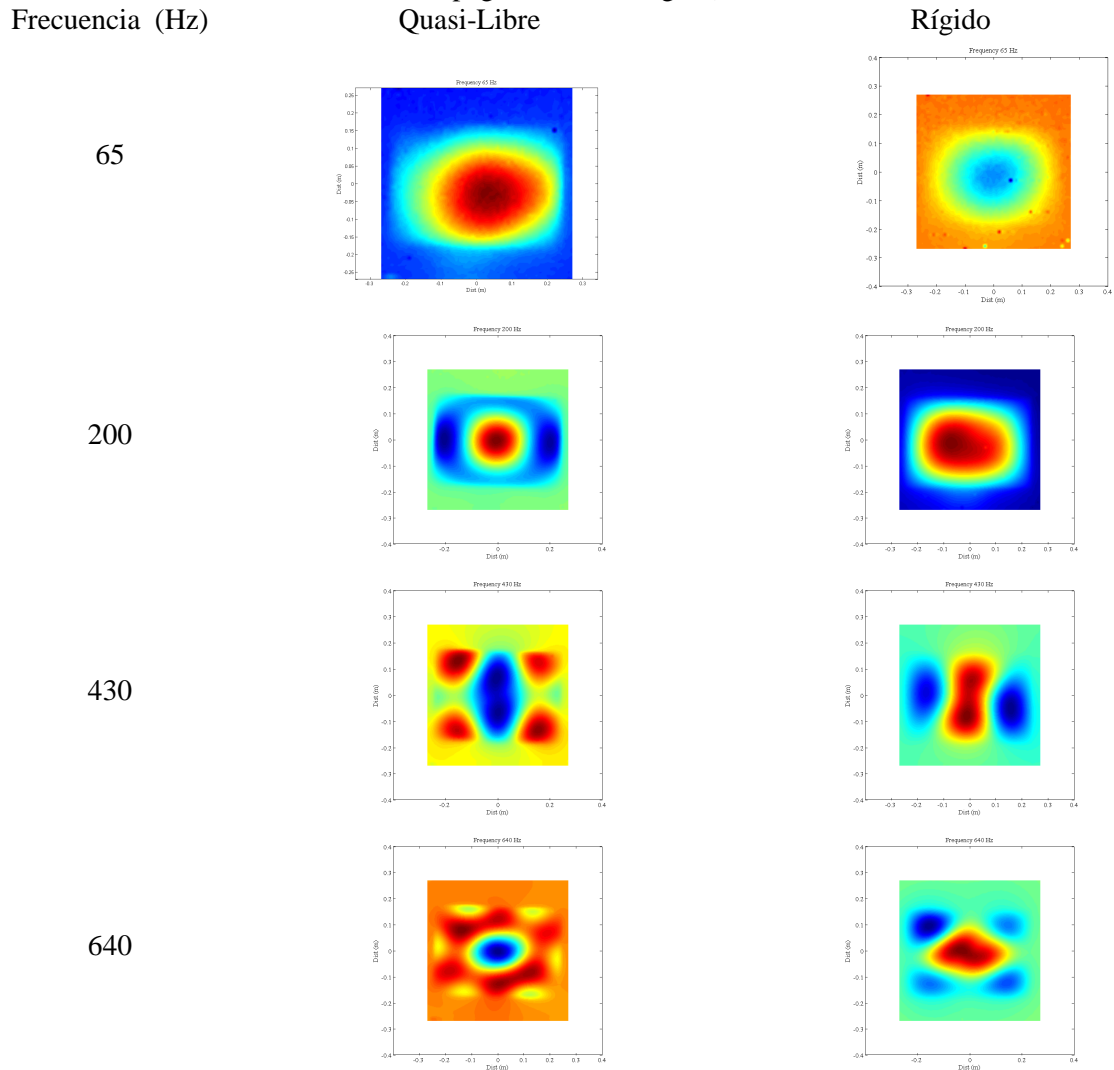


Figura 9 – Velocidad de vibración en la superficie del panel obtenidos a partir de los registros NAH para las dos condiciones de contorno estudiadas.



## 4 Conclusiones

Se ha aplicado la técnica de Holografía Acústica de Campo Cercano para visualizar las diferencias en cuanto al comportamiento vibratorio de un panel de un altavoz DML cuando se aplican dos condiciones de contorno distintas (en la práctica, dos pegamentos distintos en los bordes). Se ha implementado asimismo un modelo en FEM cuyos resultados son coherentes con los experimentales.

Los resultados son coherentes con lo esperado y serán utilizados para determinar las condiciones de fijación óptimas de sistemas radiantes basados en actuadores en recintos de pequeño tamaño donde no se desea que los sistemas radiantes sean visibles por los ocupantes

## Referencias

- [1] J.D Maynard., EG Williams, Y Lee. *Near field acoustic holography: I, Theory of generalized holography and the development of NAH*. Journal Acoustic Society of America.78 ,1985, 1395-1413
- [2] J.D Maynard., EG Williams, Y Lee. *Near field acoustic holography: II, Theory of generalized holography and the development of NAH* Journal Acoustic Society of America 81, 1987, 1307-1322.
- [3] Sean Wu. F: *Techniques for Implementing Near-Field Acoustic Holography*. Sound and Vibration Magazine, 2010.
- [4] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, “Nearfield acoustic holography: I.Theory of generalized holography and the development of NAH”, Journal of the Acoustical Society of America, 78 (4), 1395-1413, (1985)
- [5] Earl G. Williams and Henry D. Dardy, “Nearfield acoustical holography using an underwater, automated scanner”, Journal of the Acoustical Society of America, 78(2), 789-798, (1985)
- [6] S.M. Dumbacher and D. L. Brown, J. R. Blough, R. W. Bono, “Practical Aspects of
- [7] Making NAH Measurements”. Noise and Vibration Conference, Traverse City, Michigan, May 17–20, (1999)
- [8] T. H. M. Burns, “Measurement and visualization of instantaneous power flow in steady-state acoustic fields”, UMI Dissertation Services, thesis, 1995.