

Estudio de los parámetros del filtro Wiener en Near-Field Acoustic Holography

Eva Escuder, Jesús Alba y Jaime Ramis

Departamento de Física Aplicada,
Escuela Politécnica Superior de Gandia, Universitat Politècnica de València,
Ctra. Natzaret Oliva s/n, 46730 Grau de Gandia, España
Tel.: 34 962 849300; Fax: 34 962 849309
e-mail: evescude@fis.upv.es, jesalba@fis.upv.es, jramis@fis.upv.es

Resumen

Para estudiar el comportamiento acústico y vibratorio de una fuente sonora mediante imágenes reconstruidas con la técnica Near-Field Acoustic Holography (NAH) a partir de medidas experimentales de presión acústica, resulta necesario filtrar la señal de entrada en el espacio número de onda para obtener una buena resolución de la imagen reconstruida. Las componentes de mayor número de onda están relacionadas con la distorsión de la información, por tanto es natural esperar que los mejores resultados se obtengan al eliminar las componentes de mayor número de onda, es decir, filtrando. Sin embargo, el filtrado reduce la resolución en el plano de predicción. Esto significa que la resolución en el plano de predicción es diferente de la resolución en el plano del holograma. En este trabajo se realiza un estudio de los parámetros del filtro Wiener utilizado en la reconstrucción de los parámetros acústicos de una fuente sonora mediante NAH. Se optimizan los valores de los parámetros utilizados en este filtro con el objetivo de obtener imágenes con buena calidad de reconstrucción y localización de fuentes sonoras, así como valores similares a los obtenidos con las técnicas convencionales.

Palabras clave: NAH, filtro, resolución.

STUDY OF THE PARAMETERS OF THE WIENER FILTER IN NEAR-FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

Summary

In order to study the acoustic and vibratory behavior of a sonorous source by means of images reconstructed with the technique Near-Field Acoustic Holography (NAH) from experimental measurements of sound pressure, it is necessary to filter the signal of entrance in the wave number space to obtain a good resolution of the reconstructed image. The components of greater number of wave are related to the distortion of the information, therefore it is natural to hope that the best results will be obtained when the components of greater number of wave are eliminated, that is to say, filtering. Nevertheless, the filter reduces the resolution in the prediction plane. This means that the resolution in the prediction plane is different from the resolution in the hologram plane. In this work it is carried out a study of the parameters of the Wiener filter used in the reconstruction of the acoustic parameters of a sonorous source by means of NAH. The values of the parameters used in this filter are optimized with the objective of obtaining images with good quality of reconstruction and location of sonorous sources, as well as values similar to the obtained ones with the conventional techniques.

Keywords: NAH, filter, resolution.

INTRODUCCIÓN

La técnica Holografía Acústica de Campo Cercano (NAH) 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 (plano del holograma). Esta técnica surgió en 1980 de manos de Williams y Maynard mejorando la holografía convencional gracias a las medidas en campo cercano, que permiten abarcar un ancho rango de frecuencias y además 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 fuente¹⁻⁸.

Las medidas se hacen normalmente en una superficie plana (plano del holograma), y estos datos se utilizan para reconstruir el campo tridimensional. Lo que hace que se pueda obtener toda esta información es el hecho de que puede utilizarse una función de Green conocida, y el que el campo medido obedece a la ecuación de onda.

En NAH plana, la grabación del campo de presión del sonido de una fuente sonora en una superficie 2-D se usa para determinar el campo de presiones en 3-D y otros parámetros acústicos de una fuente vibrando. Esta técnica envuelve la grabación de la amplitud de presión sonora y la fase con un array plano de micrófonos, para calcular mediante técnicas de reconstrucción digital la estructura de la fuente de sonido objeto.

Esta técnica se ha utilizado en diferentes aplicaciones como en localización de fuentes sonoras, por ejemplo, dos fuentes radiando o placas vibrando⁹⁻¹¹, en la superficie de motores^{12,13}, para estudiar la radiación de estructuras radiantes¹⁴⁻¹⁶.

Hay fuentes de error ligadas al emparejamiento de los micrófonos y a las posiciones de medida. El emparejamiento introduce error en magnitud y fase, es decir, interesaría que todos los micrófonos fueran iguales. Respecto a las posiciones de medida, las componentes de mayor número de onda están relacionadas con la distorsión de la información por lo que es necesario realizar un filtrado.

Antes de realizar la retropropagación, es necesario aplicar un filtro en el espacio-k, ya que cualquier error causado por la utilización de un plano de medida infinito o el ruido en los datos de medida se amplificará exponencialmente en la reconstrucción en la superficie de la fuente⁷. Como resultado de esta amplificación exponencial, se amplificarán más las componentes más altas de número de onda. Cuando el ruido es del mismo orden de magnitud que los datos en estas componentes, sus efectos pueden ser acusados y reducirse con la aplicación de un filtro paso bajo. Éste elimina el ruido espacial de alta frecuencia, suavizando de esta manera los datos espaciales¹¹. En la mayoría de referencias consultadas se utiliza el filtro Wiener, con los parámetros $k_c = 0,6 k_{\text{máx}}$; y $\alpha = 0,2$; estos valores ofrecen buenos resultados de predicción pero no ofrecen una buena resolución de la reconstrucción de la imagen^{18,7}. El incremento de la predicción debe comprometerse con la reducción de la resolución en el plano de predicción¹⁹. En este trabajo se optimizan los valores de los parámetros del filtro Wiener con el objetivo de obtener imágenes con buena resolución en la reconstrucción y localización de fuentes sonoras, así como valores similares a los obtenidos con las técnicas convencionales.

FORMALISMO GENERAL. NEAR-FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

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. Mediante la ecuación (1), 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 .

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

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 . Si se considera que todos los puntos están localizados en el plano de medida, denominado holograma, z_h , la ecuación (1) se convierte en

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

Como $z_h - z_s$ es una constante, la ecuación (2) describe una convolución 2D entre la presión compleja en el plano z_s y la función de Green modificada. Esta convolución 2D toma la forma:

$$\bar{p}_h(x, y, z_h) = \bar{p}_s(x, y, z_s) ** \bar{G}'(x, y, z_h - z_s) \quad (3)$$

donde $**$ denota la convolución 2D. La convolución en el espacio real se convierte en un producto simple en el espacio del número de onda, ecuación (4). El número de onda k es la magnitud de un vector que indica la dirección de propagación y la variación de fase espacial. Esta magnitud es de vital importancia en la representación matemática de campos de onda en dos y tres dimensiones. El campo sonoro de cualquier fuente monocromática puede descomponerse en un espectro angular, definido en el espacio del número de onda (espacio k), como la superposición de ondas planas viajando en direcciones diferentes; no todas estas ondas se propagan normalmente, algunas decaen exponencialmente con la distancia.

$$\bar{p}_h(k_x, k_y, z_h) = \bar{p}_s(k_x, k_y, z_s) \cdot \bar{G}'(k_x, k_y, z_h - z_s) \quad (4)$$

La transformada de Fourier en dos dimensiones se define como

$$\bar{p}_h(k_x, k_y, z_h) \equiv \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_h(x, y, z_h) e^{ik_x x} e^{ik_y y} dx dy \quad (5)$$

tomando la transformada de Fourier en ambas caras de la ecuación (1) se obtiene la distribución de presión compleja en un plano arbitrario z como producto en el espacio de número de onda:

$$\bar{p}(k_x, k_y, z) = \bar{p}_s(k_x, k_y, z_s) \cdot \bar{G}'(k_x, k_y, z - z_s) \quad (6)$$

Despejando, de la ecuación (4) se obtiene

$$\bar{p}_s(k_x, k_y, z_s) = \bar{p}_h(k_x, k_y, z_h) \cdot \bar{G}'^{-1}(k_x, k_y, d) \quad (7)$$

donde $d = z_h - z_s$ se define como la distancia entre el plano reconstruido y el plano del holograma.

A partir de la presión en el espacio k , $\bar{p}(k_x, k_y, z)$, se puede determinar el vector velocidad de partícula aplicando la ecuación de Euler. Para campos acústicos armónicos en el tiempo, la ecuación de Euler se define como:

$$\vec{v} = \frac{i}{\omega \rho} \vec{\nabla} p \quad (8)$$

Tomando la transformada inversa de Fourier de la ecuación (8) se obtiene

$$\bar{v}(k_x, k_y, z) = \frac{1}{\omega \rho} \left(k_x e_x + k_y e_y - i e_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \bar{p}(k_x, k_y, d) \quad (9)$$

donde $\bar{p}(k_x, k_y, z)$ se halla a partir de la ecuación (7) en el plano de interés¹⁸.

El filtro inverso se encarga de la restauración de imágenes con un efecto de degradación por movimiento de un cierto número de píxels. Se multiplica la transformada de la imagen degradada por el filtro inverso y a la imagen resultante se le aplica la transformada inversa, obteniendo así la imagen restaurada. El filtro Wiener es una variante del filtro inverso, siendo los dos filtros de mínimos cuadrados. La ecuación del filtro Wiener viene dada por^{20,21}:

$$W(k_X, k_Y) = \begin{cases} 1 - \frac{\exp\{(k_r/k_c - 1)/\alpha\}}{2}; & k_r \leq k_c \\ \frac{\exp\{(1 - k_r/k_c)/\alpha\}}{2}; & k_r > k_c \end{cases} \quad (10)$$

donde $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ y $k_c = 0,1k_{\text{máx}}$, donde $k_{\text{máx}} = \frac{\pi}{\Delta x} \cdot k_c$ es el número de onda de corte y α es el parámetro que fija la forma de la pendiente. En una referencia se aconseja que se deben decidir en cada frecuencia²². El parámetro k_c puede tomar valores que cumplan $0 < k_c < k_{\text{máx}}$. En la práctica, se suele multiplicar $k_{\text{máx}}$ por un factor entre 0 y 1 para obtener k_c .

El valor de α también varía entre 0 y 1, es decir, $0 < \alpha < 1$. Así, se pueden variar ambos parámetros k_c y α , obteniendo diferentes filtros; cada uno cortará a un determinado número de onda k_c , y la forma de cortar dependerá del valor que se dé a α , permitiendo suavizar el corte o, por el contrario, hacerlo más abrupto.

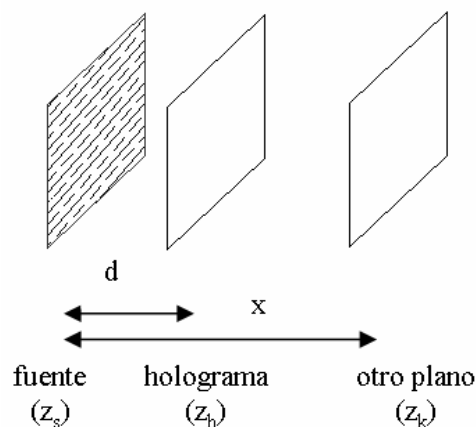


Figura 1. Tres planos de medida, plano fuente, holograma y plano lejano paralelo a la fuente

DESARROLLO

Dispositivo experimental

La caja acústica estudiada en este trabajo es una caja autoamplificada compuesta por dos vías y un sistema de refuerzo de graves denominado Bass Reflex, (véase Figura 2). Los dos altavoces que la forman son de radiación directa y dinámicos (basados en un transductor de bobina móvil). Este tipo de altavoz se caracteriza por un rendimiento elevado, fácil conexión, robustez y posibilidad de reproducir cualquier frecuencia en función de su construcción y de las dimensiones del cono. El altavoz situado en la parte superior de la caja es un tweeter que reproduce altas frecuencias, mientras que el situado debajo es un altavoz de graves o woofer.

En primer lugar se calibran los micrófonos. Se genera una señal conocida, en nuestro caso ruido blanco, y se capturan las cuatro señales recibidas por los micrófonos en un plano paralelo situado a una distancia d de la caja acústica. Se toman medidas cada 2.5

cm (distancia de centro a centro entre dos micrófonos) tanto en el eje x como en el eje y, desplazando el array lineal mediante un robot por toda la superficie a medir. El tiempo de medida es de 3 segundos. Se realizaron 28×28 medidas en un plano cercano y paralelo, $d = 4$ cm, al plano de la caja acústica.



Figura 2. Caja acústica radiando a 4 kHz

Efecto del filtro

Como ya se ha comentado, antes de realizar la FFT-2D inversa en el algoritmo de NAH, es necesario aplicar un filtro en el espacio-k. La elección de los parámetros de filtrado es muy importante, ya que la posterior reconstrucción de la imagen depende principalmente de estos factores. Se estudian los parámetros óptimos del filtro Wiener para obtener una mejor resolución de la imagen, y buenos resultados comparables con resultados obtenidos con un acelerómetro. k_c y α son parámetros ajustables que permiten variar la forma del filtro. En adelante, como $k_{\text{máx}}$ es un valor constante, cuando se haga referencia a k_c sólo se hará referencia al valor del coeficiente que le precede. El valor de estos dos parámetros puede variar entre 0 y 1, por lo que se han estudiado las combinaciones posibles de estos dos parámetros con el objetivo de obtener la mejor resolución posible de las imágenes. El filtrado se efectúa en el espacio del número de onda, y consiste en un filtrado que elimina las altas componentes de frecuencia espacial, (véase la Figura 3). El filtro presenta diferentes aspectos dependiendo del valor de los parámetros, (véase Figura 4).

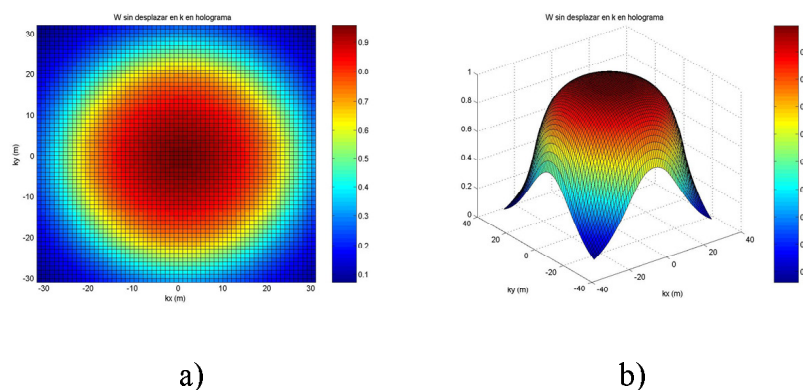


Figura 3. Vistas a) 2D y b) 3D del filtro paso-bajo

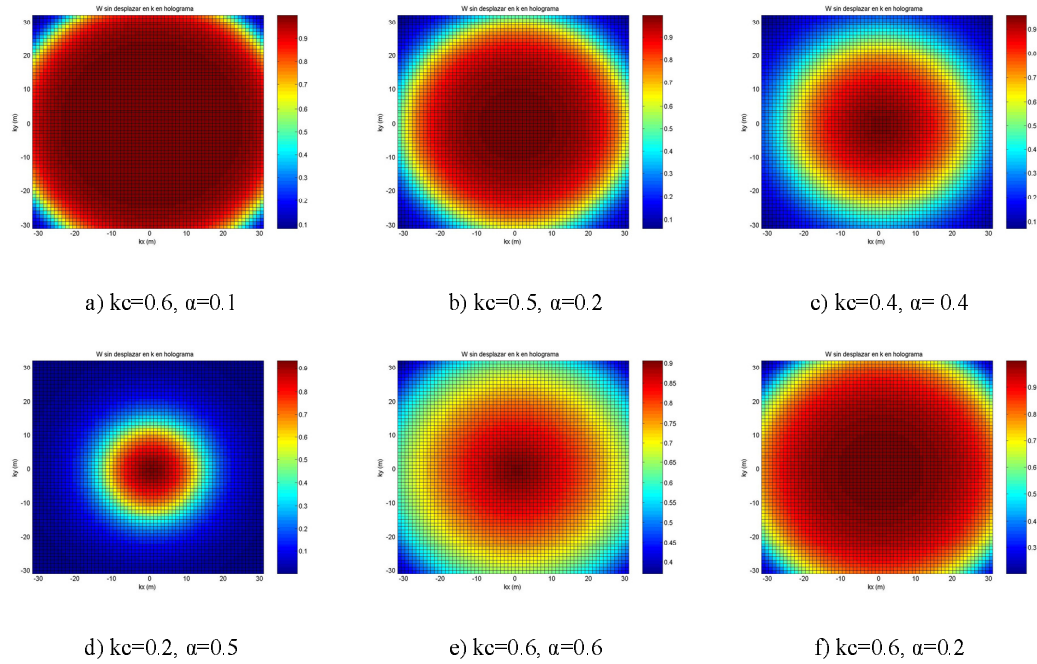


Figura 4. Vista 2D del filtro con distintos parámetros

A partir de las presiones acústicas registradas en el plano del holograma se ha calculado la retropropagación del campo acústico para obtener las magnitudes acústicas en la superficie de la fuente (caja acústica) para 1kHz y 4kHz usando las diferentes combinaciones de parámetros del filtro Wiener representados en la Figura 4.

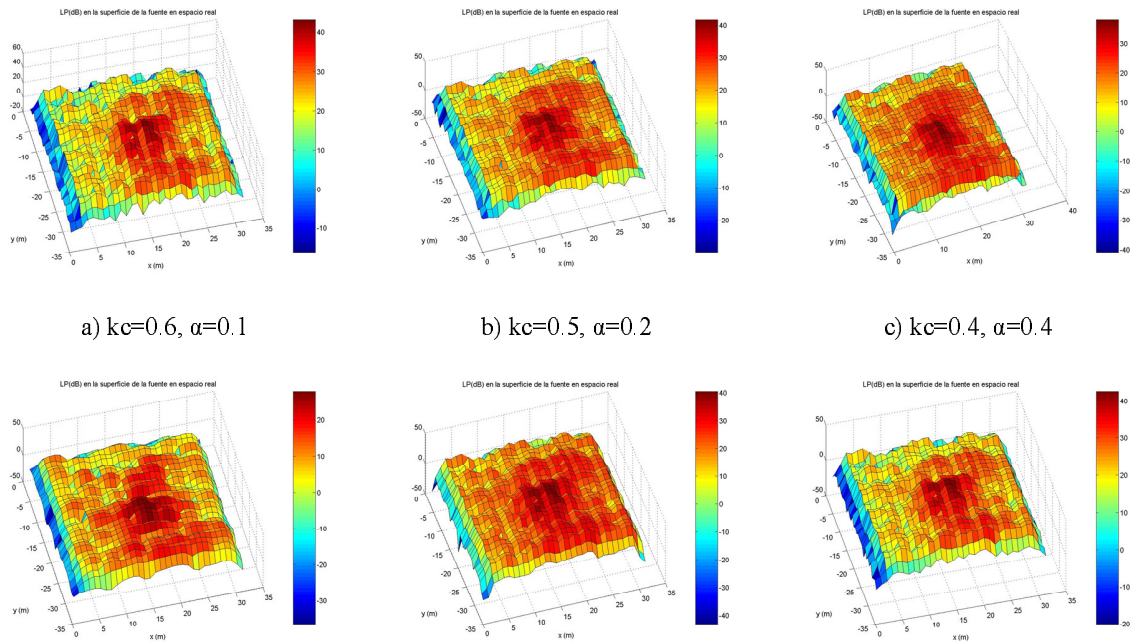


Figura 5. Nivel de presión en la superficie de la caja (dB) para distintos parámetros del filtro a 1kHz.

En la Figura 5 se representa el nivel de presión sonora a 1 kHz, donde se observa diferencia en la resolución en función de los diferentes parámetros del filtro. Comparando las Figuras 5a) y 5e), ($kc=0.6, \alpha=0.1$) y ($kc=0.6, \alpha=0.6$), respectivamente, se observa una diferencia importante en la superficie de resolución reconstruida, observándose que con un α menor la localización del woofer es más precisa. En la Figura 6 se representa la velocidad de vibración; con los parámetros $kc=0.2, \alpha=0.5$ [Figura 6d)] parece que se distingue más claramente la localización de la fuente que con el resto de parámetros del filtro.

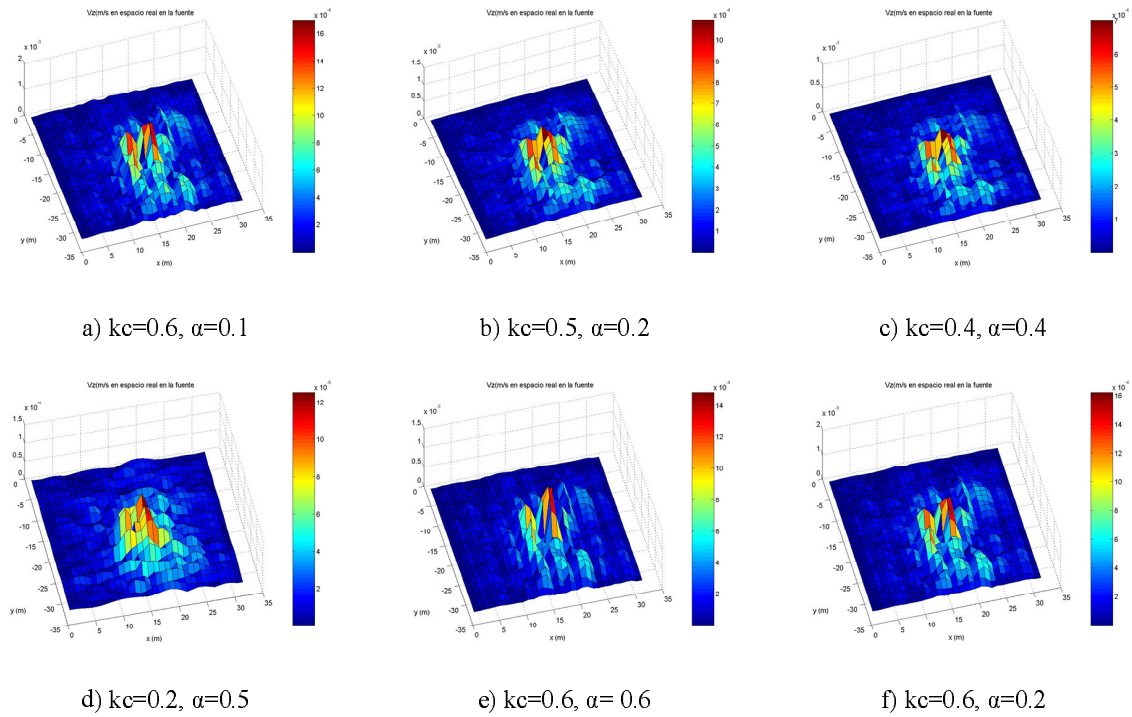


Figura 6. Velocidad de vibración en la superficie de la caja (m/s) para distintos parámetros del filtro a 1kHz.

En las Figuras 7 y 8 se han representado el nivel de presión y la velocidad de vibración en la superficie de la caja para la frecuencia de 4 kHz, donde radia el tweeter que se localiza con mayor precisión respecto al woofer a 1 kHz, siendo las diferencias más patentes. Con los parámetros del filtro $kc=0.2, \alpha=0.5$ [Figura 7d)] se obtiene mayor resolución y localización de la fuente sonora, tanto en el nivel de presión [Figura 7d)] como en la velocidad de vibración [Figura 8d)]. En la velocidad de vibración la diferencia entre las resoluciones es notable observándose que el filtro más adecuado para la reconstrucción visual es el que presenta los parámetros $kc=0.2, \alpha=0.5$. A partir de estos resultados se puede concluir que, al disminuir el valor de kc (radio del filtro), se obtiene un resultado más óptimo de la imagen.

Si se realiza una comparativa de nivel de presión a 4 kHz entre dos filtros en los que solo cambia el valor de α , manteniendo constante kc , Figuras 8a) y 8e), ($kc=0.6, \alpha=0.1$) y ($kc=0.6, \alpha=0.6$), se observa que prácticamente no se aprecia diferencia entre los dos filtros. Por lo tanto, parece que el parámetro α muestra más influencia a frecuencias bajas. Se puede destacar la importancia que toma el parámetro kc respecto al parámetro α .

A partir de los parámetros del filtro que mejor resolución ofrecen, $kc=0.2, \alpha=0.5$, se ha realizado una comparativa con parámetros cercanos a estos como son $kc=0.1, \alpha=0.5$ y $kc=0.2, \alpha=0.4$, (véase Figura 9).

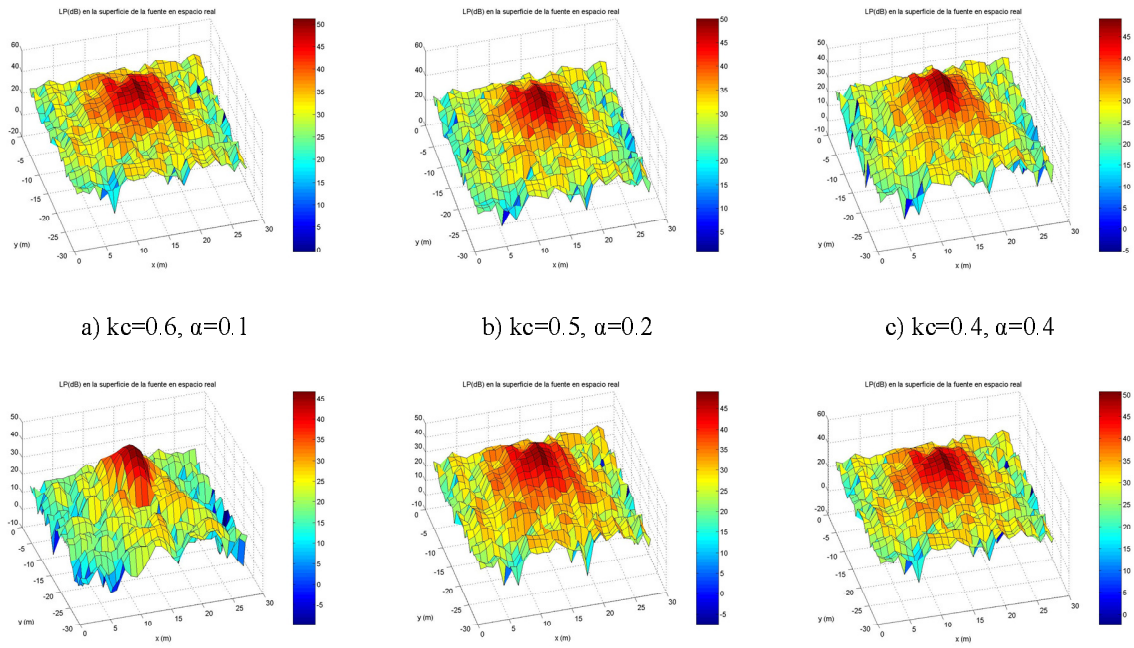


Figura 7. Nivel de presión en la superficie de la caja (dB) para distintos filtros a 4kHz

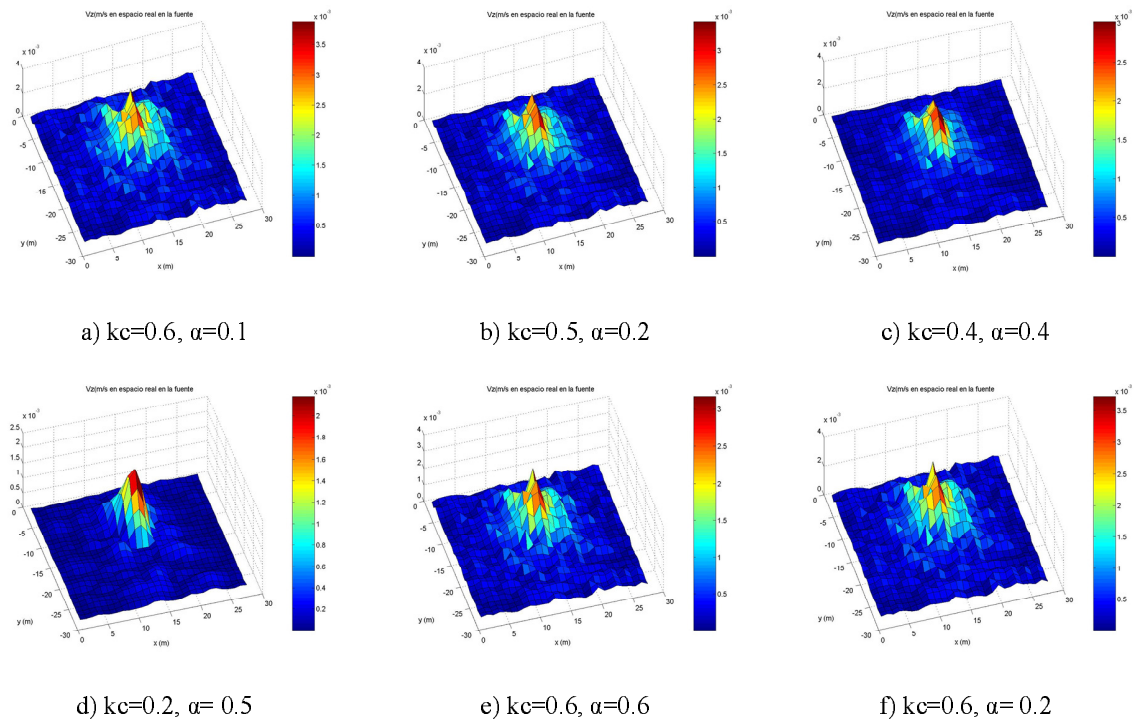
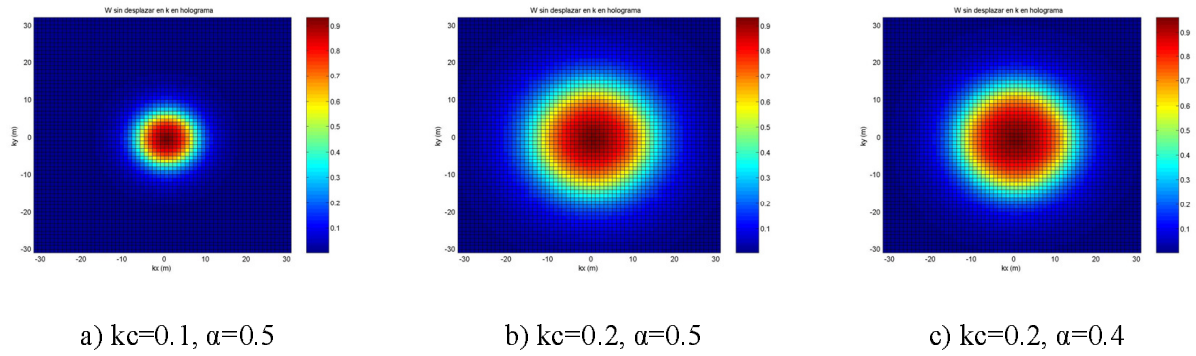
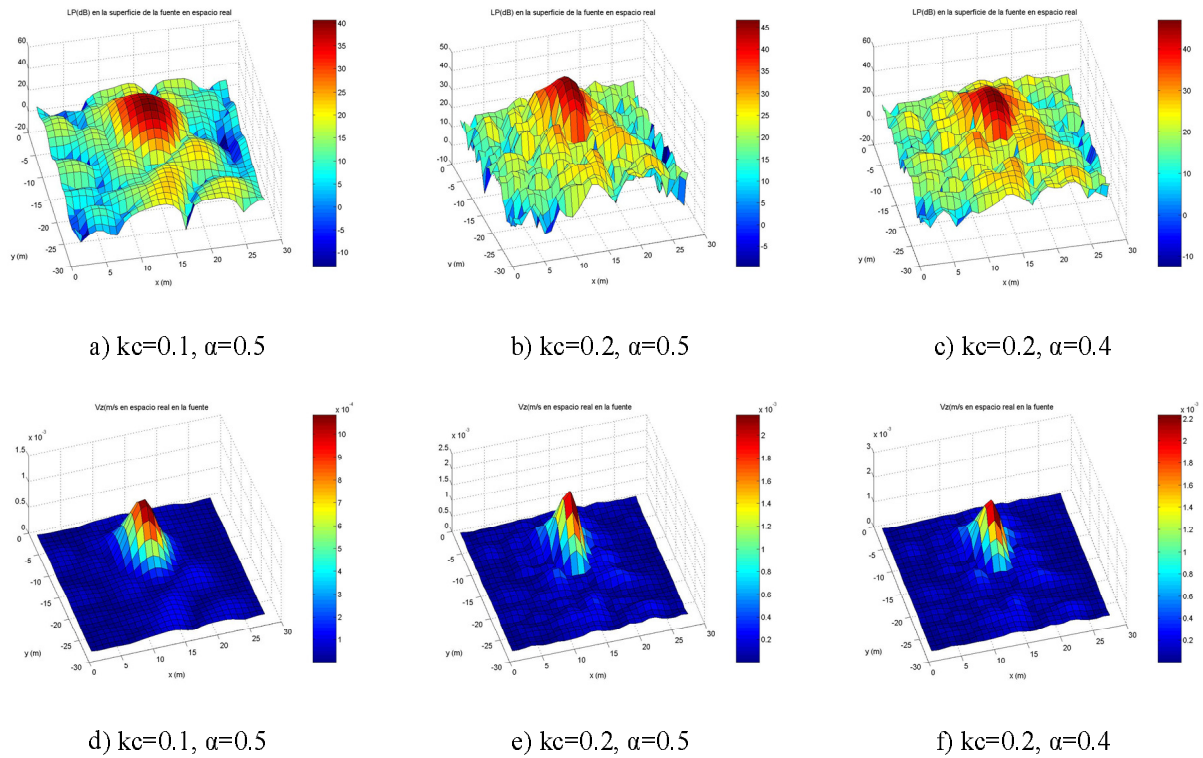


Figura 8. Velocidad de vibración en la superficie de la caja (m/s) para distintos filtros a 4kHz

**Figura 9.** Vista 2D de distintos filtros

En la Figura 10, se representa el nivel de presión y la velocidad de vibración de la caja acústica a 4 kHz. En el nivel de presión, Figura 10a), con los parámetros del filtro $kc=0.1, \alpha=0.5$ la localización de la fuente queda más acentuada y con mejor resolución que con el resto de parámetros. En la velocidad de vibración de la fuente, a pesar de que con los parámetros del filtro $kc=0.2, \alpha=0.5$ y $kc=0.2, \alpha=0.4$ se consigue una buena localización de la fuente sonora, con los parámetros $kc=0.1, \alpha=0.5$ [Figura 10d)] se obtiene una localización más clara de la fuente, ya que suaviza más los niveles que rodean el punto de emisión y se consigue una mejor resolución de la imagen.

**Figura 10.** Nivel de presión, a), b) y c) y velocidad de vibración d), e) y f) en la superficie de la caja para distintos filtros a 4kHz

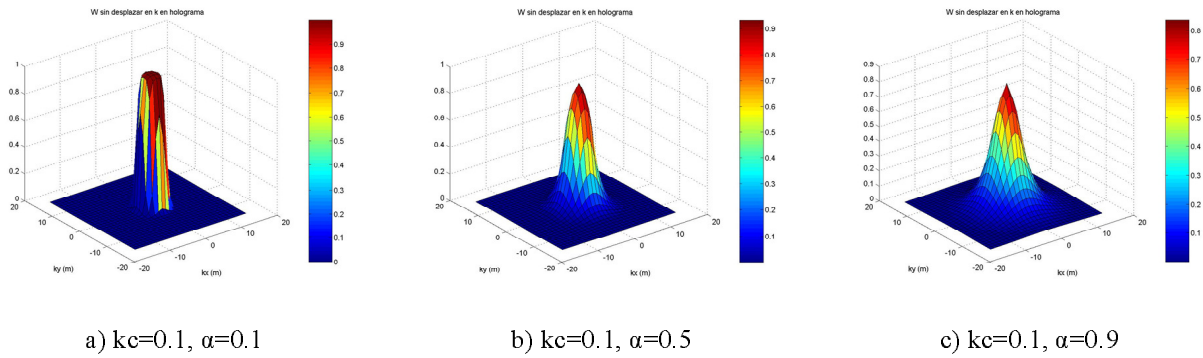


Figura 11. Vistas 3-D de distintos filtros

A partir de los valores del filtro que mejor resultado proporcionan $kc=0.1, \alpha=0.5$ con un radio óptimo $kc=0.1$, se estudia la variación de la pendiente para un valor mínimo $\alpha=0.1$ (pendiente máxima) y un valor máximo $\alpha=0.9$ (pendiente mínima). En la Figura 12 se representan el nivel de presión y la velocidad de vibración en la superficie de la caja considerando estos valores comentados para los parámetros. Se observa que para una pendiente máxima, $kc=0.1, \alpha=0.1$, se obtiene buena resolución de la imagen pero aparecen valores elevados alrededor de la localización de la fuente que pueden enmascarar su localización. En el caso en que se considera una pendiente mínima, $kc=0.1, \alpha=0.9$ [Figura 12c), 12f)] sucede lo contrario, los niveles que rodean la localización de la fuente están más atenuados pero se pierde resolución en la imagen.

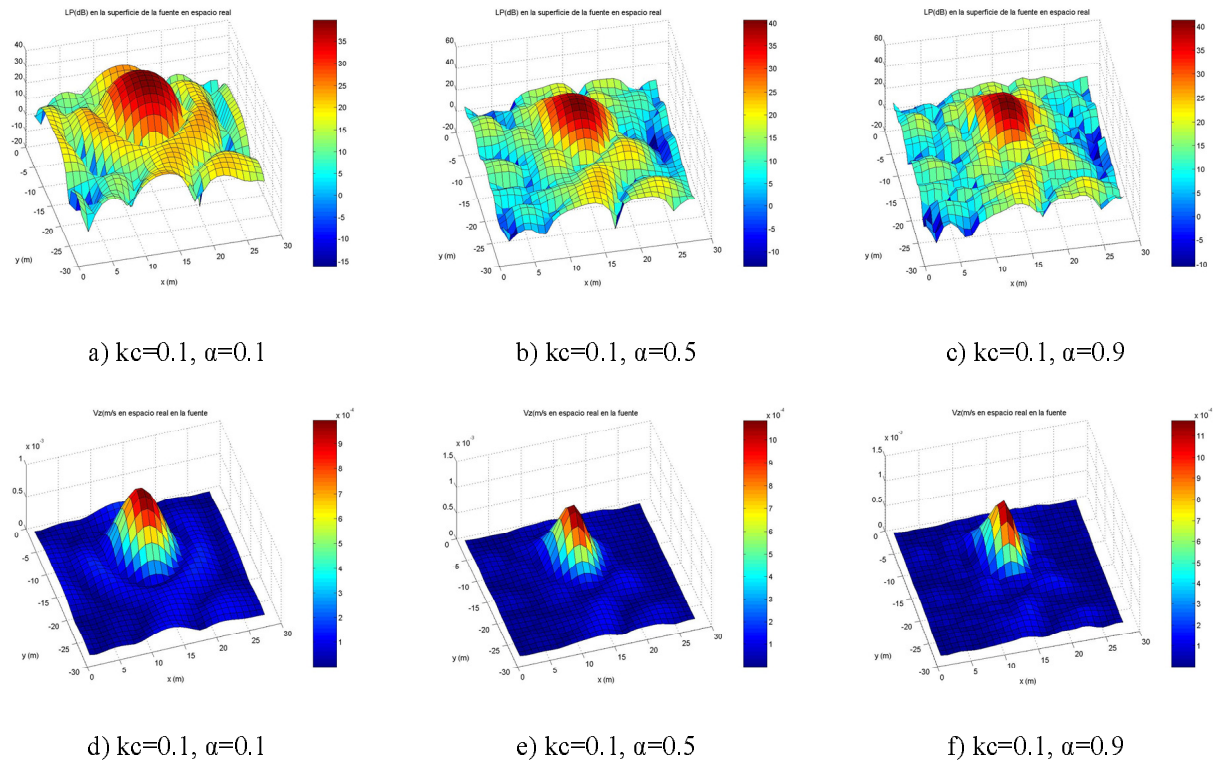


Figura 12. Nivel de presión (dB), a), b) y c) y velocidad de vibración (m/s) d), e) y f) en la superficie de la caja para distintos filtros a 4kHz

Para discutir estos resultados se evalúa el diagrama de directividad de un altavoz montado en pantalla infinita del mismo tamaño (radio 0.013 m) que el tweeter de la caja acústica evaluada. Los diagramas obtenidos pueden observarse en la Figura 13. En función de la frecuencia, ka varía según la Tabla I. Se observa que para $ka < 1$ no deberían aparecer lóbulos secundarios en la radiación del altavoz a 4 kHz, sin embargo, para $ka > 1$ empiezan a aparecer, sobretodo a 20 kHz²³. Estos resultados confirman que el filtro $kc=0.1$, $\alpha=0.5$ proporciona una buena resolución de la imagen, es decir no se observan lóbulos secundarios que no deberían estar, además de conseguir una clara localización de la fuente.

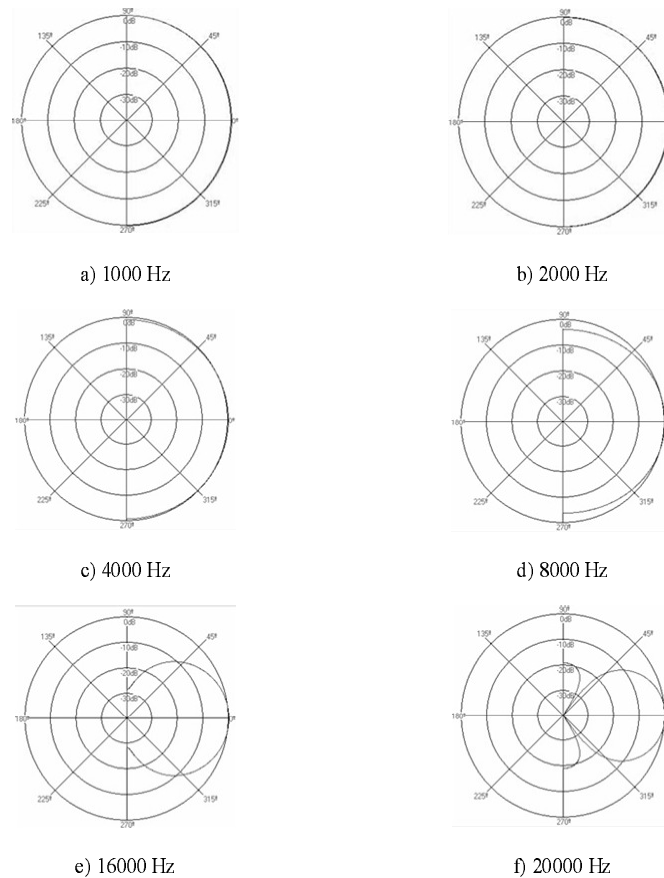


Figura 13. Diagrama de directividad de un altavoz de 13 mm de radio a diferentes frecuencias

$f(\text{Hz})$	ka
250	0,06
500	0,11
1000	0,23
2000	0,46
4000	0,92
8000	1,83
16000	3,66
20000	4,58

Tabla I. ka en función de la frecuencia para un radio del altavoz de 0.0125 m

En la Figura 14 se representan el valor promedio de nivel de presión en planos diferentes (plano de la fuente LPfte, z_s , del holograma LPholo, z_h , y un plano a 2 cm del plano del holograma LPdislej, z_k , según Figura 1) considerando los dos filtros que ofrecen resultados satisfactorios, $kc=0.1$, $\alpha=0.5$, respecto a la resolución de la imagen, y $kc=0.6$, $\alpha=0.2$, utilizado convencionalmente. En la Figura 14a) se observa que el nivel de presión en el plano del holograma obtenido con los valores $kc=0.1$, $\alpha=0.5$ es mayor que en el plano de la fuente para el rango de frecuencias de 500 Hz a 2500 Hz. Este resultado incoherente constata que el filtro $kc=0.1$, $\alpha=0.5$ no resulta conveniente para obtener niveles y velocidades reales y no es útil para realizar comparativas entre distintos planos. Sin embargo, en la Figura 14b) la relación entre planos se mantiene lógica, es decir, el nivel de presión en el plano de la fuente es mayor que en el plano del holograma y éste, a su vez, mayor que en un plano a 2 cm del holograma.

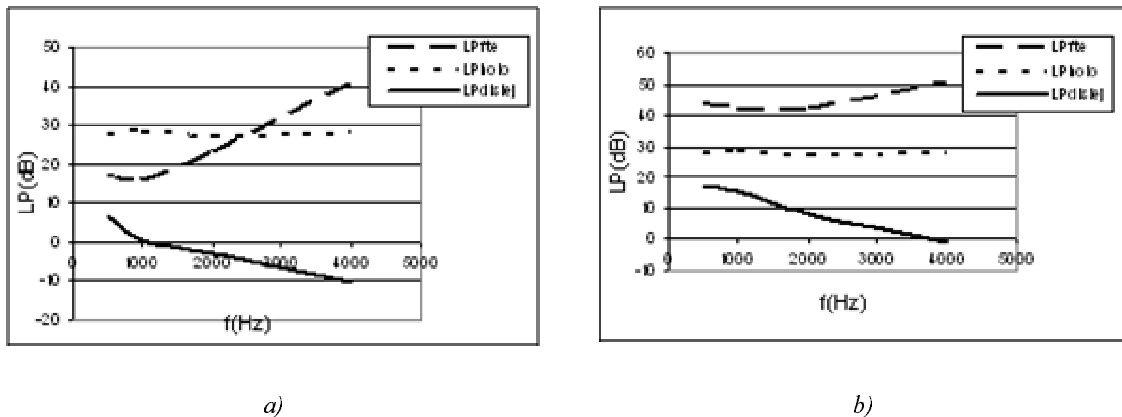


Figura 14. LP(dB) en la fuente (LPfte) en el holograma (LPholo), y a una distancia de 6 cm de la fuente (LPdislej) con el filtro $kc=0.1$, $\alpha=0.5$ a) y $kc=0.6$, $\alpha=0.2$ b)

En la Figura 15, se presentan los resultados del promedio de velocidad de vibración en función de la frecuencia en el plano de la fuente. Se observa que con $kc = 0.6$ y $\alpha=0.2$ los resultados son muy similares a los obtenidos con un acelerómetro, sin embargo, los valores obtenidos con el filtro $kc = 0.1$ y $\alpha=0.5$ presentan notables diferencias más influenciado a baja frecuencia. En la Figura 16 se observa ampliado el último caso. La tendencia es la misma que la de los filtros anteriores pero desplazada.

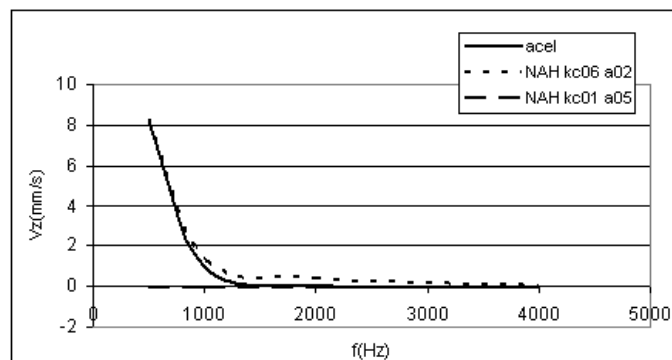


Figura 15. Vz en la fuente con el filtro $kc=0.1$, $\alpha=0.5$, el filtro $kc=0.6$, $\alpha=0.2$ y acelerómetro

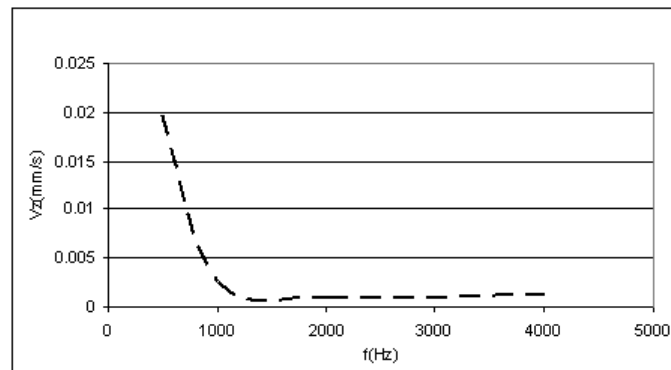


Figura 16. V_z en la fuente con el filtro a) $kc=0.1$, $\alpha=0.5$

Los parámetros del filtro $kc = 0.1$ y $\alpha=0.5$ proporcionan una mejor resolución y localización de la imagen en la superficie de la fuente. Sin embargo, para obtener valores reales fiables comparados con valores obtenidos con un acelerómetro resulta más aconsejable utilizar los parámetros $kc = 0.6$ y $\alpha=0.2$. Para igualar los valores de velocidad de vibración obtenidos con el filtro $kc = 0.1$ y $\alpha=0.5$ a los obtenidos con acelerómetro hay que multiplicar los valores por un factor 400, y se obtienen los resultados de la Figura 17.

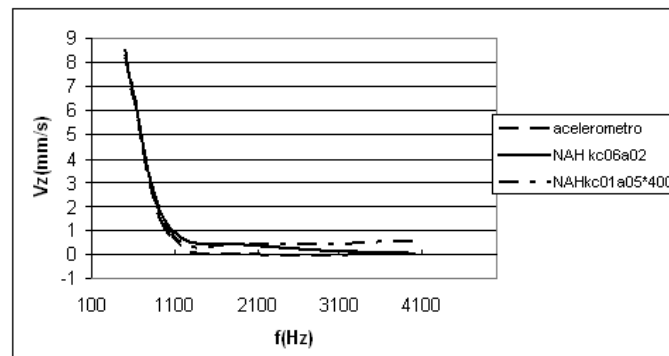


Figura 17. V_z en la fuente con el filtro $kc=0.1$, $\alpha=0.5$ multiplicado por un factor 400, el filtro $kc=0.6$, $\alpha=0.2$ y acelerómetro

CONCLUSIONES

Se han estudiado las combinaciones posibles de los parámetros fundamentales del filtro Wiener usado en NAH, el número de onda de corte y la pendiente, con el objetivo de obtener por un lado mejor resolución en las imágenes respecto a su localización, y por otro, valores fiables de promedio de velocidad de vibración comparados con medidas realizadas con un acelerómetro. El parámetro α muestra más influencia a frecuencias bajas. El parámetro kc presenta más influencia en el filtrado respecto al parámetro α .

Los valores del filtro $kc = 0.1$ y $\alpha=0.5$ proporcionan una mejor resolución y localización de la fuente sonora en la superficie de la fuente. Sin embargo, para obtener valores reales comparados con los resultados obtenidos con un acelerómetro resulta más aconsejable utilizar los parámetros $kc = 0.6$ y $\alpha=0.2$. El incremento de la predicción debe comprometerse con la reducción de la resolución en el plano de predicción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MAT2003-04068).

REFERENCIAS

- 1 J.D. Maynard, E.G. Williams, y Y. Lee, "Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **78**, N° 4, pp. 1395-1413, (1985).
- 2 E.G. Williams y H.D. Dardy, "Nearfield acoustical holography using an underwater, automated scanner", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **78**, N° 2, pp. 789-798, Agosto (1985).
- 3 E.G. Williams, "*Fourier Acoustics Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*", Ed. Academic Press, (1999).
- 4 E. Williams, "Numerical evaluation of the radiation from unbaffled, finite plates using FFT", *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. **74**, Julio (1983).
- 5 E.G. Williams, "Intensity vector field mapping with Nearfield Holography", International congress on recent developments in acoustic intensity measurements, CETIM, France, (1981).
- 6 E.G. Williams y J.D. Maynard, "Numerical evaluation of the Rayleigh integral for planar radiators using the FFT", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **72**, N° 6, pp. 2020-2030, Diciembre (1982).
- 7 W.A. Veronesi y J.D. Maynard, "Nearfield Acoustic Holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **81**, N° 5, pp. 1307-1322, Mayo (1987).
- 8 J. D. Maynard, E. G. Williams, "Nearfield Holography, a new technique for noise radiation measurement", Noise.Con 81. (1981)
- 9 T. Loyau, J. C. Pascal y P. Galliard, "Broadband acoustic holography reconstruction from acoustic intensity measurements. I: Principle of the method.", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **84**, pp. 1744-1750, (1988).
- 10 P. Grätz, "Acoustical Holography for visualization of sound fields", International Carpathian Control Conference ICC' 2002, Malenovice, Czech Republic, (2002).
- 11 S.M. Dumbacher, D.L. Brown y R.W. Bono, "Overview of acoustic array techniques for noise source identification", Inter.noise 98, pp. 1559-1564, (1998).
- 12 J. Hald, "Optimal interpolation of bad or non-existing measurement points in planar acoustical holography", Inter.noise 2000, (2000).
- 13 S. Ohshima, H. Houjoh y K. Umezawa, "A real-time 2-D Holographic Acoustic Measurement system for locating machinery noise sources", Inter.noise 98, pp. 1545-1548, (1998).
- 14 E. Escuder, J. Alba y J. Ramis, "Resistencia de radiación de altavoces planos", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **21**, N° 3, pp. 251-261, (2005).
- 15 M. Villot, G. Chaveriat y J. Roland, "Phonoscopy: An acoustical holography technique for plane structures radiating in enclosed spaces", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **91**, N° 1, pp. 187-522, (1992).
- 16 M. Villot, C. Guigou, L. Gagliardini, "Predicting the acoustical radiation of finite size multi-layered structures by applying spatial windowing on infinite structures", *Journal of Sound and Vibration* 245, 3, 433-455 (2001)

- 17 S.M. Dumbacher, D.L. Brown, J.R. Blough y J. R. Bono, "Practical aspects of making NAH measurements," Noise and Vibration Conference, Traverse City, Michigan, May 17–20, (1999).
- 18 T.H.M. Burns, "Measurement and visualization of instantaneous power flow in steady-state acoustic fields", UMI Dissertation Services, thesis, (1995).
- 19 K. Nam y Y. Kim, "Errors due to sensor and position mismatch in planar acoustic holography", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **106**, N° 4, Octubre (1999).
- 20 J.J. Lopez "Tratamiento Digital de imagen", Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, (2003).
- 21 R.C. González y R.E. Woods "Tratamiento digital de imágenes", Ed. Addison-Wesley/ Díaz de Santos, (1995).
- 22 S.I. Ohshima y H Houjoh, "A study of utilizing a hand 2-D microphone array for noise source localization based on the Near Field Holography", Inter Noise 2000 Nice, Francia, (2000).
- 23 L. Beranek, *Acoustics*, Acoustical Society of America, ISBN 088318494X, (1993).