

## DISEÑO DE ARRAY MICROFÓNICO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS PARA LOCALIZACIÓN DE FUENTES ACÚSTICAS.

PACs.: 43.60.Jn. 43.28.Hr

Machín, Jorge; Arana, Guillermo; San Martín, Ricardo; Arana, Miguel  
Institución: Universidad Pública de Navarra. Laboratorio de Acústica. Dpto. de Física.  
Dirección: Campus de Arrosadía, s/n. 31008.  
Población: Pamplona. Navarra.  
País: España  
Tel: 948 169568  
Fax: 948 169565  
E-Mail: [marana@unavarra.es](mailto:marana@unavarra.es)

### ABSTRACT

In this paper, the first results obtained by the Acoustics Group at the Public University of Navarra in the implementation and development of a microphone array as well as in corresponding software for noise sources localization (beamforming) are presented. Although the small experimental system limits the accuracy of the experimental results in complex situations, the results are very promising. The experimental setup, calibration of the array (level and phase), implemented algorithms and results of the first localization tests are discussed.

### RESUMEN

En esta comunicación se presentan los primeros resultados obtenidos por el grupo de Acústica de la Universidad Pública de Navarra en el desarrollo y puesta a punto de un array microfónico y software asociado para localización de fuentes acústicas (beamforming). Aunque el reducido sistema experimental limita la precisión de los resultados en situaciones experimentales complejas, los resultados obtenidos son muy prometedores. Se expone en la presente comunicación la puesta a punto del dispositivo, calibración de nivel y fase del array, algoritmos implementados y los resultados obtenidos en las primeras pruebas de localización de fuentes acústicas.

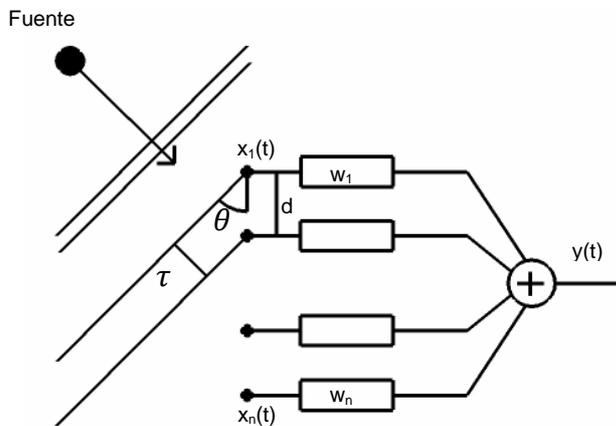
### INTRODUCCIÓN

Desde los trabajos pioneros en la localización de fuentes acústicas [1] la técnica del beamforming se ha desarrollado muy rápidamente gracias a la disponibilidad de una mayor velocidad (y potencia) en la adquisición de datos así como el rápido desarrollo del hardware y software de computación. Actualmente, la técnica es básica para analizar fuentes móviles: aviones, trenes, helicópteros, aerogeneradores,..). El desarrollo histórico de la técnica puede verse en las referencias [2].

Dentro de la técnica de beamforming existen múltiples algoritmos [3], [4]. A continuación describimos brevemente dos de los más conocidos.

### DAS (Delay And Sum)

La localización de fuentes de ruido mediante el método retardo y suma (Delay And Sum, DAS) es, conceptualmente, muy sencilla (Fig. 1). Todos los micrófonos registran a la vez, y se aplica un retardo a cada una de las señales registradas en función del ángulo de incidencia, para posteriormente sumar todas las señales, coincidiendo el ángulo de incidencia con aquel en el que la energía de la señal resultante sea máxima. Debido a que la formación de haz opera en el campo lejano, las ondas sonoras son tratadas como planas. El DAS se aprovecha de este retardo en la propagación de las ondas de sonido entre varios micrófonos para calcular dónde se originó el sonido (localización angular) desde el frente de la matriz de micrófonos.



$$x(t) = [x(t - \tau_1), \dots, x(t - \tau_n)]^T$$

El retardo temporal entre micrófonos viene dado por:

$$\tau_n = \frac{(n-1)d \cos\theta}{c}$$

En forma matricial la salida de la localización se representa como:

$$y(t) = W^H x(t)$$

Fig. 1. Esquema del algoritmo DAS.

### DAS en el dominio frecuencial.

El algoritmo DAS que trabaja en el dominio temporal es simple, aunque su estimación del ángulo de llegada es pobre; además, depende en gran medida del ruido de fondo. Para solucionar todos estos problemas se usa el dominio frecuencial, por lo que los retardos temporales ( $\tau_n$ ) se traducen en desplazamientos en la fase (exponenciales).

El array de señales registradas, en el dominio frecuencial, puede expresarse como:

$$X(\omega) = X(\omega)s(\omega, \theta)$$

Donde  $X(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $x(t)$  y  $s(\omega)$  es el vector de direcciones (steering vector).

$$s(\omega, \theta) = e^{-j\omega[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]}$$

En forma matricial la salida de la localización, en banda estrecha, puede representarse como:

$$Y(\omega) = s(\omega)^H X(\omega)$$

Este algoritmo, al igual que en el DAS en el dominio temporal busca aquel (o aquellos) ángulos en los que la energía de la señal resultante sea máxima.

Además de los algoritmos antes mencionados, hemos implementado otros algoritmos como el MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) [5] y el MUSIC (Multiple Signal Classification) [6]. Un buen resumen de otros algoritmos puede verse en la bibliografía [7].

## IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

### Dispositivo experimental:

Se trata de una primera aproximación al problema, con un reducido sistema experimental el cual limita la precisión de los resultados en situaciones experimentales complejas, aunque los resultados obtenidos han sido prometedores en situaciones controladas.

Dicho sistema experimental consta únicamente de 8 micrófonos G.R.A.S tipo A40. Para el registro de las señales de presión se utilizó el software LabView con un módulo de adquisición COMPACTDAQ de National Instruments.

### Calibración

Con el objetivo de analizar el dispositivo de medida, tanto en nivel como en fase, se realizó una verificación de los distintos canales del equipo, con el fin de conocer la sensibilidad de cada uno de los micrófonos y el posible desfase entre ellos. En esta prueba se utilizó un calibrador B&K tipo 4230, con el que se obtuvo las sensibilidades de cada uno de los micrófonos mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Sensibilidad de los micrófonos.

| Mic. nº  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S(mV/Pa) | 12,16 | 13,00 | 13,58 | 11,00 | 13,51 | 11,74 | 13,12 | 13,26 |

Tal y como se observa en la Tabla 1, cada uno de los micrófonos tiene una sensibilidad distinta, por lo que deberemos ser minuciosos con el orden y el etiquetado de esta instrumentación.

Como es conocido, los micrófonos de presión pueden responder de distinta manera bien con fase positiva, bien con negativa, ante la llegada de un frente de onda (sobrepresión). Para el cálculo de niveles sonoros y análisis espectral de la señal, no es una cuestión de mayor importancia que sea una u otra. Sin embargo, en el caso de localización de ruidos es importante que no existan desfases entre los diferentes micrófonos.

Al no disponer de sistema de calibración de fase para los micrófonos, se realizaron pruebas controladas con señales pseudoimpulsivas (petardos), fuentes que han mostrado buenos resultados en múltiples aplicaciones [8]. Se eligió este tipo de fuente debido a que son bastante omnidireccionales o, equivalentemente, muy poco directivas. Para ello, se hicieron explotar varios petardos y se registraron las señales en diferentes posiciones y configuraciones del array microfónico. Todas las pruebas se llevaron a cabo en condiciones de campo abierto (en una zona ajardinada).

La impulsividad de las señales utilizadas permite separar muy bien el sonido directo y posteriores reflexiones. Además, la absorción del suelo (también separable en los registros) es bastante alta. El array microfónico estaba colocado sobre una plataforma, de madera de 1,2 metros de diámetro, apoyada en el suelo. Se utilizó este dispositivo de acuerdo con la norma IEC 61400-11 [9].

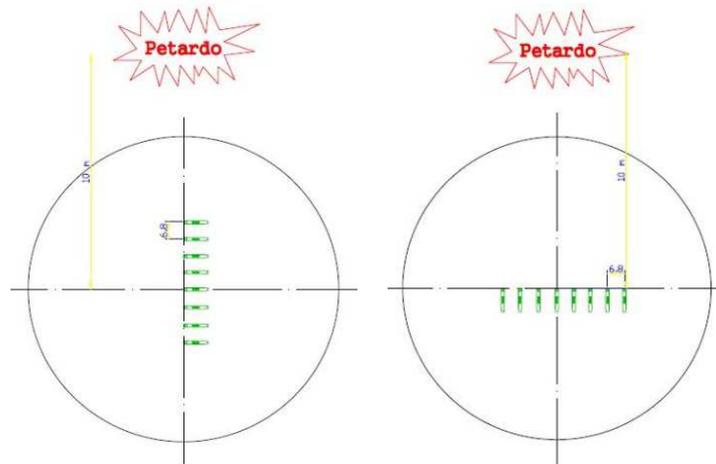


Fig.2. Distancia desde la fuente al array micrófonico y disposición de éste (distancia entre micrófonos: 6,8 cm)

Para la primera disposición del array (Fig. 2 izq.) se hicieron explotar dos petardos a una distancia de 10 m del micrófono más próximo (10,48 m, aproximadamente, del más alejado) mientras se registraba la señal. Análogamente, se hicieron explotar dos petardos a una distancia de 10 m del micrófono más próximo (el central) para la segunda disposición del array (Fig. 2. dcha).

Dado el gran número de datos, se programó un libro en Excel para automatizar la búsqueda de la señal impulsiva, la selección de muestras a representar, la representación gráfica (tanto en voltaje como en NPS, teniendo en cuenta la corrección por la calibración individual de cada micrófono), la diferencia en número de muestras entre máximos, etc.

La Fig. 3. muestra en nivel sonoro en dB (ref. 20  $\mu$ Pa) tras corregir los voltajes medidos por la sensibilidad de cada micrófono obtenida anteriormente. Como se observa, los niveles son prácticamente iguales para los ocho canales, las diferencias son inferiores a 0,2 dB en cada uno de los casos.

Lo importante, para el objetivo de este apartado, es el desfase entre los micrófonos. La disposición experimental (separación de 68 mm entre los micrófonos) implicaba una separación, en muestras, de  $\frac{6,8 \cdot 10^{-2}(m) \cdot 100.000(muestras \cdot s^{-1})}{340(m \cdot s^{-1})} = 20(muestras)$

Como muestra la Fig. 3, la separación entre máximos es de, exactamente, 20 muestras. Si bien los resultados mostrados no constituyen una calibración standard de la fase (para cada frecuencia) entre los 8 micrófonos, los resultados encontrados en estas medidas bien controladas indican que los micrófonos no difieren en más de 3,6° (para una frecuencia de 1KHz), en su fase:

$$\frac{2\pi(rad) \cdot 1000(s^{-1})}{100.000(muestras \cdot s^{-1})} = \frac{\pi}{50}(rad) = 3,6^\circ$$

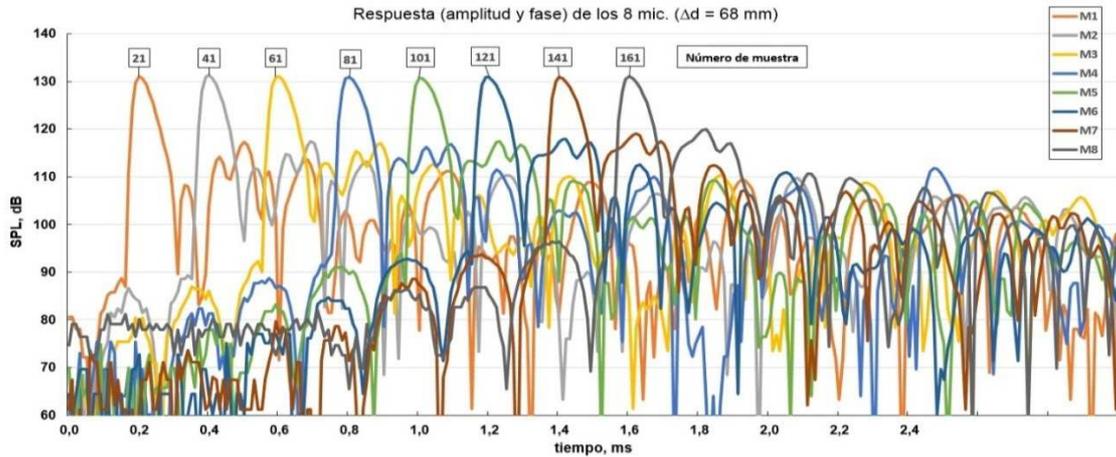


Fig. 3. Registros temporales (NPS) para el primer petardo en la primera configuración del array de micrófonos.

Para la segunda disposición (ver Fig 2. dcha), con el array perpendicular a la línea que une el centro del array con la fuente pseudoimpulsiva, se obtuvieron los niveles de presión sonora mostrados en la figura 4. En este caso, la diferencia de caminos entre la fuente y el micrófono más alejado y entre la fuente y el micrófono más próximo, es de 2,832 mm, por lo que no cabía esperar separación, ni siquiera de una muestra, entre los máximos de la señal, como así se observa en la gráfica. Por otra parte, la apertura angular del array, desde la fuente es 1,37°, por lo que tampoco cabía esperar diferencias de nivel, hecho que también se cumple. Cumpliendo una de las premisas básicas del beamforming, que la fuente se sitúe lo suficientemente lejos para que las ondas se puedan considerar planas.

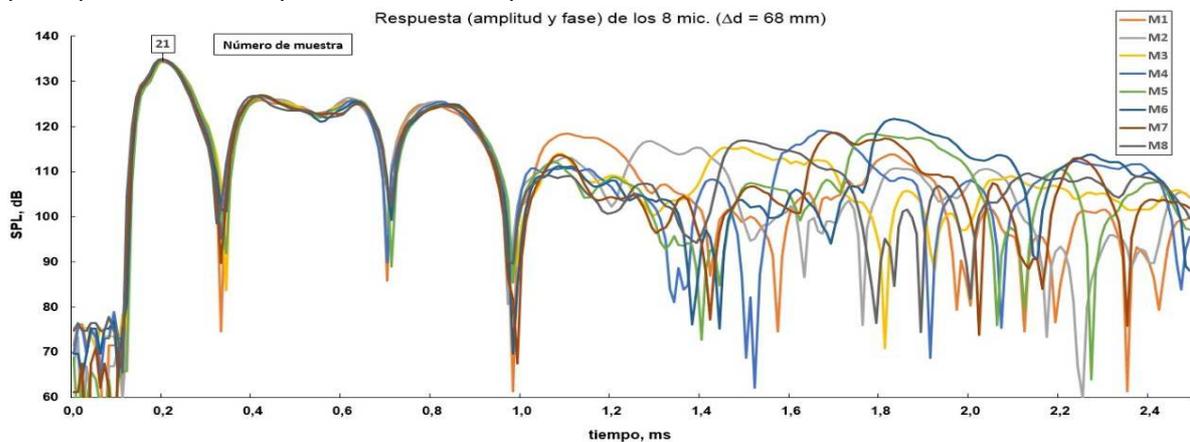


Fig.4. Registros temporales (NPS) para el primer petardo en la segunda configuración del array de micrófonos.

## RESULTADOS

Tras la calibración del sistema de medida, se realizaron algunas medidas con distintas configuraciones tanto de disposición del array como de las fuentes emisoras. A su vez, también se realizaron varias simulaciones con las mismas configuraciones de las medidas.

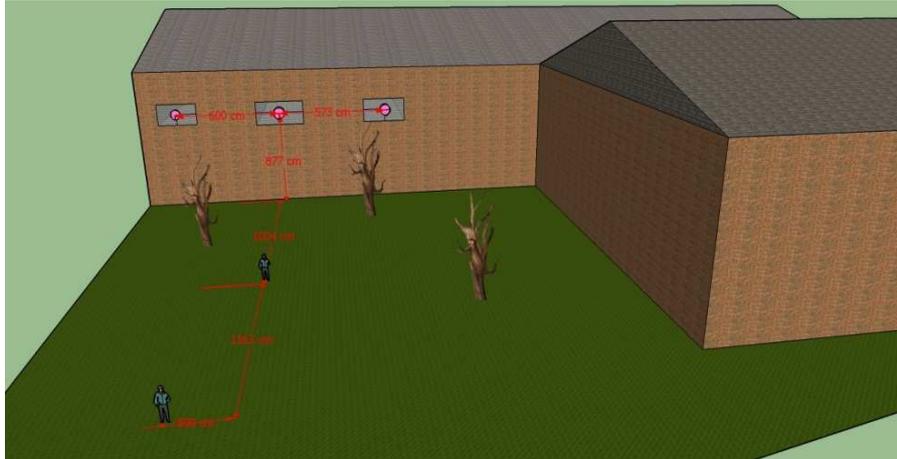


Fig.5. Representación espacial de las fuentes/altavoces (en rosa) y los arrays (personas) con sus distancias.

En la tabla 2 podemos observar el resultado de las simulaciones y de las mediciones para distintos algoritmos de localización. Concretamente se trata de una configuración en el que las fuentes 1, 2 y 3 están emitiendo señales sinusoidales de 1, 2 y 3 KHz respectivamente. El Array microfónico se situó en la posición de medida 2 (la más alejada de la pared). El array utilizado se muestra en la figura 6.

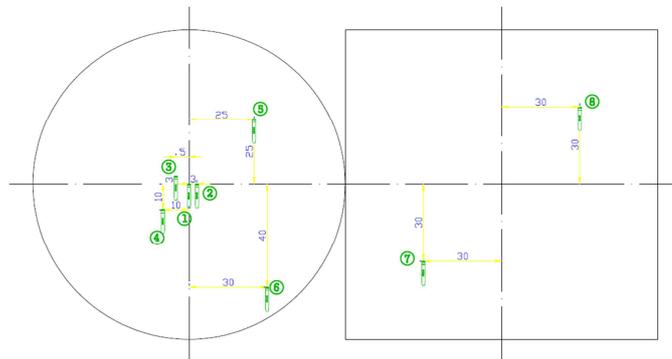


Fig.6. Disposición del array durante las mediciones.

Tabla 2. Comparación de ángulos en los diferentes métodos de localización sobre la medida real y simulada.

| Fuente | Ángulo    | Geometría | SIMULACIÓN |          | MEDIDA     |          |
|--------|-----------|-----------|------------|----------|------------|----------|
|        |           |           | DAS TIEMPO | DAS FREC | DAS TIEMPO | DAS FREC |
| 1      | Azimutal  | 87,4      | 86,8       | 87,0     | 84,0       | 81,0     |
|        | Elevación | 22,0      | 30,0       | 24,0     | 12,0       | 21,0     |
| 2      | Azimutal  | 103,0     | 99,0       | 102,0    | 105,0      | 99,0     |
|        | Elevación | 21,5      | 15,0       | 24,0     | 6,0        | 21,0     |
| 3      | Azimutal  | 116,3     | -          | 114,0    | -          | -        |
|        | Elevación | 19,9      | -          | 18,0     | -          | -        |

En la tabla 2 no hay resultados en la banda de 3KHz, salvo en la simulación con el algoritmo DAS en frecuencia, debido a que hay varios lóbulos cercanos y no hay razones objetivas para

decidir cuál de ellos es el que proviene de la fuente, pues no son máximos absolutos. Probablemente se deba a la configuración del array de medida, la distancia entre receptores es demasiado grande para esta frecuencia. Sin embargo, sí que hay resultados en los demás casos del algoritmo DAS en frecuencia y son bastante similares a los que indica la geometría. Teniendo en cuenta que los algoritmos programados tienen una resolución de  $3^\circ$  tanto en azimutal como en elevación, esto es debido a un compromiso entre tiempo de cálculo y precisión en la medida.

Por otro lado, el algoritmo DAS en tiempo localiza bien los ángulos azimutales, mientras que falla a la hora de localizar el ángulo de elevación.

### Fuente en movimiento

Otro problema que suele verse relacionado con la localización de ruido es que las fuentes de ruido no son fijas, por ello tras la configuración del array se pasó a realizar una prueba con fuentes móviles, para ello se utilizó una caja acústica sobre un carro con ruedas. Se situó el array a una distancia de 10 m del altavoz, moviéndose este en la perpendicular que une la matriz de micrófonos y el altavoz con un recorrido de  $\pm 6$  metros.

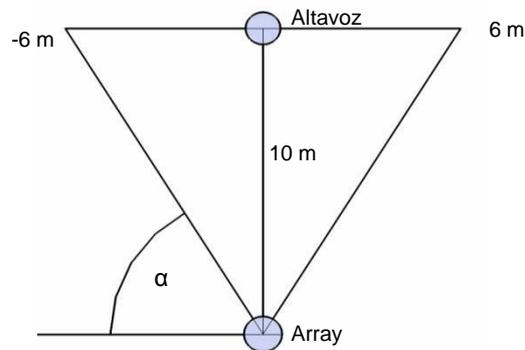
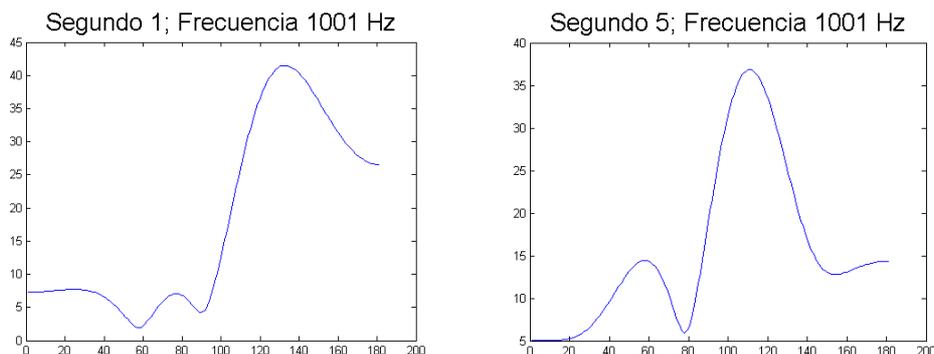


Fig. 7. Esquema del estudio de localización de la fuente en movimiento.

Para realizar la localización, al haber desplazamiento de la fuente de ruido, no se pueden aplicar los algoritmos al total de la señal, sino que se debe dividir la señal en pequeños bloques temporales, y aplicar los algoritmos de localización a cada uno de ellos dando como resultado la evolución de la ubicación de la fuente con el tiempo.

En la figura 8, se muestra la evolución temporal del ángulo de llegada del ruido, para los instantes 1, 5, 10 y 15 segundos. Se puede observar como la fuente de ruido, en este caso 1 KHz, se desplaza desde la posición +6 metros ( $140^\circ$ ) hasta la posición -6 metros ( $60^\circ$ ). La duración del trayecto es, aproximadamente, de unos 15 segundos y la duración temporal del bloque escogido para la localización es de 0,1 segundos, lo que supone  $0,8^\circ$  del movimiento de la fuente.



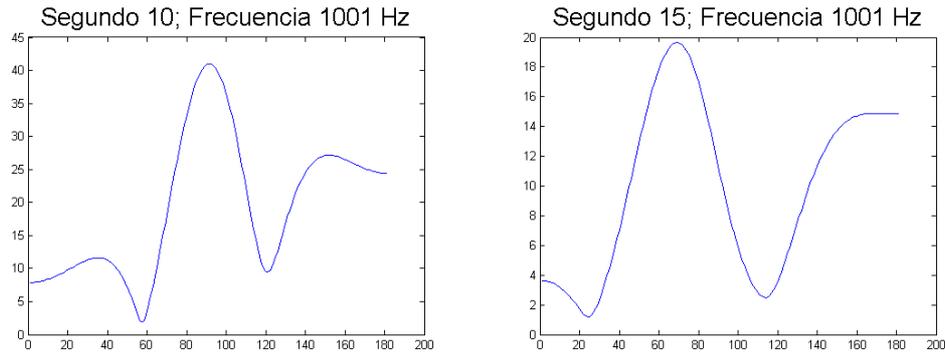


Fig. 8. Ángulo que indica la dirección de la fuente en distintos instantes de tiempo de la grabación (1, 5, 10 y 15 segundos). Eje x representa el ángulo de llegada en grados. Eje y unidades arbitrarias.

### CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo ha servido para introducir al Laboratorio de Acústica de la Universidad Pública de Navarra en el campo de la localización de fuentes de ruido, diseño de arrays, calibración de sistemas de adquisición de datos, etc. Se puede concluir en que con el poco equipo disponible se pueden localizar ruidos en situaciones controladas (campo libre, tonos puros, etc.). No obstante, ante situaciones más complejas, como puede ser la localización de ruido en un molino eólico, se ha visto como el array disponible es claramente insuficiente. A su vez se han planteado varias líneas futuras, como puede ser la implementación de más algoritmos de localización de ruido, de hecho en la actualidad ya se dispone de algún algoritmo más programado (MVDR, MUSIC). La principal línea futura, en la que ya estamos trabajando, es en la creación de micrófonos de bajo coste, con el objetivo de incrementar el tamaño del array a un precio razonable.

### REFERENCIAS

- [1] J. Billingsley, R. Kinns, "The acoustic telescope," *Journal of Sound and Vibration*, 48, (1976), pp. 485-510
- [2] Ulf Michel, *History of Acoustic Beamforming*, Berlin Beamforming Conference (BeBeC), Nov. 2006. Berlin.
- [3] B&K, *Technical Review (Beamforming) No.1\_2004*
- [4] Mingsian R. Bai, Jeong-Guon, Ih, Jacob Benesty, *Acoustics Array System*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2003. ISBN 978-0-470-82723-9
- [5] R. G. Lorenz and S. P. Boyd, "Robust minimum variance beamforming," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 53, May 2005.
- [6] G. Bienvenu and L. Kopp., "Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach", *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-31, pp. 1234-1248, October 1983.
- [7] V. Krishnaveni, T. Kesavamurthy and Aparna. B, *Beamforming for Direction-of-Arrival (DOA) Estimation-A Survey*. *International Journal of Computer Applications*, 61 (11), January 2013
- [8] Miguel Arana, Antonio Vela, Luisa San Martin, *Calculating the impulse response in rooms using pseudo-impulsive acoustic sources*, *ACUSTICA - Acta Acustica*, 89 (2003) pp.377-380.
- [9] IEC 61400-11, *Wind turbines- Part 11: Acoustic noise measurements techniques*, 2012, Geneva, Switzerland.