

DETECCION DE FUENTES SONORAS MEDIANTE BEAMFORMING Y NEAR FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

Ronald J. O'Brien^a, Leonardo Molisani^a and Ricardo Burdisso^b

^a*Grupo de Acústica y Vibraciones (GAV), Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nac. N° 36 Km 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, e-mail: robrien@ing.unrc.edu.ar, lmolisani@ing.unrc.edu.ar.*

^b*Vibration and Acoustics Laboratories, 153 Durhan Hall, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 24061-0238, USA, rburdiss@vt.edu, <http://www.val.me.vt.edu>*

Palabras Claves: imágenes acústicas, beamforming, near field acoustic holography

Resumen. En las últimas décadas, la contaminación sonora se convirtió en un problema importante para la sociedad. Es por ello, que la industria ha aumentado sus esfuerzos para reducir la emisión de ruido. Para poder realizarlo, es importante localizar cuáles son las partes de las fuentes sonoras que mayor energía acústica emiten. Conocer los puntos de emisión es necesario para el control de las mismas y así poder disminuir el impacto acústico-ambiental.

Las técnicas de “Beamforming” y “Near-Field Acoustic Holography” (NAH) permiten obtener imágenes acústicas. Las mismas, se implementan mediante el uso de un arreglo de micrófonos ubicados a una distancia relativa de la fuente compleja emisora de ruido. Una vez adquiridos los datos experimentales se pueden obtener las ubicaciones y la magnitud de los principales puntos de emisión sonora. A su vez, permiten también localizar fuentes aeroacústicas y vibroacústicas por lo que son herramientas de propósito general, ya que usualmente este tipo de fuentes se encuentran en distintas bandas de frecuencias de emisión.

En este trabajo, se realizaron simulaciones para comparar las técnicas mencionadas. A partir de este estudio, se puede diferenciar qué método se debe utilizar de acuerdo a las características de las fuentes de ruido.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de “Imágenes acústicas” se utiliza ampliamente en la industria para la detección de fuentes sonoras. Estas permiten detectar la posición y frecuencia de una fuente de ruido. Este tipo de herramienta permite trabajar en el control de ruido, optimizar diseños aerodinámicos, etc.

Uno de los casos en los cuales se aplica la detección de ruidos es en aviones (Siller et al. 2010), turbinas de aviones y trenes de aterrizaje (Remillieux 2007), ya que debido al incremento de la población mundial en muchos casos los aeropuertos han quedado inmersos en medio de la ciudad produciendo gran contaminación sonora como lo muestra la Figura 1. Una aplicación muy interesante de optimización aerodinámica, es la reducción de ruidos por turbulencia en el desprendimiento del filo de un alabe de generadores eólicos (Oerlemans 2009).

Los aviones y cualquier tipo de vehículos producen ruido aerodinámico el cual depende de su velocidad, a este tipo de fuentes de ruido se la denomina aeroacústicas. Por ejemplo los trenes modernos (Lauterbach et al. 2010; Kitagawa 2007) superan fácilmente los 350 km/hr, a estas velocidades las fuentes aerodinámicas son las que prevalecen sobre otras fuentes de ruido como por ejemplo el ruido del motor. En general, el ruido del tráfico también es un problema para residentes que viven cerca de autopistas o inclusive dentro de la misma ciudad.



Figura 1: Aeropuerto de Kai Tak en China.

Una de las técnicas más aplicadas para la detección de fuentes aeroacústicas (Brooks et al. 2004) es el método de “Beamforming” el cual basa en el modelado de campo lejano. Antes de la década del 80, el procesamiento del arreglo de micrófonos se realizaba a través de la técnica denominada retardo y suma. Tras el paso de los años y los avances computacionales el procesamiento básico de retardo y suma se transformó en la técnica de “Beamforming”. Este método es ampliamente aplicable si la distancia entre la fuente y el arreglo de sensores de presión es de al menos unas cuantas longitudes de onda, esta longitud de onda está asociada a la frecuencia a la cual se reconstruye el mapa de ruido.

Hasta aquí se hablo de fuentes aeroacústicas, para el caso de fuentes vibroacústicas se puede lograr una mejor resolución del mapa de ruido colocando el arreglo de micrófonos en el campo cercano de la fuente de ruido, ya que se captan también las ondas evanescentes de la fuente. Debido a que la técnica Beamforming no tiene un buen comportamiento para la detección de fuentes de ruido vibrando a baja frecuencia, se utiliza una técnica denominada “Near-Field Holography” (NAH), esta fue desarrollada

por Maynard, Williams y Veronesi basados en un estudio previo realizado por Graham (Maynard et al. 1985; Veronesi y Maynard 1987). Contrario al desarrollo de Graham, el modelo desarrollado por Maynard, Williams y Veronesi describe el campo de sonido cerca de la fuente. Este modelo es usado en problemas inversos, haciendo posible visualizar características de la fuente que son mucho más pequeñas que la longitud de onda acústica si los sensores son ubicados cerca de la fuente. El foco fundamental de su trabajo es sobre problemas planos de acústica inversa, donde la fuente y el campo de ruido son paralelos y su método es llamado “Planar Near field Acoustic Holography” (PNAH).

En este trabajo se realizará una comparación de los métodos mencionados, para ellos se efectuarán simulaciones. Para realizar estas simulaciones se generaron diferentes campos de presión acústica, esta presión acústica es captada por los sensores de presión, la intensidad y fase de la señal dependen de la ubicación de los sensores de presión. Para el caso de Beamforming se utilizó una distribución optimizada mediante algoritmos genéticos de 35 micrófonos (O’Brien et al. 2011). Esta antena tiene la capacidad de reducir los lóbulos laterales. Por otra parte, la técnica de NAH necesita de una distribución regular de micrófonos. La utilizada en este trabajo es de 121 micrófonos distribuidos en una grilla de 80 x 80 cm. Ambas distribuciones de micrófonos se observan en la Figura 2.

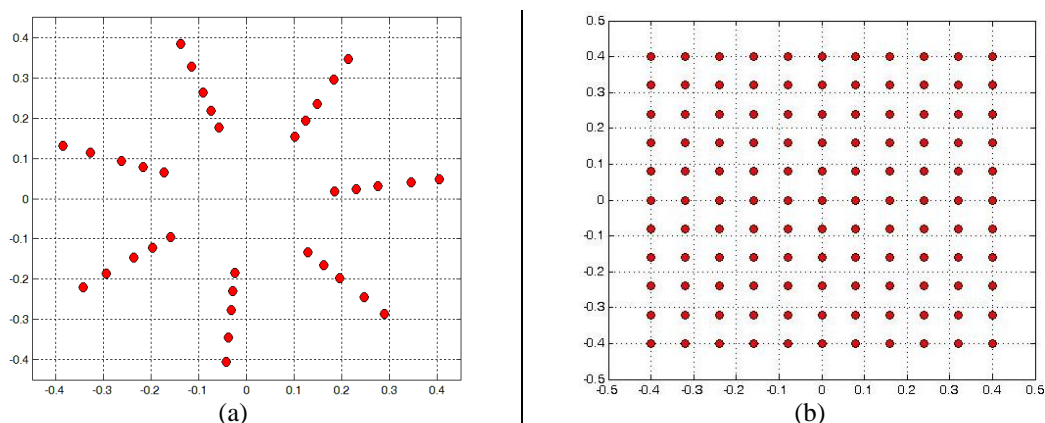


Figura 2: (a) Distribución de 35 micrófonos optimizada mediante GA. (b) Distribución regular de 121 micrófonos

2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE “BEAMFORMING”

Para utilizar la técnica de Beamforming se genera una grilla de puntos distribuidos regularmente en el espacio los cuales encierran la fuente de ruido a analizar. En cada punto de la grilla se supone que la emisión de ruido es la de un monopolo.

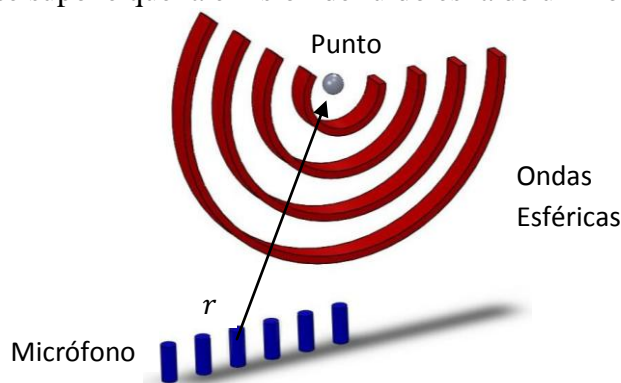


Figura 3: Esquema de la medición de un arreglo lineal con respecto a un punto de la grilla.

El objetivo es calcular la presión acústica en un punto n de la grilla, esto se logra conociendo la ubicación de los micrófonos y la del punto n a considerar, como se observa en la [Figura 3](#).

En campo libre las fuentes monopolo se comportan de acuerdo a las funciones de Green (Ec. (1)), estas se utilizan para formar el vector de propagación

$$C_m(x_n) = \frac{e^{-ikr_m}}{4\pi r_m} = \frac{e^{-ik|\vec{r}_n - \vec{r}_m|}}{4\pi |\vec{r}_n - \vec{r}_m|} \quad (1)$$

En la cual r_m es la distancia Euclidea desde el micrófono m hasta el punto de la grilla n . Para maximizar la salida del Beamforming, el vector de propagación es elegido paralelo al vector dirección.

$$\vec{w} = \frac{\vec{C}}{\|\vec{C}\|} \quad (2)$$

La salida del Beamforming del arreglo de micrófonos.

$$B_n(r, f) = \frac{w_n^\dagger \text{CSM} w_n}{M^2} \quad \text{con } \dagger: \text{Hermitiano} \quad (3)$$

Donde CSM representa la matriz espectral cruzada ("Cross Spectral Matrix"). La matriz espectral cruzada contiene los aportes de cada uno de los micrófonos en el dominio de la frecuencia. La matriz se define de la siguiente manera

$$\text{CSM}_{ij} = \frac{p_i(f)p_j^*(f)}{2} \quad (4)$$

$$\text{CSM}_{ii} = \frac{p_i(f)p_i^*(f)}{2} \quad (5)$$

La matriz dada por la Ec. (5) contiene el auto espectro de las señales y la Ec. (4) contiene el espectro cruzado fuera de la diagonal principal. Luego, cada punto de la grilla es evaluado con la Ec. (3), si en el punto se encuentra la fuente sonora, las señales de los micrófonos funcionan aditivamente, en cambio si no se encuentra la fuente en ese punto las señales se suman destructivamente.

Este proceso se repite para distintos planos en el espacio tridimensional y para las líneas espectrales del rango de frecuencias de interés. De esa forma se obtienen una lista de valores que al graficarlos nos permiten observar el mapa de ruido de la zona en unidades de energía. Y cuantitativamente los puntos de emisión de ruido son ubicados y caracterizados. Para mayor detalle de la técnica consultar [Ravetta et al. \(2004\)](#).

3 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE “NEAR FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY”.

El método de “Near Field Acoustic Holography” se comenzó a desarrollar en los principios de los años '90. La Figura 4 muestra una descripción esquemática de los pasos a realizar para la obtención de la distribución de las fuentes de ruido en el plano deseado.

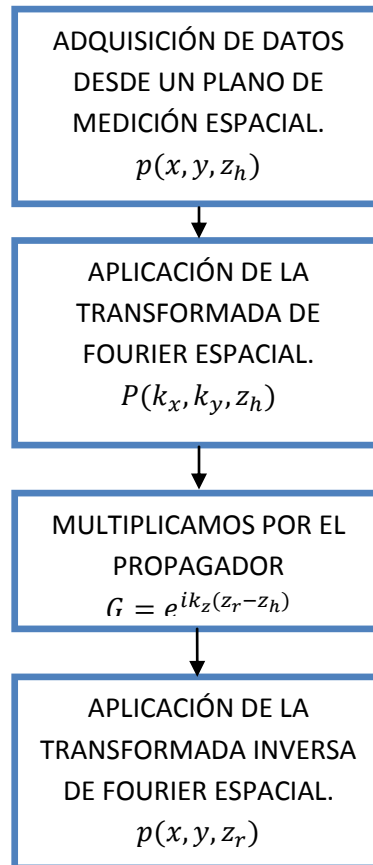


Figura 4: Esquema del método de NAH.

El método NAH utiliza la medición de la presión acústica en un plano, el cual denominaremos z_h , para poder reconstruir el campo de presiones en otro plano cualquiera denominado z_r . El plano que contiene la fuente sonora lo llamaremos z_s . Entonces si conocemos la presión en el plano z_h podemos calcular la presión en cualquier otro plano a través de,

$$P(k_x, k_y, z_r) = P(k_x, k_y, z_h) e^{ik_z(z_r - z_h)} \quad (6.a)$$

Donde, $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2$

$$G(k_x, k_y, z_r - z_h) = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \\ -i\sqrt{-k^2 + k_x^2 + k_y^2} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (6.b)$$

La Ec. (6) representa uno de dos casos posibles, el primero se utiliza en el caso que $z_r \geq z_h$ por lo tanto los planos a reconstruir se alejan de la fuente de ruido. Para el caso en que $z_s < z_r < z_h$, Ec. (7), se utiliza para reconstruir planos entre la fuente de ruido y

el plano de medición. Se deben tener en cuenta las ondas evanescentes de la fuente de ruido, en este caso se resolverá un problema inverso en comparación con el primer caso que se resuelve un problema directo.

$$P(k_x, k_y, z_r) = P(k_x, k_y, z_h) e^{-ik_z(z_h - z_r)} \quad (7.a)$$

$$G(k_x, k_y, z_r - z_h) = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \\ i \sqrt{-k^2 + k_x^2 + k_y^2} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (7.b)$$

Luego, se determina la presión en el dominio espacial a través de la transformada inversa de Fourier.

$$p(x, y, z_r) = \mathcal{F}_x^{-1} \mathcal{F}_y^{-1} [P(k_x, k_y, z_h) e^{-ik_z(z_h - z_r)}] \quad (8)$$

4 RESOLUCION NEAR FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY VS. BEAMFORMING CONVENCIONAL.

En primera instancia se definirá la resolución de un mapa acústico, por esto se entiende la habilidad de poder distinguir dos fuentes de ruido que están cerca una de otra. Cuando se focaliza en el campo lejano la resolución se define como el mínimo ángulo que separa a dos fuentes. En cambio cuando se aplica esta técnica en el campo cercano la resolución se define como la distancia mínima que separa dos fuentes (Christensen y J. Hald 2004).

4.1 TECNICA DE BEAMFORMING

La resolución de la técnica de beamforming está dada por la Ec. (9).

$$R = \frac{z \alpha \lambda}{D} \quad (9)$$

Donde z es la distancia desde el arreglo de micrófonos hasta el plano donde queremos evaluar el nivel de ruido, λ es la longitud de onda de la frecuencia a la cual se va a evaluar el ruido, D es el diámetro del arreglo de micrófonos y α tiene un valor de 1.22 para una apertura circular y de 1 para una apertura lineal (Christensen y J. Hald 2004).

Esta técnica permite detectar la posición y frecuencia de una fuente sonora con buena resolución en un cierto rango de apertura. Desde el centro del arreglo de micrófonos existen 30° grados de apertura en la dirección positiva y negativa. La apertura usada en el arreglo bidimensional se muestra en la Figura 5.

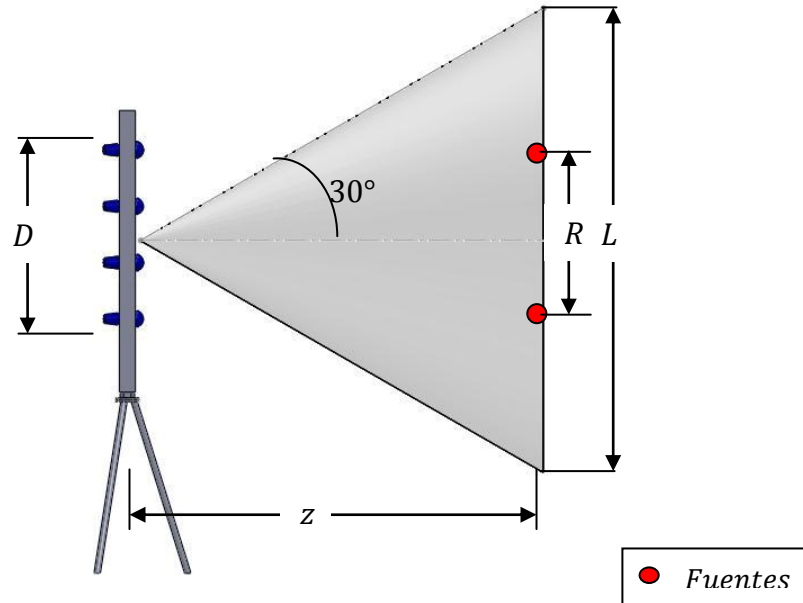


Figura 5: Cobertura de la distribución de micrófonos con buena resolución a una distancia z .

Por lo tanto la expresión que permite calcular el diámetro de apertura en función de la distancia a la cual se obtiene el mapa de ruido es:

$$L = 2 \tan 30^\circ, \quad L = 1,15 z \quad (10)$$

4.2 TECNICA NEAR FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

De acuerdo con el procesamiento digital de señales para poder reconstruir una señal a través de datos adquiridos se utiliza el criterio de Nyquist. Utilizando este concepto, la resolución de la técnica NAH está dada por la distancia mínima que separa dos sensores de presión, esto nos permite definir el máximo número de onda, k_{max} , que la técnica es capaz de reconstruir.

$$k_{max} = \frac{2\pi}{\lambda_{min}} = \frac{\pi}{\Delta x} \quad (11)$$

Por lo tanto la resolución de la técnica es:

$$R_{max} = \frac{\lambda_{min}}{2} = \Delta x \quad (12)$$

Donde Δx es la distancia mínima que separa dos micrófonos.

En comparación con la técnica de Beamforming la técnica de NAH utiliza la información de las ondas evanescentes obtenidas en el campo cercano. Esto permite incrementar la resolución del mapa de ruido.

Según [Scholte y Roozen \(2004\)](#) al reducir la distancia entre la fuente de ruido y la antena de micrófonos aumenta la resolución de la técnica. La resolución también aumenta si el rango dinámico de las mediciones es alto.

Una distribución regular de micrófonos, tiene asociadas frecuencias máximas y mínimas de reconstrucción del mapa de ruido. La distancia entre dos micrófonos se asocia con la mitad de la longitud de onda de la frecuencia máxima y el ancho del arreglo está asociado con la mitad de la longitud de onda de la frecuencia mínima. Por

lo tanto la distribución utilizada en este trabajo se muestra en la [Figura 2\(b\)](#) y tiene asociada una frecuencia máxima de 2143.8 Hz y mínima de 214.4 Hz.

Ventajas de la técnica de NAH en comparación con Beamforming:

- Muy buena resolución a baja frecuencia, como se comentó en la introducción esto se utiliza generalmente para fuentes vibroacústicas.
- La resolución no depende de la frecuencia. Solo de la distancia entre los micrófonos.
- Esta técnica permite reconstruir el campo de presiones, el campo de velocidades como así también la intensidad sonora y la potencia sonora.
- La reconstrucción del mapa de ruido se realiza en verdaderas magnitudes, en cambio beamforming reconstruye en magnitudes relativas al tamaño del mapa de ruido.

Desventajas de la técnica de NAH en comparación con Beamforming:

- La antena debe cubrir el tamaño de la fuente sonora, por la tanto al momento de analizar una maquina de gran tamaño requiere muchas mediciones. La antena usada en beamforming puede ser más chica que la fuente de ruido.
- Se debe estar cerca de la fuente sonora para poder captar las ondas evanescentes, esto perjudica en situaciones donde no se puede acercar la antena hasta la fuente.
- La resolución no cambia con la frecuencia, pero a mayor frecuencia se necesitan mayor cantidad de mediciones para lograr una buena reconstrucción del mapa de ruido.

5 SIMULACIONES CON NAH Y BEAMFORMING.

Se comenzará con las fuentes tipo monopolos desde una frecuencia de 125 Hz hasta una de 8000 Hz para testear ambas técnicas, se destaca que la distribución de micrófonos utilizada para NAH se utiliza en el rango de frecuencias anteriormente descrito. La amplitud del monopolo es de 94 dB ref. $20\mu\text{Pa}$. y se ubicó en las coordenadas $(x,y,z) = (0,0,0)$ m. Como se observa en la [Figura 6](#) la antena de NAH se ubicará a 0.02 m de la fuente monopolo y la antena que se utilizará para realizar "Beamforming" se colocó a 1 m de distancia de la fuente.

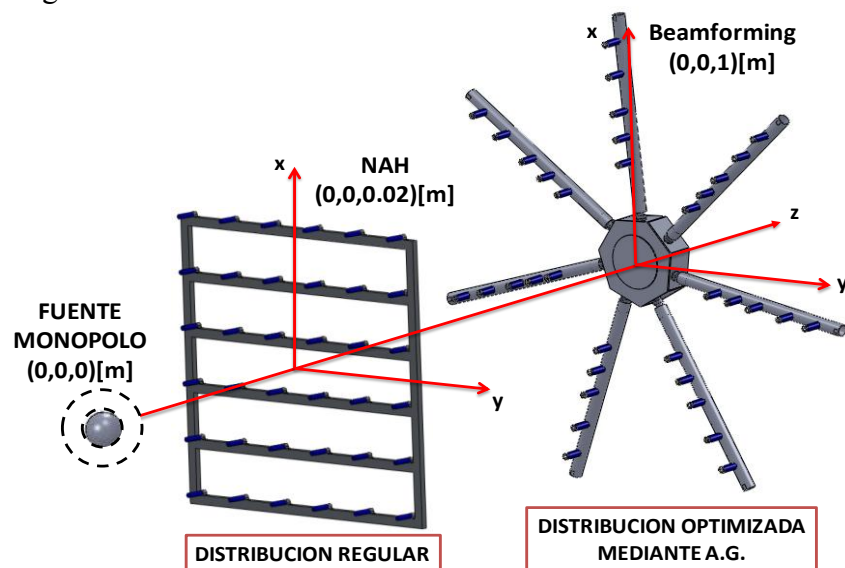
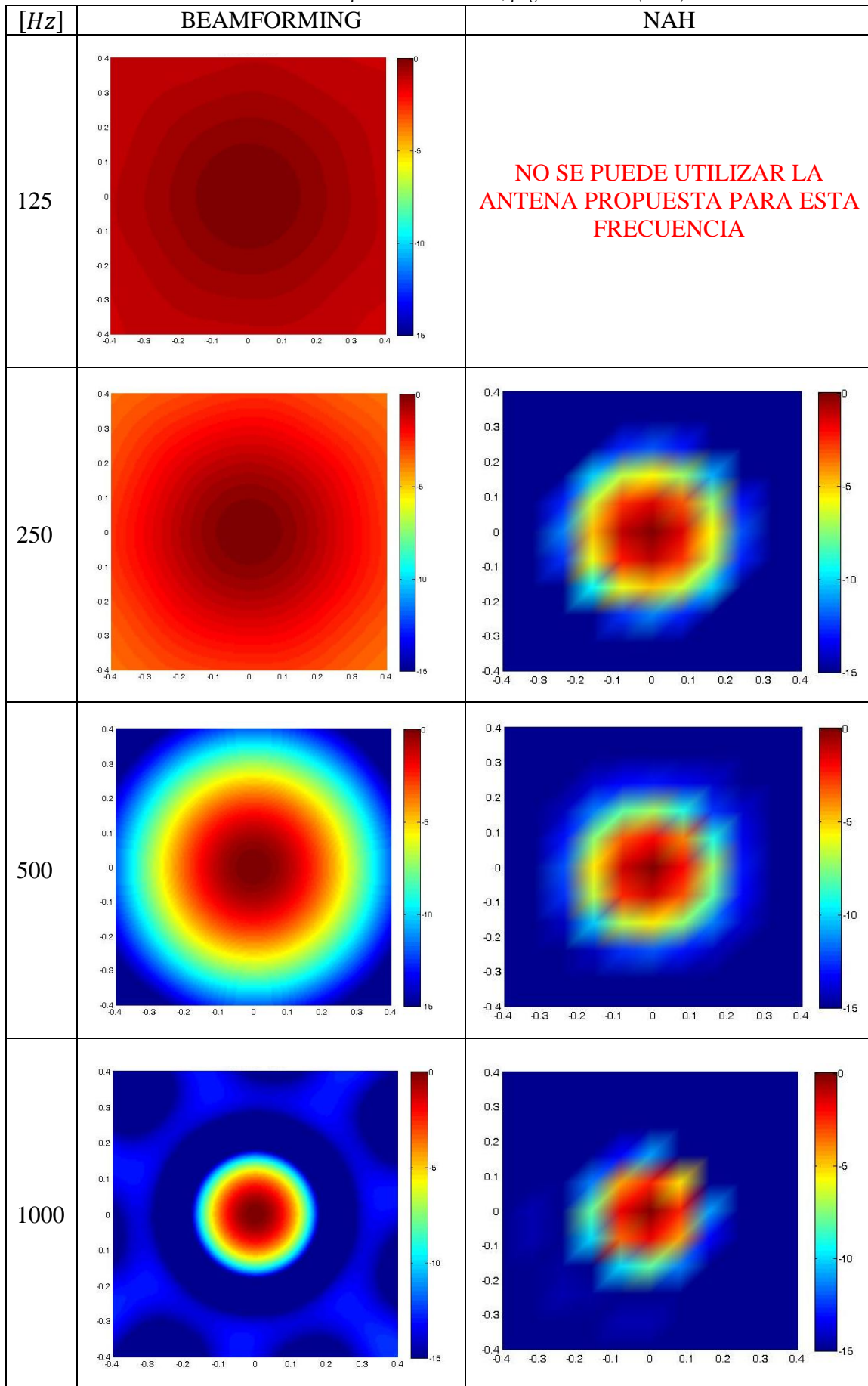


Figura 6: Esquema de las diferentes posiciones de la antena utilizada mediante NAH y mediante Beamforming.



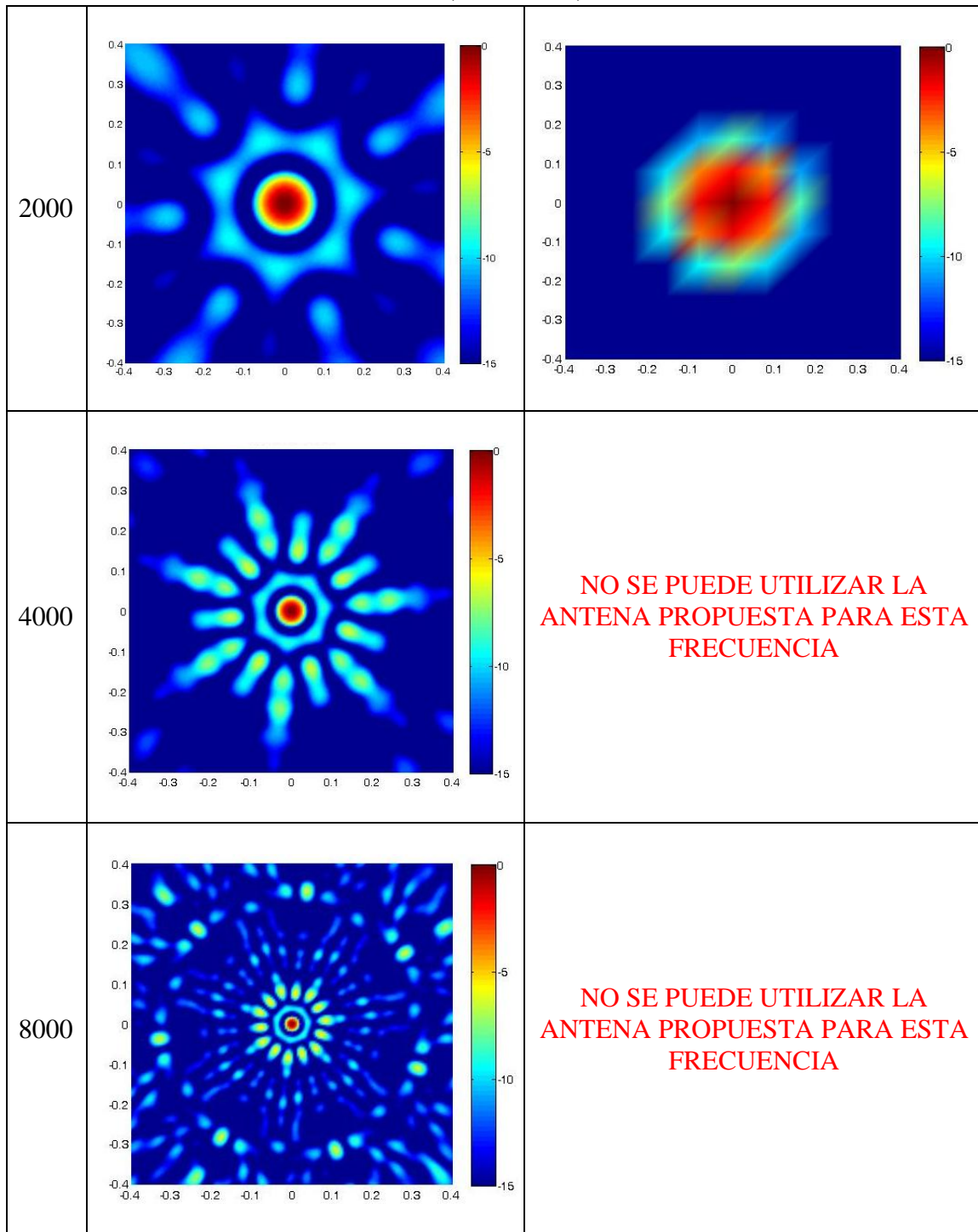


Figura 7: Beamforming vs. NAH – Fuentes Monopolo.

Se observa en la [Figura 7](#) que la técnica de NAH, a baja frecuencia, tiene la capacidad de distinguir fuentes sonoras en comparación con la técnica de Beamforming la cual no puede lograr este cometido. La técnica de Beamforming se **comporta** mejor a alta frecuencia, ya que la resolución es directamente proporcional a la frecuencia de reconstrucción del mapa de ruido. Un aspecto importante a tener en cuenta, es el tamaño de grilla que se puede utilizar, NAH necesita mayor cantidad de puntos de medición para poder reconstruir el mapa, en este caso se utilizaron 121 puntos de medición en un área de 80 x 80 cm. Por el contrario se utilizó 35 puntos de medición para un mismo

tamaño de grilla, una ventaja importante de beamforming con respecto a NAH se centra en la cantidad de mediciones requeridas para cubrir un área grande.

En el caso de las fuentes dipolos se realizaron simulaciones desde una frecuencia de 125 Hz hasta una de 8000 Hz. En la figura se observan dos casos, 500 Hz y 2000 Hz para comparar los resultados de NAH vs. “Beamforming”.

El centro del dipolo se colocó en las coordenadas $(x,y,z) = (0,0,0)$ m la distancia entre ellos es de 20 cm. La antena de NAH se colocará nuevamente a 2 cm de la fuente dipolo y la antena que se utilizará para realizar “Beamforming” se colocó a 1 m de distancia de la fuente.

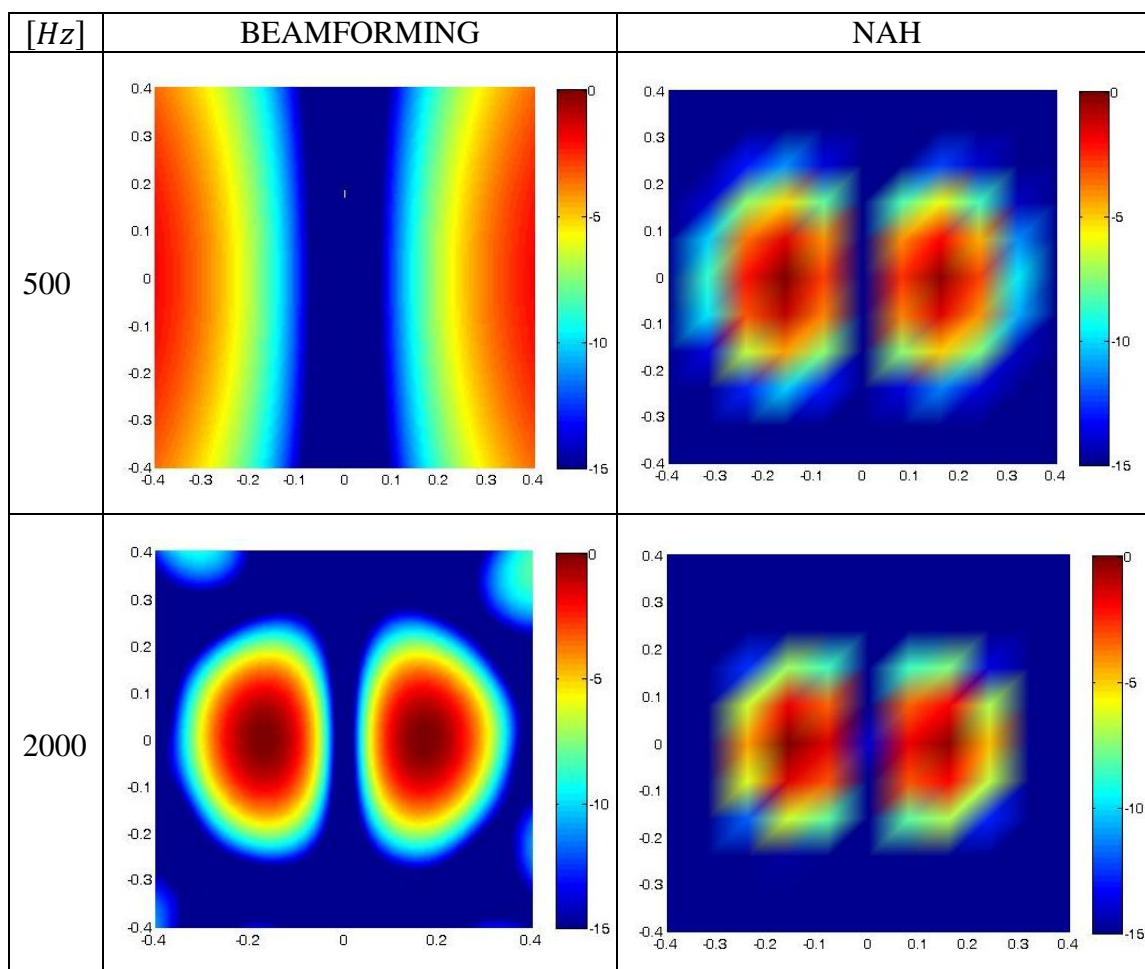


Figura 8: Beamforming vs. NAH – Fuentes Dipolo.

En la Figura 8 se observa que a 500 Hz la técnica de Beamforming no puede distinguir con exactitud la localización de la fuente de ruido en contraste con la técnica de NAH la cual alcanza a distinguir las fuentes de ruido y su localización. A mayor frecuencia, en este caso 2000 Hz ambas técnicas pueden detectar las fuentes de ruido. Si quisiéramos reconstruir el mapa de ruido, por ejemplo de un dipolo a 4000 Hz no podríamos utilizar la distribución de NAH, deberíamos aumentar la cantidad de mediciones para no perder información.

6 CONCLUSIONES

Se concluye que, para reconstruir mapas de ruido a baja frecuencia la técnica más eficiente es NAH debido a su capacidad de resolución. En caso de que las fuentes sonoras se encuentren a alta frecuencia la técnica de “Beamforming” se comporta

mejor, ya que esta tiene mejor resolución. Mediante NAH se puede reconstruir mapas de campo de velocidad, intensidad de sonido, etc. En cambio con beamforming no se puede lograr este cometido.

Con respecto al arreglo de micrófonos, NAH debe tener una distribución regular de los sensores de presión, en cambio "Beamforming" puede tener una distribución irregular. En caso de realizar mediciones de gran tamaño, la técnica de NAH debe cubrir un tamaño mayor que la fuente sonora a medir, en cambio con Beamforming la antena de micrófonos puede ser más chica que la fuente de ruido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación aportada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT) – Código del Proyecto 2183. También al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET).

REFERENCIAS

- H. Siller, M. Drescher, G. Saueressig, R. Lange, "Fly-over source localization on a Boeing 747-400" *Berlin Beamforming Conference*, February 2010.
- Marcel Remillieux, "Aeroacoustic study of a model-scale landing gear in a semi-anechoic wind-tunnel" *Master Thesis University of Virginia Tech*, March 2007.
- Stefan Oerlemans." Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines" *PhD. Thesis University of Twente*, September 2009
- Andreas Lauterbach, Klaus Ehrenfried, Stefan Kröber, Thomas Ahlefeldt and Sigfried Loose, "Microphone array measurements on high-speed trains in wind tunnels" *Berlin Beamforming Conference*, February 2010.
- Toshiki Kitagawa, "Investigation into inconsistencies between theoretical predictions and microphone array measurements of railway rolling noise" *PhD. Thesis University of Southampton*, December 2007.
- Thomas F. Brooks, William M. Humphreys, Jr. "A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays", *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK*, May 10-12, 2004.
- J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee. "Nearfield acoustical holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH". *Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4):1395–1413, 1985.
- W. A. Veronesi and J. D. Maynard. "Nearfield acoustical holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation". *Journal of the Acoustical Society of America*, 81(5):1307–1321, 1987.
- Ronald J. O'Brien, Leonardo Molisani y Ricardo Burdisso "Optimización del rango dinámico de antenas acústicas" *III Congreso de matemática aplicada, computacional e industrial*. Bahía Blanca 2011.
- Patricio A. Ravetta, Ricardo A. Burdisso and Wing F. Ng , "Phased array technology development at Virginia Tech: Application to landing gear noise source identification", *Mecánica Computacional Vol. XXIII Bariloche, Argentina*, Noviembre 2004.
- J.J. Christensen and J. Hald, "Beamforming", *Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement A/S*, 2004.
- Rick Scholte and N.B. Roozen, "High resolution near field acoustic holography" *Proceedings of the Eleventh International Congress on Sound and Vibration*, 5-8 July 2004