

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Beamforming, localización de fuentes sonoras mediante arrays de micrófonos”

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:  
**Jorge Machín Mindán**

Tutor/a:  
**Javier Redondo Pastor**

**GANDIA, 2016**

## **Resumen**

En este trabajo se estudian los fundamentos teóricos utilizados para la localización de fuentes acústicas (beamforming). Se analizan y se implementan los principales algoritmos de esta técnica. También se expone la puesta a punto del dispositivo de medida, calibración de nivel y fase del array, algoritmos implementados y los resultados obtenidos tanto en las simulaciones realizadas como en las pruebas de localización de fuentes acústicas reales.

Beamforming. Localización fuentes de ruido, array microfónico, retardo y suma

## **Abstract**

In this paper, the teorical fundaments for noise sources localization (beamforming) are studied. Main algorithms of this technique are analyzed and programmed. The experimental setup, calibration of the array (level and phase), implemented algorithms and results of the simulations and first localization tests are discussed.

Beamforming. Sound source localization. Microphone array, Delay and Sum

## Índice

1. OBJETO DEL PROYECTO .....	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	1
1.2. ESTRUCTURA Y ETAPAS DEL PROYECTO.....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	1
3. LOCALIZACIÓN DE FUENTES MEDIANTE BEAMFORMING.....	4
3.1 DISEÑO DEL ARRAY.....	5
3.2 ALGORITMOS DAS .....	6
3.2.1 Delay And Sum (DAS) .....	6
3.2.2 Delay And Sum en el dominio frecuencial .....	8
3.2.3 DAS en frecuencia tridimensional .....	9
3.3 REPRESENTACIÓN “MAPA” .....	12
3.3.1 Convencional o Barlett.....	13
3.3.2 Minumun Variance Distortionless Response (MVDR) o Capon Beamformer .....	15
3.3.3 MULTiple Signal Clasification (MUSIC).....	15
3.4 CLEAN .....	16
4 EVALUACIÓN ALGORITMOS .....	17
4.1 SIMULACIONES 2D .....	17
4.2 SIMULACIONES 3D .....	20
5. SISTEMA DE MEDIDA.....	23
5.1 CALIBRACIONES.....	24
5.1.1 Calibración de Nivel.....	24
5.1.2 CALIBRACIÓN EN FASE .....	25
6. RESULTADOS .....	30
6.1 MEDIDAS DE CAMPO CON FUENTES EN MOVIMIENTO EN 2D.....	30
6.1.1 Tonos puros.....	31
6.1.2 Ruido blanco.....	33
6.2 MEDICIONES 3D. ....	34
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....	40
8. BIBLIOGRAFÍA .....	41

# **1. OBJETO DEL PROYECTO**

## **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

Este proyecto se centra en el estudio de las técnicas de localización de fuentes sonoras mediante beamforming. El beamforming es una técnica en la que los diferentes sensores de una matriz o array registran la señal de una fuente acústica, la cual (debido a la distancia que hay entre ellos) resulta desfasada en cada micrófono. A través de una combinación de operaciones matemáticas y retardos de las señales registradas es capaz de indicar el origen de dicho sonido. Además de aplicaciones acústicas, esta técnica tiene interés en diferentes campos como en las telecomunicaciones, sismología, biomedicina, etc. Ejemplos típicos de dispositivos que implementan esta técnica son los radares y los sónares.

El objeto principal de este proyecto es estudiar los fundamentos de la técnica de Beamforming, la cual nos permite localizar fuentes de ruido ubicadas en el espacio, si se cumplen las hipótesis que requiere esta técnica.

## **1.2. ESTRUCTURA Y ETAPAS DEL PROYECTO**

Las tareas de este estudio se dividirán en los siguientes pasos ordenadas cronológicamente:

1. Estudio teórico del beamforming. Recopilación bibliográfica.
2. Implementación y simulación de algoritmos de localización. En esta etapa se utilizó el programa Matlab 2014.
3. Diseño del dispositivo experimental: sensores, tarjetas de adquisición, cableado, etc. Como software de control se utilizará el programa Labview de National Instruments.
4. Calibración del sistema de medida y registro. Calibración (sensibilidad y fase) de los micrófonos.
5. Pruebas básicas de medición mediante uso de generadores de señal en condiciones controladas, en donde se pondrán a prueba los algoritmos básicos de localización.
6. Análisis de los resultados de las medidas.
7. Elaboración de conclusiones y la redacción del TFG.

# **2. INTRODUCCIÓN**

El término “beamforming” es un anglicismo, el cual resulta de la unión de las voces inglesas “beam” (traducido al castellano, rayo, haz) y “forming” (cuya traducción es formación). Este término es empleado en ingeniería de comunicaciones, acústica y procesamiento de la señal para designar la transmisión y recepción direccional de señales, siendo también conocido como “método de antena microfónica”, “telescopio acústico” o “cámara acústica”. Este anglicismo

deriva del hecho de que los primeros filtros espaciales eran diseñados para formar diagramas de radiación muy directivos (denominados “pencil beams”).

Desde finales de la década de 1980, la localización de fuentes ha supuesto un gran desarrollo en todos los ámbitos aplicables. Su aplicación acústica surge en el campo de la acústica submarina y medioambiental.

La idea fundamental en la que se basa la técnica es el empleo de patrones directivos en sistemas receptores, el cual asegura la recepción de señales provenientes de una ubicación dada, atenuando el resto de señales (que a la vista del receptor, no constituyen más que interferencias indeseadas). Por ello, se puede afirmar que el método entra dentro de la categoría de filtrado espacial (acompañada de otras técnicas, como filtrado temporal y frecuencial).

El uso de “imágenes acústicas” se utiliza ampliamente en la industria para la detección de fuentes o focos sonoros. En la figura 1 pueden verse varios ejemplos de esta técnica en el ámbito industrial, detectar fuentes de ruido en un vehículo con el fin de ver que partes del motor es la que produce más nivel, otro ejemplo puede ser la identificación de fuentes de ruido en aparatos que combinan ruidos aerodinámicos y mecánicos, como pueden ser los aerogeneradores y los aviones.

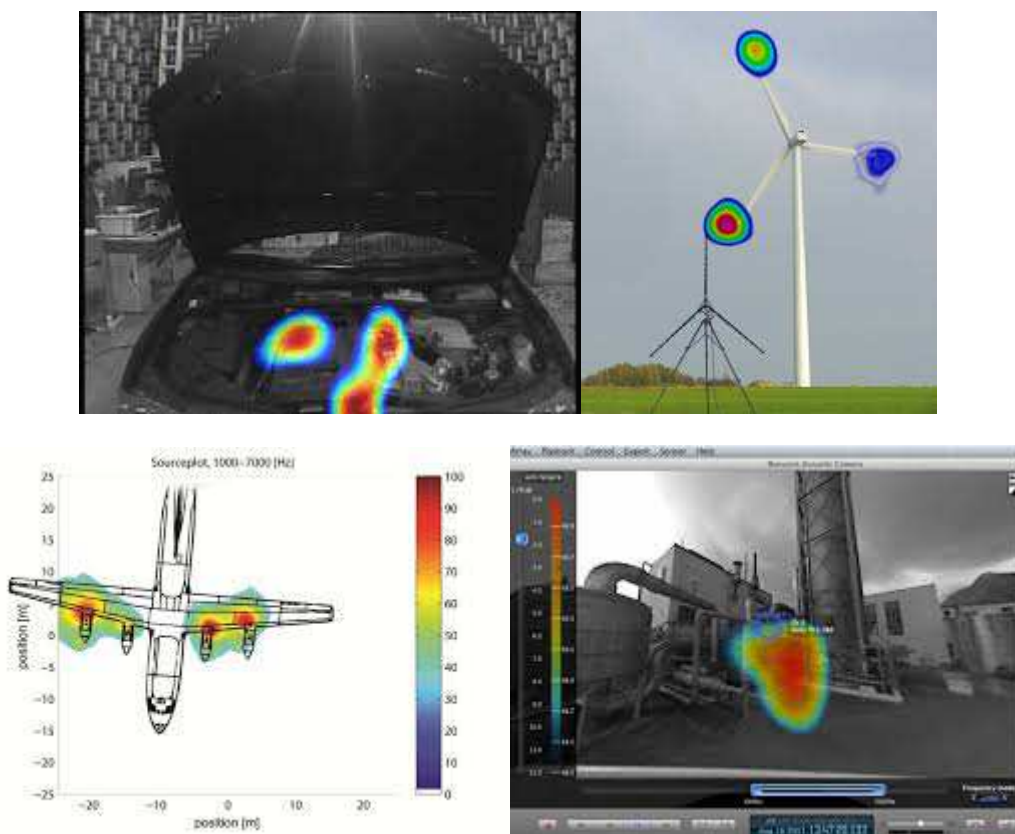


Fig 1. Ejemplo de algunas de las aplicaciones de las técnicas de beamforming.

Algunos de los trabajos recientes en los que se usan técnicas de beamforming pueden ser los llevados a cabo por Sijtsma, que utiliza técnicas de beamforming para la localización de fuentes sonoras en maquetas de aviones en túneles de viento [1]. Otro trabajo que también se centra

en el estudio del ruido en aviones, en este caso con aviones reales, es el desarrollado por Van der Got et al [2] en el que diseñan un equipo de medida de alta resolución y bajo coste. Otra aplicación muy interesante, y por la que nos introdujimos en este mundo del beamforming, es un trabajo llevado a cabo por Orlemans en 2009 [3] en el que propone reducir los ruidos debidos a turbulencias en generadores eólicos, se trata de una optimización aerodinámica. Como vemos se trata de una técnica en continuo desarrollo (incluso hay un congreso que sólo se trata el tema del beamforming (BEBEC)), todos los artículos antes mencionados están escritos en los últimos 10 años.

La importancia que está tomando esta técnica se ve claramente en la cantidad de equipos comerciales que existen, casi todas las grandes casas de equipos especializados en instrumentación acústica tienen uno de estos dispositivos. A continuación presentamos algunos de los dispositivos comerciales:



Fig. 2. Equipos comerciales para la localización de fuentes sonoras, de izquierda a derecha y de de arriba abajo, Bruel&Kjaer, Norsonic, Distran y National Instruments.

### 3. LOCALIZACIÓN DE FUENTES MEDIANTE BEAMFORMING

En este apartado se van a introducir algunos de las técnicas de beamforming más comunes. Se comenzará por los algoritmos más simples, como puede ser el Delay And Sum (DAS), en dos dimensiones y en el dominio temporal, para concluir con técnicas de tres dimensiones y en dominio frecuencial en los que se muestran “mapas” de potencias superpuestos a imágenes, también llamados cámaras acústicas.

Las diferentes técnicas de beamforming se basan en una serie de hipótesis, de obligado cumplimiento, para poder llevarse a cabo.

- 1.- La fuente está suficientemente alejada del array de micrófonos, para que la onda pueda considerarse plana.

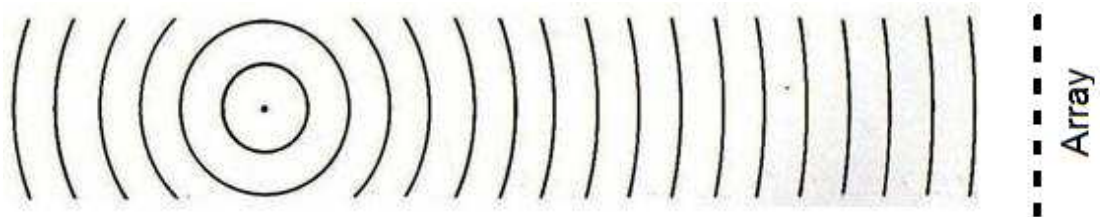


Fig. 3. Representación de un frente de onda esférico que se propaga alejándose de la fuente de formando círculos concéntricos.

La figura 3 representa un frente de onda esférico que se propaga separándose de la fuente en circunferencias concéntricas. A una distancia suficiente de la fuente una pequeña área del frente de onda, en la que se encuentra el array, se comportará como una región de una onda plana.

- 2.- El medio de transmisión (aire) es homogéneo.
- 3.- No hay obstáculos entre el array y la fuente que modifiquen (reflejen, apantallen o difracten) el frente de onda.

Si no se cumple la primera de las hipótesis, con la fuente de ruido no situada lo suficientemente lejos del array de sensores para que el frente de onda llegue plano, el problema es completamente diferente. Este nuevo problema se resolvería con otra técnica de localización llamada holografía acústica en el campo cercano o Near Field Acoustic Holography (NAH) en inglés.

Debido a que la formación de haz opera en el campo lejano, las ondas sonoras son tratadas como planas. La técnica de beamforming se aprovecha de este retardo en la propagación de las ondas de sonido entre varios micrófonos para calcular dónde se originó el sonido desde el frente de la matriz de micrófonos.

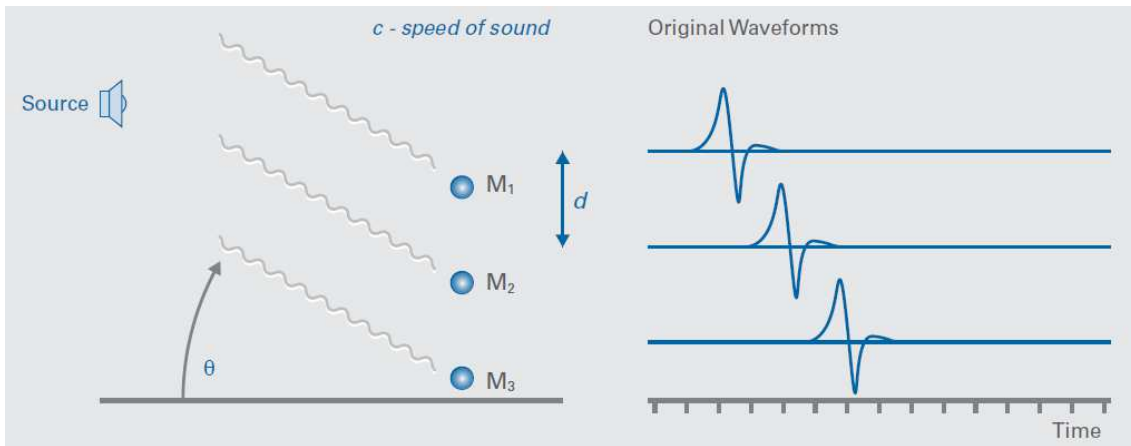


Fig. 4. Frentes de onda y señales registradas por los micrófonos

### 3.1 DISEÑO DEL ARRAY

Cuando se diseña un array de sensores para la localización de fuentes lejanas se deben tomar en cuenta una serie de aspectos [4], como pueden ser las frecuencias inferior y superior que queremos localizar, la anchura del lóbulo principal, la resolución espacial, los lóbulos secundarios, la distancia, etc. A continuación mostramos algunos de los parámetros de diseño de arrays de micrófonos.

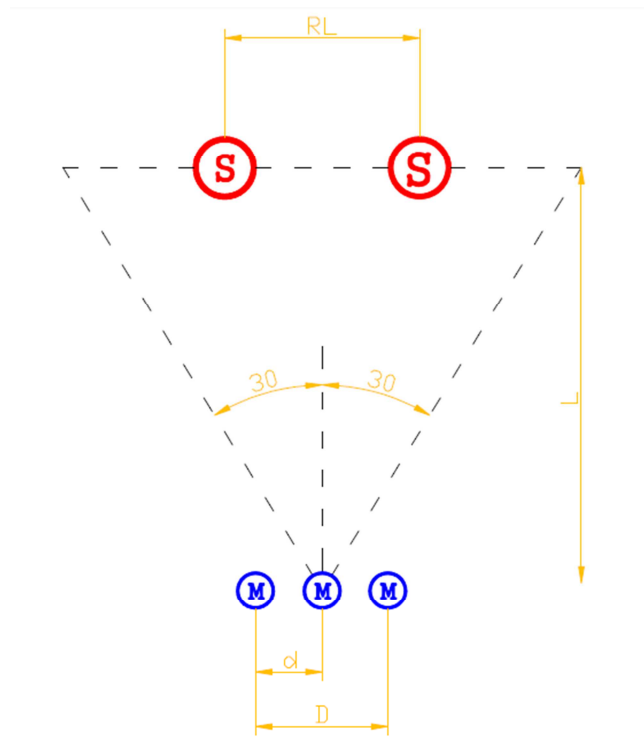


Fig. 5. Esquema de los parámetros geométricos entre el array microfónico y la fuente.

- $RL$ = Distancia entre las fuentes de ruido más alejadas.
- $L$ = Distancia entre la fuente de ruido y los micrófonos.



- $d$  = Distancia entre los micrófonos del Array más cercanos.
- $D$  = Distancia entre los micrófonos del Array más alejados.
- $60^\circ$  es la apertura máxima.

#### 1.- Separación entre micrófonos ( $d$ )

Hay que elegir la separación entre micrófonos  $d$  teniendo en cuenta la frecuencia máxima a localizar  $f_{max}$ . Una buena regla para evitar el alising espacial es  $d = \lambda_{max} / 2$ .

#### 2.- Rango de frecuencias ( $f_{max} - f_{min}$ )

Frecuencia máxima  $f_{max} = \frac{c}{2d}$  donde  $c$  es la velocidad del sonido en el aire.

Frecuencia mínima  $f_{min}(30^\circ) = \frac{2c}{D}$  donde  $D$  es la distancia máxima entre receptores.

Esta regla viene determinada por la apertura máxima de la fuente de ruido ( $60^\circ$ ), de

donde se obtiene que:  $2 * \sin(30^\circ) = \frac{2\lambda}{D} = \frac{2c}{Df_{min}}$

#### 3.- Resolución espacial:

Resolución espacial en el plano focal para medidas de distancia  $L$  entre el array y la fuente.  $R_L = \frac{L}{D} \lambda$

#### 4.- Apertura

Apertura para medidas con distancia  $L$  y anchura del haz de  $60^\circ$ .

$$A_L = 1.15L = 2R_L$$

#### 5.- Número de sensores

$$M = \frac{D}{d} \text{ Para el rango de frecuencias } (f_{max} - f_{min})$$

### 3.2 ALGORITMOS DAS

#### 3.2.1 Delay And Sum (DAS)

La localización de fuentes de ruido mediante el método retardo y suma (Delay And Sum, DAS) es, conceptualmente, muy sencilla. Todos los micrófonos registran a la vez, y se aplica un retardo a cada una de las señales registradas en función del posible ángulo de incidencia. Posteriormente se suman todas las señales, el ángulo de incidencia será aquel para el que la energía de la señal resultante sea máxima.

Suponiendo que la fuente de ruido está situada a un cierto ángulo, a la izquierda del conjunto de micrófonos, las ondas de presión llegan antes a los micrófonos más cercanos.

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

Causando un retardo temporal entre las señales de los sensores en función de la posición de estos (distancia entre ellos). Este retardo viene dado por:

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

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

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

Algoritmo:

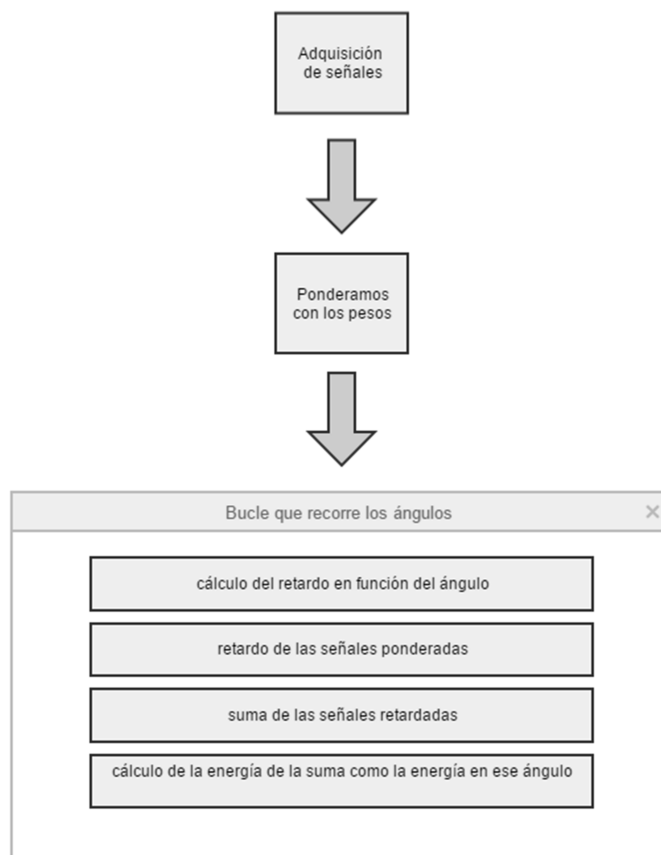


Fig. 6. Diagrama de bloques del algoritmo DAS en tiempo.

Una vez que tenemos las señales registradas, pasamos a la localización de la fuente de ruido. Para ello, en primer lugar aplicamos unos pesos a las señales registradas, pueden entenderse como las correcciones por sensibilidad de los micrófonos. Para, a continuación, retardar cada una de las señales, en función del ángulo, con el objetivo de sumar las señales resultantes, calcular la energía de esta suma y guardar ese valor como la energía a un cierto ángulo de incidencia. Cuando acabamos de realizar el bucle que recorre todos los ángulos, tenemos un vector que guarda la energía de la suma de las señales retardadas en función del ángulo a estudio.

La figura 7 resume cómo se desarrolla el proceso de localización para el DAS.



Fig. 7 Las señales se compensan por la sensibilidad de cada micrófono y se retardan entre ellas para cada uno de los ángulos a estudio.

### 3.2.2 Delay And Sum en el dominio frecuencial

El algoritmo DAS que trabaja en el dominio temporal es sencillo de entender e implementar, pero 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 ( $e^{-j\omega\tau_n}$ ).

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.

Al tratarse de un algoritmo de banda estrecha, podemos elegir a la frecuencia que queremos buscar la fuente de ruido, es a esta frecuencia a la que denominamos frecuencia de sintonización, como si de una radio se tratase.

Algoritmo:

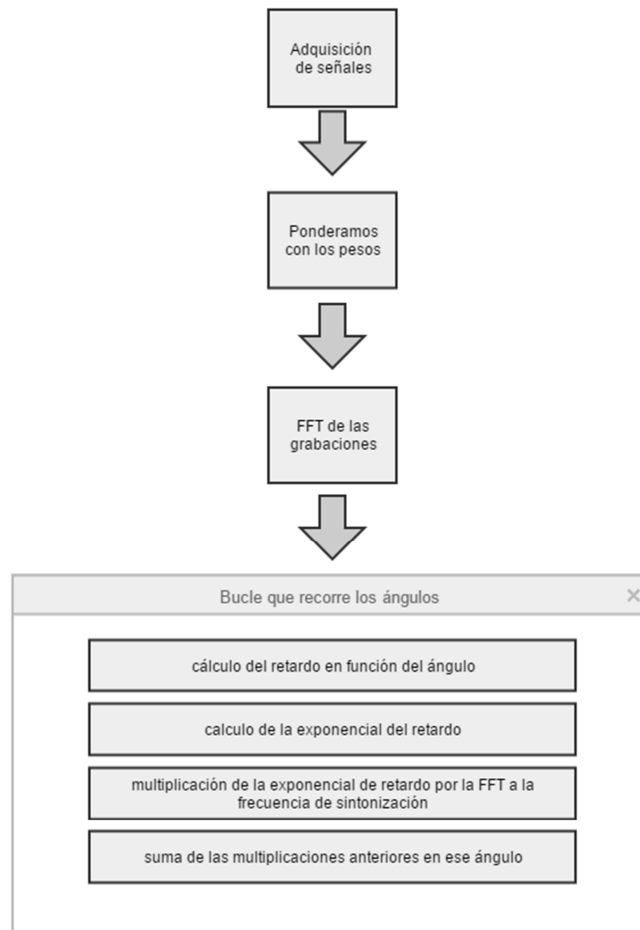


Fig. 8. Diagrama de bloques del algoritmo DAS en frecuencia.

### 3.2.3 DAS en frecuencia tridimensional

Los dos algoritmos anteriores sirven como una primera aproximación al problema, pero no hay que olvidar que se trata de una simplificación. Normalmente las fuentes de ruido se encuentran en espacios tridimensionales. Es por esto por lo que se hizo una extrapolación del algoritmo anterior a tres dimensiones.

Una posibilidad para localizar fuentes en 3D es simplemente añadir una tercera dimensión a los algoritmos ya trabajados. Para ello, habría que contemplar dos ángulos (azimut y elevación) en el cálculo del retardo, tanto a la hora de calcular las señales en el proceso de simulación como durante el proceso de localización. Así mismo, se necesitarán arrays de sensores no únicamente lineales, es decir, con dimensiones variables en al menos dos coordenadas. Este

tipo de algoritmos nos permiten conocer el ángulo de llegada de la onda (plana) con mayor nivel, es decir, el de la dirección de la fuente sonora.

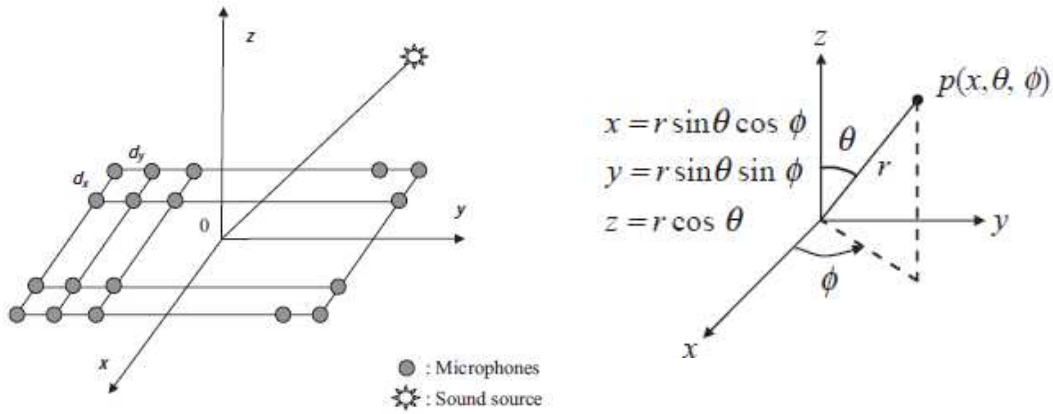


Fig. 9. Esquema que representa una configuración de beamforming.

El vector unidad  $r$  apunta a la fuente de ruido en las direcciones  $\theta$  y  $\phi$  puede expresarse en coordenadas esféricas como:

$$r = (\sin \theta \sin \phi, \sin \theta \cos \phi, \cos \theta)$$

Por lo que el retardo correspondiente a cada uno de los micrófonos puede expresarse como:

$$\tau_{ij} = \frac{x_{ij} * r}{c} = \frac{(i-1)d_x * \sin \theta * \sin \phi + (j-1)d_y * \sin \theta * \cos \phi}{c}$$

Donde  $i = 1, 2, \dots, I$  y  $j = 1, 2, \dots, J$ . Siendo  $I$  y  $J$  el número de receptores.

Y el vector de direcciones (en forma matricial) puede expresarse como:

$$a(\omega, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\omega \frac{d_x \sin \theta \sin \phi}{c}} \\ \vdots \\ e^{j\omega \frac{(I-1)d_x \sin \theta \sin \phi}{c}} \\ e^{j\omega \frac{d_y \sin \theta \cos \phi}{c}} \\ e^{j\omega \frac{d_x \sin \theta \sin \phi + d_y \sin \theta \cos \phi}{c}} \\ \vdots \\ e^{j\omega \frac{(I-1)d_x \sin \theta \sin \phi + (J-1)d_y \sin \theta \cos \phi}{c}} \end{bmatrix}$$

Por lo que podemos expresar la salida del DAS en 3 dimensiones (en el dominio temporal) como:

$$y(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}(t - \tau_{ij})$$

Donde  $x_{ij}$  es la señal grabada en el receptor  $ij$ , y  $\tau_{ij}$  son los vectores de dirección que dirigen el array hacia la fuente.

Transformando la ecuación al dominio frecuencial y trabajando en forma matricial, tenemos:

$$Y(\omega) = a(\omega, \theta, \phi)'X(\omega)$$

Algoritmo:

El resultado del algoritmo es una matriz bidimensional con las energías de la suma de las señales de los receptores retardadas en cada uno de los pares de ángulos azimut y elevación.

Los ejes de la matriz (coordenadas) son los ángulos elevación y azimutal en los que se ha calculado dicha energía.

Tal y como se observa en la figura 10 los resultados de este algoritmo no son fáciles de interpretar (o por lo menos no hemos encontrado una representación que nos satisfaga) es por todo ello por lo que se decide pasar al siguiente tipo de algoritmos.

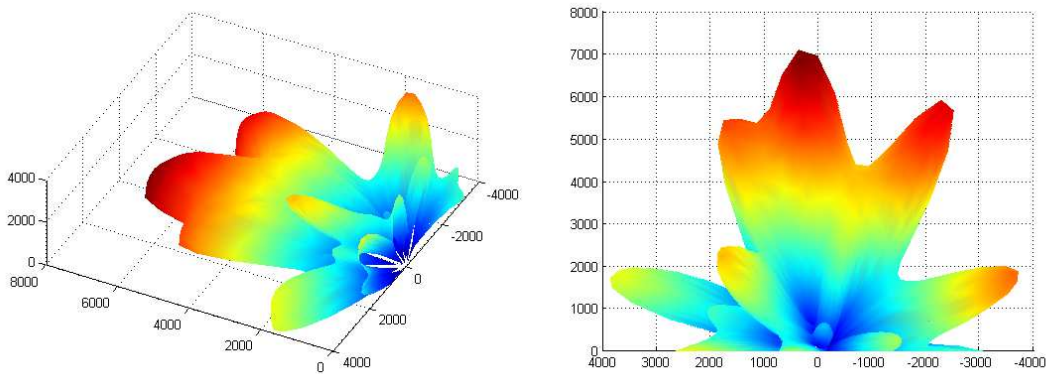


Fig. 10. resultado del algoritmo Das en frecuencia en 3D.

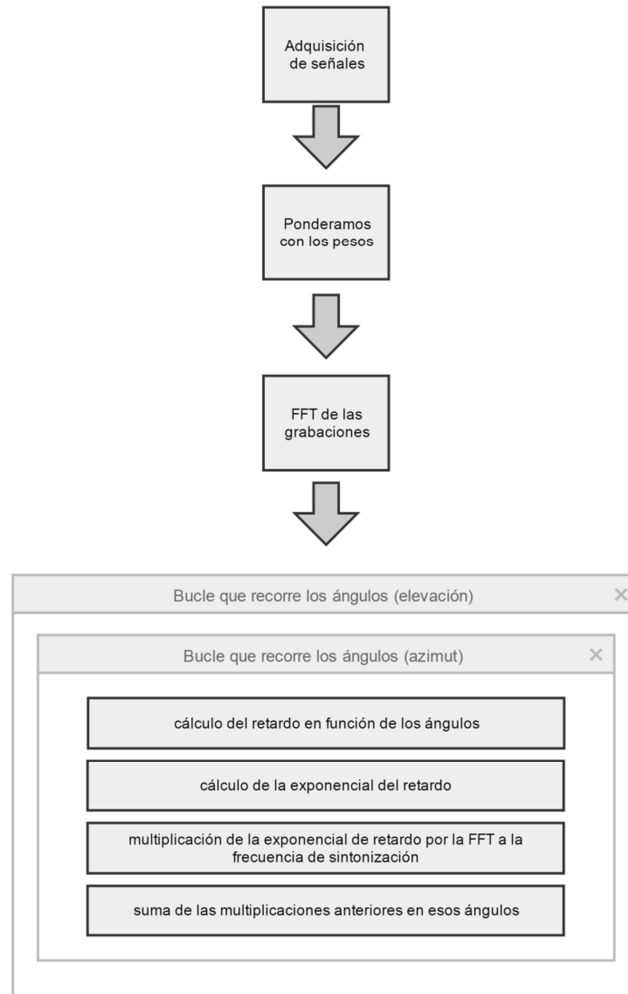


Fig. 11. Diagrama de bloques del algoritmo DAS en frecuencia en 3D.

### 3.3 REPRESENTACIÓN “MAPA”

Existen otro tipo de algoritmos, algo más sofisticados, que permiten obtener un mapa de niveles de potencia sonora en un plano concreto, a modo de “fotografía acústica”. De hecho, el dispositivo que los implementa se denomina habitualmente “cámara acústica” y, además de un conjunto predefinido de micrófonos, suele integrar alguna herramienta como una videocámara para capturar y superponer imágenes reales al mapa sonoro.

Los algoritmos que se van a presentar a continuación cambian el concepto a la hora de localizar las fuentes de ruido. El proceso de localización es distinto, pues ahora no se busca el ángulo de llegada, sino que lo que se busca es el “mapa” de presiones o potencias en un plano del espacio concreto, para una o varias frecuencias determinadas.

De entre todos ellos, vamos a comenzar analizando uno de los más sencillos, el método DAS convencional o Barlett.

### 3.3.1 Convencional o Barlett

El algoritmo Convencional o de Barlett [1], es una técnica de localización de banda estrecha, en el dominio frecuencial. Debido a que se trata de un algoritmo de banda estrecha únicamente se puede buscar una frecuencia en cada proceso de localización. La amplitud y fase (llamada vector de direcciones o steering vector en inglés) es determinada, asumiendo una fuente de ruido de potencia unidad emitiendo la frecuencia de sintonización en un punto concreto. Esto se repite para una región de escaneo o plano, dicho plano se divide en multitud de puntos dependiendo de la resolución que busquemos.

Cada elemento  $n$  de ese vector se calcularía de la siguiente manera:

$$g_n = \frac{-e^{-2\pi if\tau_n}}{4\pi d_n}$$

donde:

$$\tau_n = d_n/c$$

- Numerador: exponencial del retardo en función de la frecuencia y de la distancia entre el punto del plano y el sensor  $n$ .
- Denominador: atenuación en función de la distancia  $d_n$  entre el punto del plano y el sensor  $n$ .

El objetivo es obtener las amplitudes complejas  $a$  de las posibles fuentes en cada posición del plano a dibujar. Para ello, las señales de los micrófonos que corresponderían a la supuesta "fuente unidad"  $g$  se comparan ahora con las mediciones obtenidas en los micrófonos  $p$ , minimizando la expresión:

$$\|p - ag\|^2$$

Se trata de un problema de mínimos cuadrados cuya solución viene dada por:

$$a = \frac{g^*p}{\|g\|^2}$$

Por último, el mapa de potencias sonoras en el plano en cuestión se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{1}{2} |a_s|^2 = \frac{1}{2} aa^*$$

O su equivalente:

$$A = \frac{1}{2} \frac{g^*p}{\|g\|^2} \left( \frac{g^*p}{\|g\|^2} \right)^* = \frac{1}{2} \frac{g^*pp^*g}{\|g\|^4} = \frac{g^*cg}{\|g\|^4}$$



Donde  $C$  es la matriz de covarianza  $C = pp^*$

Si en la ecuación anterior sustituimos  $\frac{g}{\|g\|^2}$  por  $w$  obtenemos la siguiente expresión:

$$A = w^* C w$$

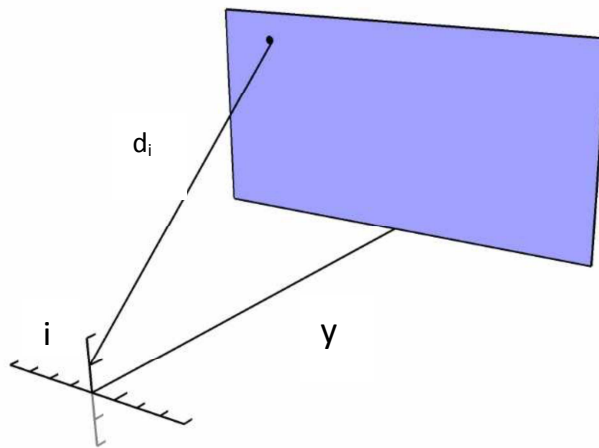


Fig. 12. Esquema del algoritmo Convencional. El plano azul representa el plano de escaneo, cada una de los puntos de la cruz es la posición de cada uno de los sensores  $i$ , el punto negro del plano representa la posición en la que se están calculando los vectores de dirección  $g_n$ .

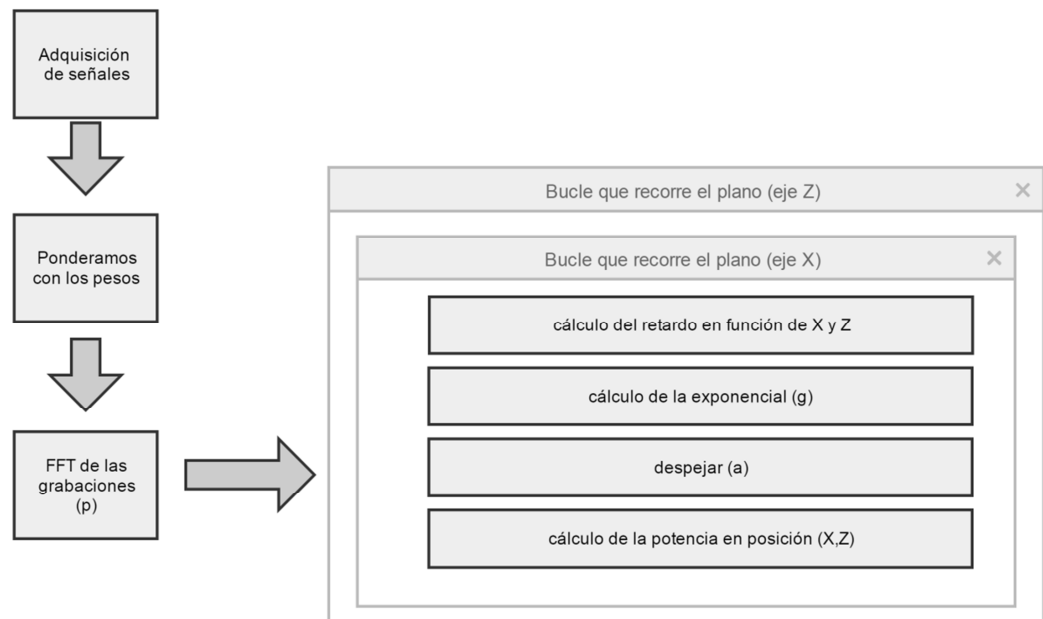


Fig. 13. Diagrama de bloques del algoritmo Convencional

Tal y como hemos visto podemos obtener la solución de 2 formas, despejando  $\alpha$  o calculando directamente a partir de  $g$  y  $p$ .

#### Pasos del algoritmo:

- En primer lugar se debe realizar la transformada de Fourier (FFT) de cada uno de los sensores y seleccionar la frecuencia que se debe buscar (frecuencia de sintonización). Esto nos daría un vector de  $n$  elementos, uno por cada uno de los micrófonos, que llamaremos  $p$ .
- Una vez dividido el plano a dibujar, según la resolución deseada calculamos, en función del punto del plano, el vector de retardos y atenuaciones asociadas a cada micrófono  $g$  (equivalente al nivel que recogerían esos micrófonos si existiera una fuente de potencia unidad en ese punto), también de longitud  $n$ .
- Una vez obtenidos el vector de retardos pasamos a calcular  $\alpha$ . Cabe destacar que se trata de un único valor complejo, el cual nos permite calcular la potencia de cada uno de los puntos de la región de escaneo  $A$ .

Hay que tener cuidado a la hora de elegir las dimensiones del plano de escaneo, ya que el factor proveniente del decaimiento por distancias ( $4\pi d$ ) amplifica la potencia de las fuentes dependiendo de su distancia al centro del plano, cuanto más lejos del centro estén los puntos más amplificados serán.

### **3.3.2 Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) o Capon Beamformer**

El Minimum Variance Distortionless Response se caracteriza por ser un algoritmo de alta resolución, que se plantea como un problema de optimización basado en la inversión de la matriz de covarianza [5].

Al igual que en el caso anterior el mapa de potencias se obtiene a partir de la matriz de covarianza y el vector de direcciones  $g$  ( $w = \frac{g}{\|g\|^2}$ ).

Utilizando la misma nomenclatura del apartado anterior, el mapa de potencias para este algoritmo viene expresado por la ecuación:

$$A = \frac{1}{w^* C^{-1} w}$$

### **3.3.3 Multiple Signal Classification (MUSIC)**

Como diferenciación a los algoritmos anteriormente presentados el MUSIC se basa en la descomposición de la matriz de covarianza en 2 sub-espacios [6], uno el de la señal y otro de ruido. La auto-descomposición se puede expresar de la siguiente manera:

$$C = U_s \Lambda_s U_s^* + U_n \Lambda_n U_n^*$$

El algoritmo MUSIC utiliza el sub-espacio de ruido de la matriz de covarianza en el denominador del algoritmo MVDR:

$$A = \frac{1}{w^* U_n U_n^* w}$$

Este algoritmo también se conoce por beamformer del sub-espacio de ruido (subspace beamformer en inglés), en comparación con los dos algoritmos anteriores, este da mejor resultados.

### 3.4 CLEAN

No se trata de un algoritmo de localización propiamente dicho, sino, como su nombre indica, consiste en limpiar el mapa de potencias a partir de un algoritmo de localización, del Beamforming Convencional normalmente. Para ello va eliminando iterativamente las fuentes dominantes [7, 8], una técnica que usan los astrónomos para eliminar lóbulos secundarios del brillo de las estrellas obtenidos con varios telescopios. Básicamente se utilizan los siguientes pasos:

- 1.- Se obtiene un mapa con alguno de los algoritmos anteriormente comentados.
- 2.- Se busca la localización de la máxima auto-potencia de la fuente en el mapa.
- 3.- Se elimina el haz teórico de la fuente antes localizada (es a lo que se llama haz sucio o dirty beam ya que incluye también los lóbulos secundarios) del mapa.
- 4.- Se sustituye este haz "sucio" por un haz "limpio" (en el que no haya lóbulos secundarios)

Este proceso se realiza de forma iterativa para múltiples fuentes.

Tal y como indicábamos antes en el algoritmo de Barlett, obtenemos el mapa de potencias, y el vector de pesos:

$$A = w^* C w \quad w = \frac{g}{\|g\|^2}$$

Ahora debemos suponer que  $w_{max}$  es el vector de pesos con el valor máximo de  $A_{max}$ .

$$A_{max} = w_{max}^* C w_{max}$$

El vector de pesos  $w_{max}$  apunta hacia la posición de la fuente  $\xi_{max}$ , con su correspondiente vector de direcciones  $g_{max}$ . El mapa modificado  $A_{mod}$  sin la influencia de la fuente  $\xi_{max}$  puede escribirse como:

$$A_{mod} = w^* C w - w^* C_{max} w$$

Donde  $C_{max}$  es la matriz de covarianza inducida por la fuente en  $\xi_{max}$ . Esta matriz  $C_{max}$  es desconocida, pero se supone:

$$C_{max} = A_{max}g_{max}g_{max}^*$$

A continuación se presenta brevemente el pseudo-algoritmo CLEAN.

Paso 1: Aplicar el algoritmo de localización, en nuestro caso el beamforming convencional, buscar el máximo del mapa, identificar su posición y calcular su correspondiente matriz  $C_{max}$ .

Paso 2: Sustituir la matriz  $C$  por  $C - \varphi C_{max}$ , donde  $\varphi$  es un factor de seguridad con valores entre 0 y 1.

Paso 3: Volver al paso 1 hasta que se cumpla un criterio de parada.

Un criterio de parada que se suele tomar como válido es  $norma(C - \varphi C_{max})$ , donde la norma está definida por:

$$norma(C) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N |C_{nm}|$$

## 4 EVALUACIÓN ALGORITMOS

### 4.1 SIMULACIONES 2D

A continuación, se muestran algunas de las simulaciones que se llevaron a cabo para asegurarse del correcto funcionamiento de los algoritmos implementados. Cabe destacar que se trata de simulaciones completamente teóricas en las que no hay ningún tipo de perturbación externa.

Estas simulaciones están divididas en 2 partes. La primera de ellas es la que se calculan las señales que registran los sensores, partiendo de las coordenadas de las fuentes, las de los receptores, la potencia y la frecuencia de emisión. La segunda parte se trata de la localización propiamente dicha, a partir, únicamente, de las señales registradas y de las coordenadas de los receptores.

En esta prueba vamos a realizar un par de simulaciones, en la primera de ellas disponemos de 3 fuentes de ruido marcadas en rojo en la figura 14 izquierda, que emiten tonos puros, las fuentes de los laterales emiten a una frecuencia de 1000 Hz, mientras que la central emite a una frecuencia de 1700 Hz. En el segundo de los casos (figura 9 derecha), la única fuente que emite es la situada en la posición (10,10) a una frecuencia de 3 KHz. El array tiene una configuración es lineal formado por 16 micrófonos centrados en (0,0) con una separación constante de 0.1 m. Todas las fuentes emiten de manera omnidireccional.

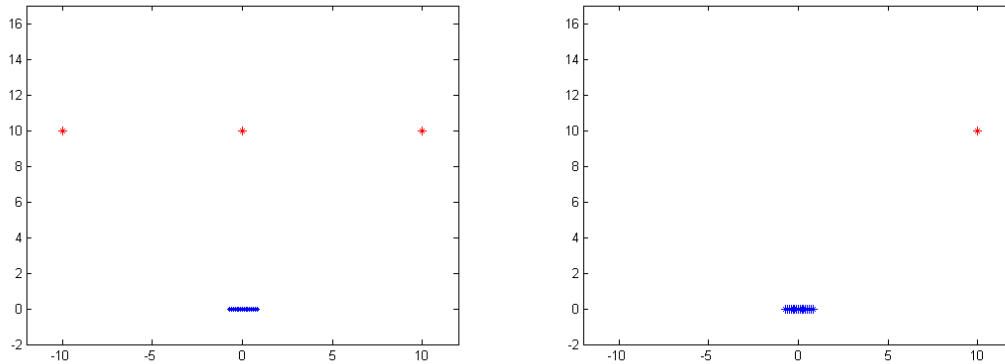


Fig. 14. Esquema de la simulaciones, izq. Caso 1; dcha. Caso 2

La figura 15 muestra el resultado del algoritmo DAS en tiempo a los dos casos, como se puede observar, el algoritmo detecta correctamente 3 fuentes de ruido en los ángulos  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $45^\circ$ . Sin embargo se aprecian diferencias entre la anchura de los lóbulos, estas son debidas a las distintas frecuencias de las fuentes de ruido. Cuanto más alta es la frecuencia de la fuente más estrecho es el lóbulo, mientras que cuanto más baja es la frecuencia más ancho es el lóbulo. Por otro lado la diferencia de nivel a la hora de localizar las fuentes es debido al decaimiento por distancia, es decir la fuente situada en  $(0,10)$  está más cerca que las fuentes situadas en los laterales por lo que la contribución energética de esa fuente sobre los sensores será mayor que la contribución de las fuentes en los laterales.

Aparición lóbulos secundarios al aumentar la frecuencia.

En la figura 15 dcha., se observa como el algoritmo localiza dos fuentes de ruido, mientras que en la simulación únicamente se ha colocado una fuente en la posición  $(10,10)$  (lóbulo de la derecha), la aparición del segundo lóbulo o lóbulo secundario se debe a que estamos intentando localizar una frecuencia (3 KHz) demasiado elevada para la configuración de nuestro array, las separaciones entre micrófonos son muy grandes. Debemos recordar que la separación entre sensores es de 10 cm que tal y como hemos visto en el apartado anterior nos indica la frecuencia máxima a localizar por el array, en este caso 1700 Hz. Una manera para recordar esta norma es que en la separación entre micrófonos debe haber  $1/2$  longitud de onda de la frecuencia máxima que deseamos localizar, otra forma de expresarlo es que debe haber por lo menos 2 micrófonos en cada longitud de onda de la frecuencia máxima.

$$d = \lambda_{max} / 2 \quad \rightarrow \quad \lambda_{max} = 0.1 * 2 = 0.2 \rightarrow \quad f_{max} = 1700 \text{ Hz}$$

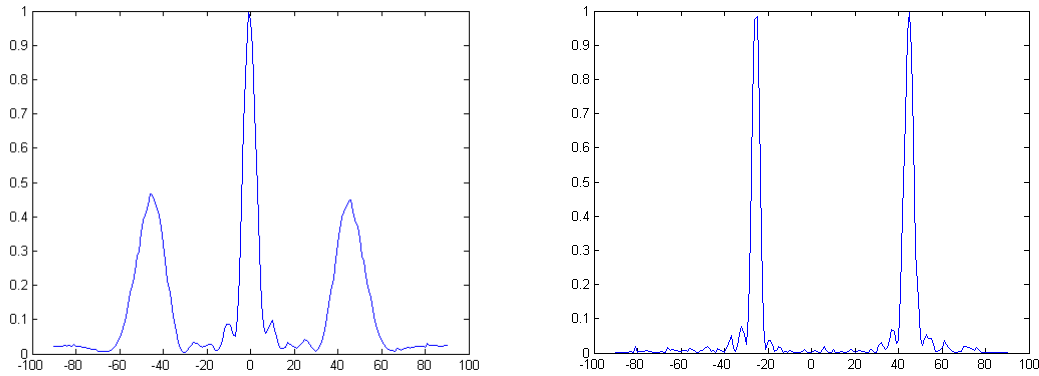


Fig. 15. Izq. Simulación caso 1, dcha. Simulación caso 2, con el algoritmo DAS.

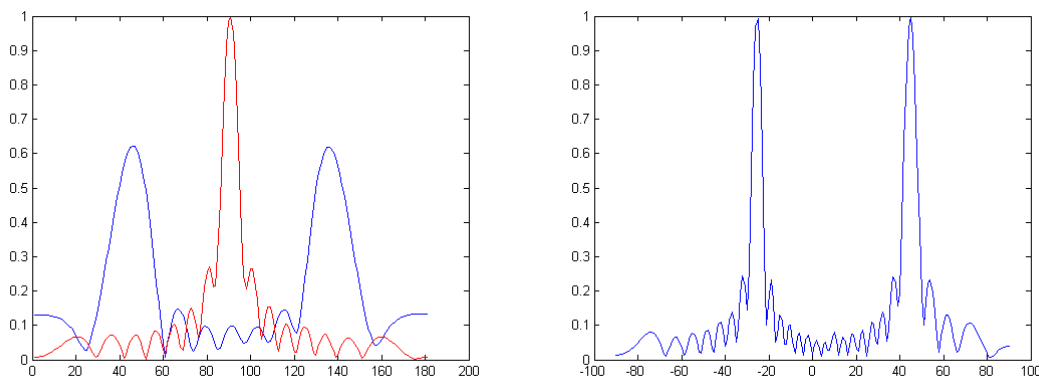


Fig. 16. Izq. Simulaciones caso 1 en azul localización a 1KHz, en rojo 1700 Hz. A la Dcha. Caso 2 con frecuencia de localización de 3KHz. Para el algoritmo DAS en frecuencia.

En la figura 16 se muestra los resultados de los casos 1 y 2, pero con el algoritmo DAS en frecuencia. Esta técnica nos permite separar fuentes por frecuencias, eliminando el ruido de fondo utilizando frecuencias de “sintonización”, frecuencia a la que se buscan las fuentes de audio como si de una radio se tratase. En la figura 16 izquierda vemos la superposición de dos soluciones, en rojo la solución de la localización a 1700 Hz, y en azul la solución a la frecuencia de 1KHz. Tal y como podemos observar estas soluciones son muy similares a las soluciones del DAS en tiempo, con la salvedad de que en este caso podemos elegir las frecuencias de sintonización, mientras que en el caso del DAS en tiempo se realiza la suma en banda ancha.

Por otro lado, la figura 16 derecha muestra la solución para el caso 2 a una frecuencia de 3KHz, que si recordamos el algoritmo anterior el resultado también creaba una fuente inexistente (recordemos que sólo hay una fuente en las coordenadas (10,10)) debido a que la frecuencia de sintonización es muy superior a la frecuencia máxima localizable por el array, tal y como sucedía en el DAS en el dominio temporal.

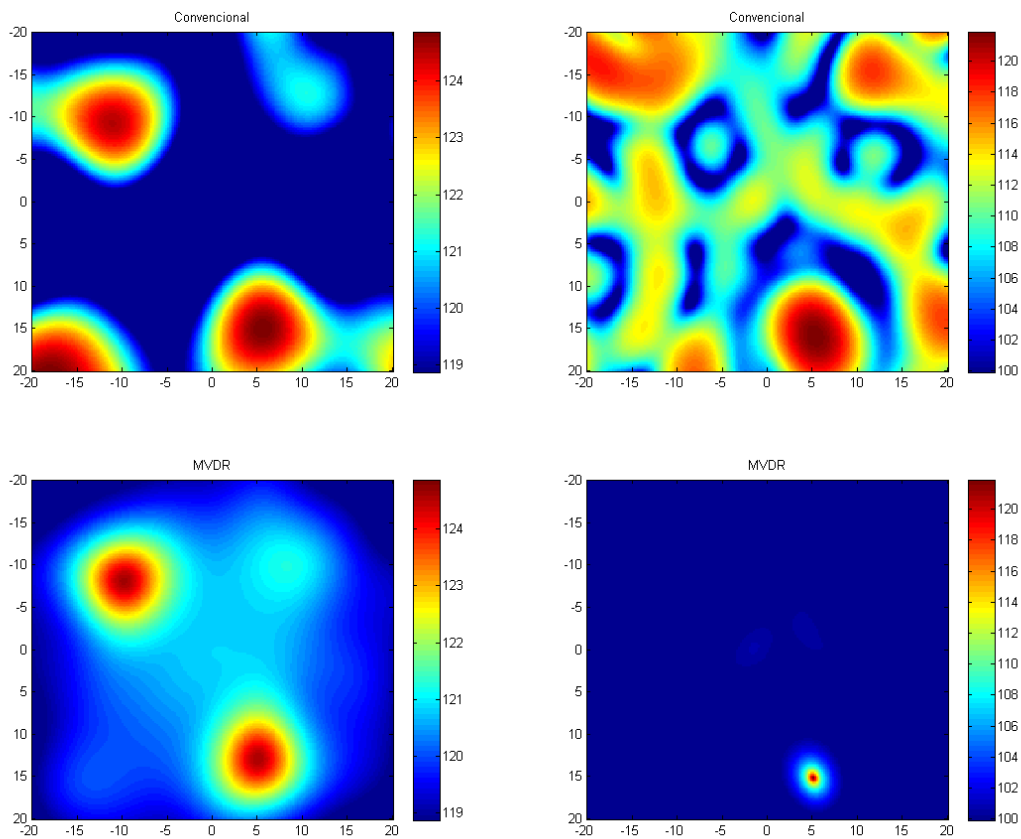
La conclusión que obtenemos de la comparación entre los 2 algoritmos es que los resultados son muy parecidos, sin embargo el algoritmo en frecuencia lleva menos carga computacional, por lo tanto es mucho más rápido. Además es más inmune al ruido de fondo ya que podemos seleccionar a la frecuencia a la que queremos sintonizar el algoritmo de localización, discriminando entre fuentes que emitan a distintas frecuencias.

## 4.2 SIMULACIONES 3D

Con el fin de asegurarse de la implementación y hacer una comparación entre los algoritmos descritos en el apartado anterior (convencional, MVDR y MUSIC) se preparó una sencilla prueba, la cual consiste en la realización de tres simulaciones, cada una de ellas con uno de los algoritmos, de una misma situación.

En esta situación disponemos de 2 fuentes de ruido. Una de ellas, situada en la posición  $(-10, -10, 40)$ , emite a una frecuencia de 1200 Hz, mientras que la otra fuente está situada en la posición  $(5, 15, 40)$  y emite a dos frecuencias distintas 1200 Hz y 2000 Hz. En estas simulaciones se ha utilizado un array espiral centrado en las coordenadas  $(0, 0, 0)$  colocado plano en el suelo. Esta disposición simula dos fuentes de ruido situadas en un plano paralelo a los sensores a una altura de 40 metros.

La decisión de este tipo configuración del array está basado en un estudio previo llevado a cabo en la Universidad de Delft [2], en el que llegan a la conclusión que el array en espiral es el que mejor resultados proporciona en una condiciones similares.



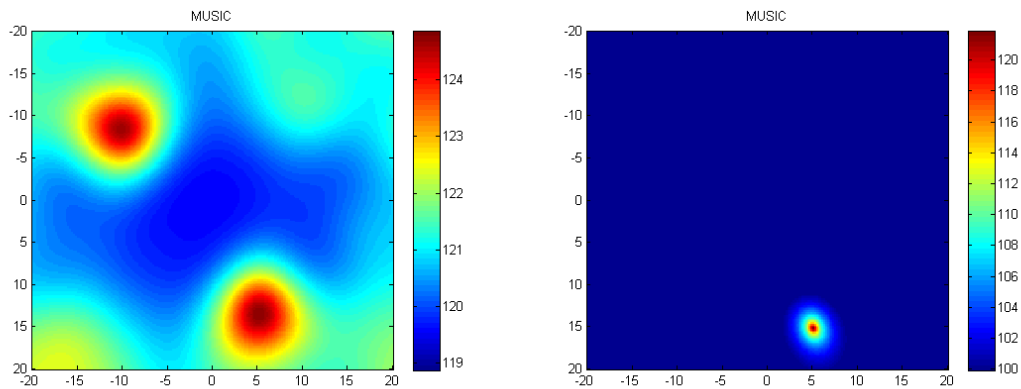


Fig 17. Resultado de la localización con los algoritmos Convencional, arriba, MVDR, en el centro y MUSIC, abajo, a la izquierda el resultado a 1200 Hz a la derecha 200 Hz.

Convencional mucho rango en 1200 pero crea localizaciones erróneas de valores comparables a las fuentes. Mientras que los otros 2 algoritmos tienen un rango dinámico mucho menor y también crean lóbulos secundarios, pero en este caso de mucho menor nivel que en el caso del convencional.

Por el contrario en el caso de la localización a 2000 Hz el rango dinámico es al revés, inferior en el caso del convencional. Además la localización tanto del MVDR como el MUSIC es muy “limpia” sin crear lóbulos, sin embargo la localización aportada por el algoritmo convencional crea muchos lóbulos.

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo de limpieza CLEAN descrito en el apartado anterior pasamos a idear una simulación en la que se pudiese ver su funcionamiento, para ello se situaron 3 fuentes de ruido, emitiendo a la misma frecuencia (1000 Hz), en un plano a 100 metros de distancia de los sensores, los cuales están centrados en las coordenadas (0, 0, 0) dibujando una espiral.

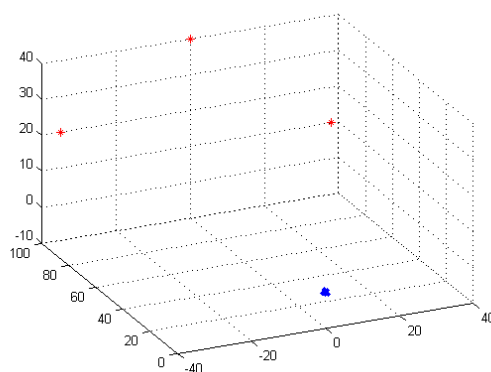
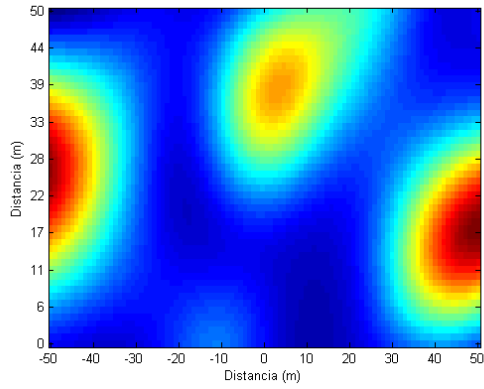


Fig. 18. Posición de las fuentes, en rojo, y los receptores, en azul, en la simulación.

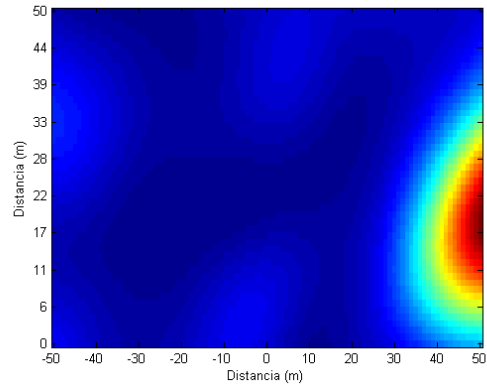
A continuación, la figura 19, muestra las etapas por las que pasa el algoritmo CLEAN, en la primera imagen(a), podemos observar el mapa de potencias obtenido mediante el algoritmo Convencional o de Barlett, el cual localiza 3 fuentes con diferentes potencias. Tras esta imagen, en (b) aparece el primer mapa que se sustrae al mapa original, dando como resultado el mapa (c). Este proceso se repite iterativamente hasta que se cumple el criterio de parada, en este



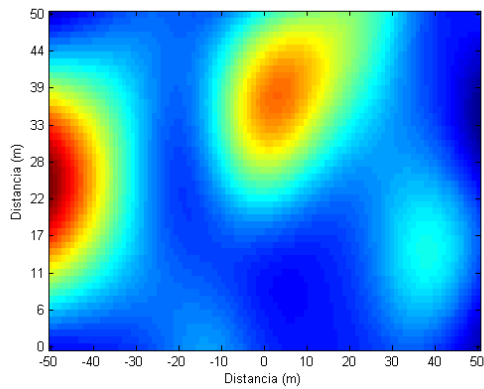
caso el mapa original se “limpia” 3 veces, es decir el bucle tiene 3 iteraciones. Los mapas de sustracción son las figuras (b) (d) y (f), mientras que las figuras (a), (c), (e) y (g) son la evolución del mapa de potencias desde la primera localización hasta que se considera que el mapa ya está “limpio”.



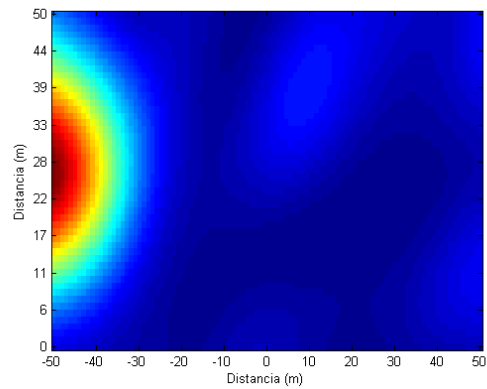
(a)



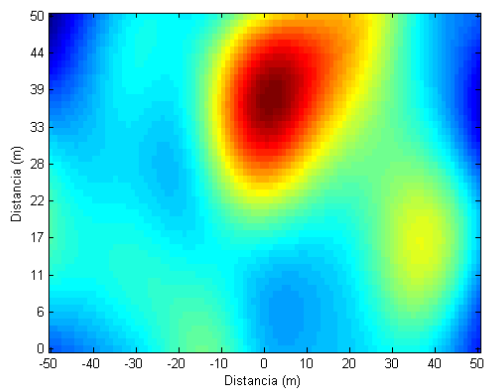
(b)



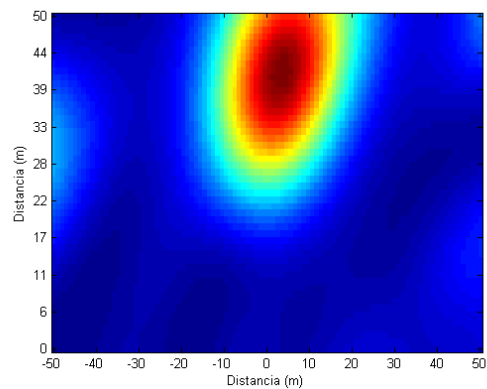
(c)



(d)



(e)



(f)

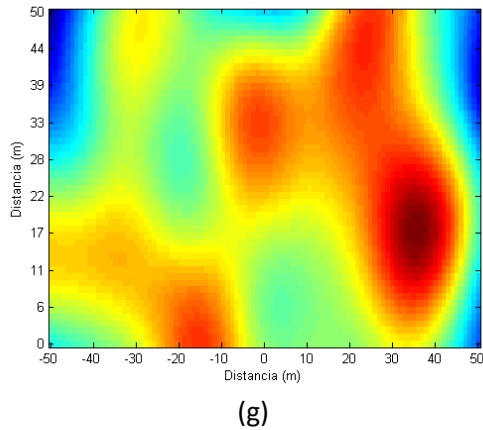


Fig 19. Resultado de la localización con el algoritmo Convencional y su “limpieza” posterior. Los ejes son metros.

## 5. SISTEMA DE MEDIDA

Previo a cualquier tipo de medidas, se consideró fundamental llevar a cabo una serie de pruebas controladas, tanto para la calibración del equipo como para estudiar la fiabilidad del procedimiento, pudiendo tener un mayor control sobre las distancias, fuentes, dimensiones del array, etc. Para ello, realizamos mediciones en espacio abierto, en una zona ajardinada.

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

El equipo con el que se realizó esta primera prueba fue el siguiente:

- 8 Micrófonos G.R.A.S tipo A40 (condensador).
- Previo de micrófonos Norsonic tipo 335 de 8 canales.
- 2 módulos de National Instruments modelo 9215 BNCde 4 canales.
- Módulo de adquisición COMPACTDAQ modelo CDAQ-9188de National Instruments.
- 1 Batería (SAI) para alimentar los dispositivos.
- 1 base para el array microfónico (plancha de aglomerado de 120x120 cm)\*.
- PC HP Probook portátil.
- Calibrador B&K tipo 4230.
- Envolverte de poliuretano (utilizado como paravientos para el array de micrófonos).

\*se utilizó una base, para eliminar las reflexiones del suelo, de acuerdo con la norma IEC 61400-11 [9].

Se realizaron dos tipos de calibraciones, una calibración de nivel, para obtener la sensibilidad de cada uno de los micrófonos, y otra de fase para asegurar que todos los micrófonos responden de igual manera.

## 5.1 CALIBRACIONES

### 5.1.1 Calibración de Nivel

Inicialmente, se procedió a calibrar todos los micrófonos con el fin de calcular su sensibilidad. Para ello se insertó cada micrófono dentro del calibrador, el cual emite una señal conocida de 1 KHz de frecuencia y un nivel de 1 Pascal eficaz. A su vez se registró dicha señal con una frecuencia de muestreo de 100.000 muestras/s durante 1 segundo.

El micrófono es un transductor que transforma la diferencia de presión en una señal eléctrica. En la figura 20 se puede observar la señal registrada en el micrófono 1 durante su calibración. Se observa perfectamente que la señal digitalizada se aproxima mucho a una onda sinusoidal de frecuencia 1 KHz y amplitud de 18 mV de pico.

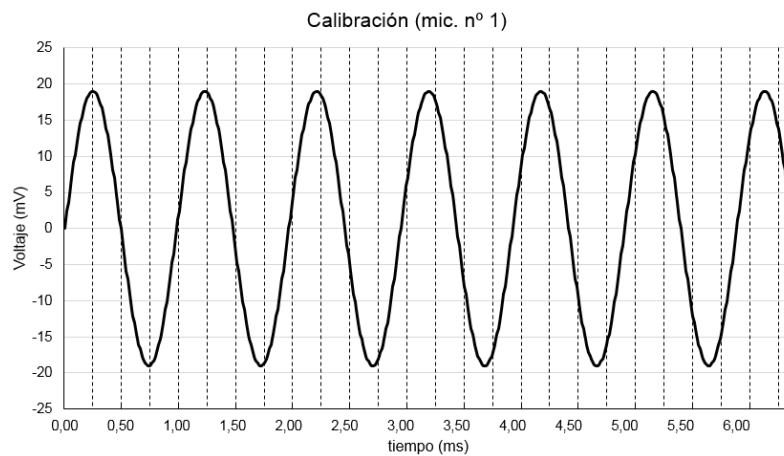


Fig. 20. Forma de onda en la calibración del micrófono 1.

Para realizar el cálculo de la sensibilidad de cada uno de los canales se llevó a cabo una serie de medidas en las que se registró 1 segundo de señal en cada uno de los micrófonos. El nivel de presión sonora del calibrador en el recinto interior (tras introducir el micrófono) es de 94 dB, lo cual corresponde a una presión acústica eficaz de 1 Pascal.

Puesto que el nivel equivalente de la señal del calibrador corresponde a 94 dB tenemos:

$$94dB = 20 \cdot \log \frac{P_{ef} (Pa)}{2 \cdot 10^{-5}}$$

A su vez la presión eficaz, en Pa, está relacionada con la presión eficaz, en V, a través de la sensibilidad (en V/Pa) mediante la siguiente expresión:

$$P_{ef} (Pa) = \frac{P_{ef} (V)}{S \left( \frac{V}{Pa} \right)}$$

Tenemos que:

$$S \left( \frac{V}{Pa} \right) = \frac{P_{ef} (V)}{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{94/20}} \approx P_{ef} (V)$$

Tras llevar a cabo todos los cálculos descritos anteriormente, se obtuvieron los siguientes valores para la sensibilidad de cada uno 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

Tabla 1. Sensibilidad de los micrófonos

Por norma, un micrófono de tipo I no debe superar el margen de  $\pm 1$  dB a 1kHz. Como vemos, cada micrófono tiene una sensibilidad distinta, por lo que deberemos ser minuciosos con el orden y la etiquetación de esta instrumentación.

### 5.1.2 CALIBRACIÓN EN FASE

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 del uso de técnicas de Beamforming es importante que no existan desfases entre los diferentes micrófonos.

Al no disponer de sistema de calibración de fase para los micrófonos, se idearon una serie pruebas controladas con señales pseudoimpulsivas (petardos), fuentes que han mostrado buenos resultados en múltiples aplicaciones acústicas [10]. Se eligió este tipo de fuente debido a que son bastante omnidireccionales o, mejor dicho, 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) con el fin de intentar minimizar las reflexiones.

La impulsividad de las señales utilizadas permite separar muy bien el sonido directo y posteriores reflexiones. La absorción del suelo (también separable en los registros) es, además, bastante alta.

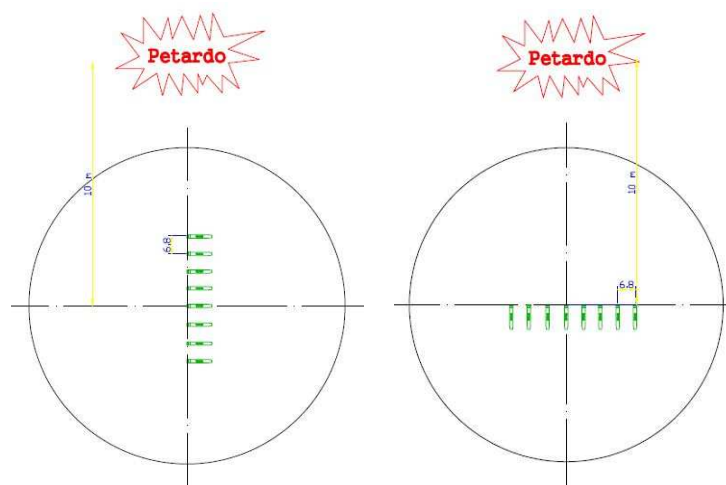


Fig.21 Distancia desde la fuente al array microfónico y disposición de éste (distancia entre micrófonos: 6,8 cm)

En todos los casos, la distancia entre los micrófonos fue de, exactamente, 68 mm. La frecuencia de muestreo (para cada canal) fue de 100.000 muestras por segundo. Ello implica una resolución espacial de

$$c \cdot \Delta t = 340.000 \frac{mm}{s} \cdot 10^{-5} s = 3,4mm$$

Por ejemplo, para una señal sinusoidal de frecuencia 1 kHz que llega simultáneamente a dos micrófonos, la diferencia en una muestra implicaría un desfase máximo de:

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

La precisión en la fase aumentaría al disminuir la frecuencia de la señal y disminuiría al incrementarse la frecuencia. Como expresión general, el desfase que implicaría una muestra (a la frecuencia de muestreo de 100.000 muestras por segundo sería de:

$$\frac{2\pi \cdot f}{100.000}(rad)$$

Para la primera disposición del array (figura 22 izq.) se hicieron explotar dos petardos a una distancia de 10 m del micrófono más próximo (10,48 m, aproximadamente, del más alejado). Se registraron 10 s de señal, lo que conlleva registros de 1.000.000 de muestras por canal (8 canales). Análogamente, se hicieron explotar dos petardos a una distancia de 10 m del micrófono más próximo (el central) para la segunda disposición del array.

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. Tras dicha programación, solo se requiere copiar los registros de las señales de cada medida.

Las figuras 22 y 23 muestran los registros (únicamente durante 2,5 ms, es decir 250 muestras) de los 8 micrófonos para los dos petardos explotados con la configuración 1 (en línea a la fuente).

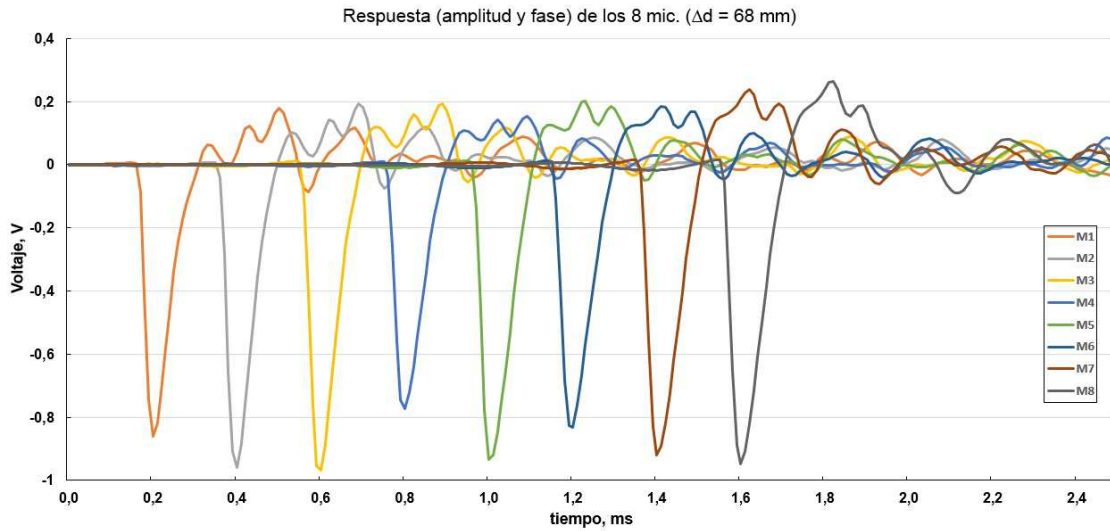


Fig. 22. Registro de la entrada durante la explosión del primer petardo de los 8 micrófonos

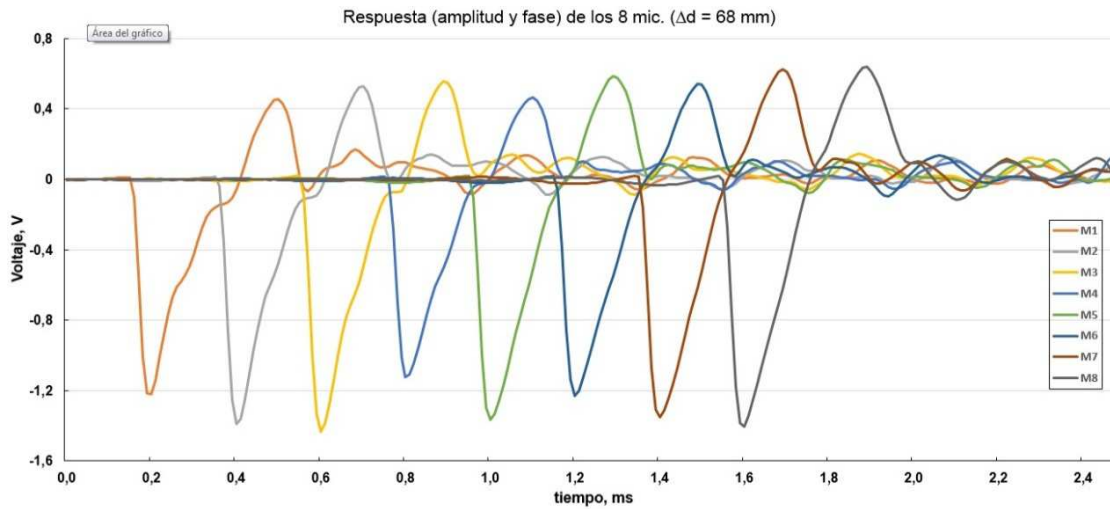


Fig. 23. Registro de la entrada durante la explosión del segundo petardo de los 8 micrófonos

Los dos registros son muy similares, con ligeras diferencias en el nivel de la señal (diferente potencia acústica de cada petardo) así como en la forma, la cual, probablemente, sea dependiente del nivel de la señal, debido a efectos de constante recuperadora de la membrana microfónica.

Puede resultar algo sorprendente la diferencia de niveles en los diferentes micrófonos, cuando la distancia entre fuente y micrófonos no la justifica. Esto es debido a que falta corregir los voltajes medidos por la sensibilidad de cada micrófono, obtenida en un apartado anterior. Cuando se representan los niveles sonoros (ya en dB, con referencia de 20  $\mu$ Pa, y corregidos por la sensibilidad) obtenemos las gráficas mostradas en las figuras 24 y 25.

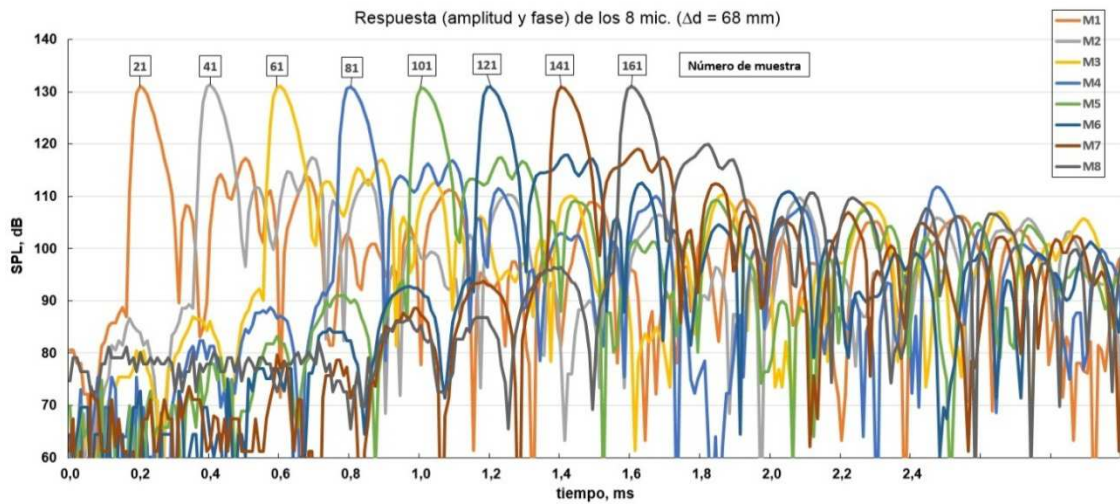


Fig.24. Registros temporales (NPS) para el primer petardo en la primera configuración del array de micrófonos

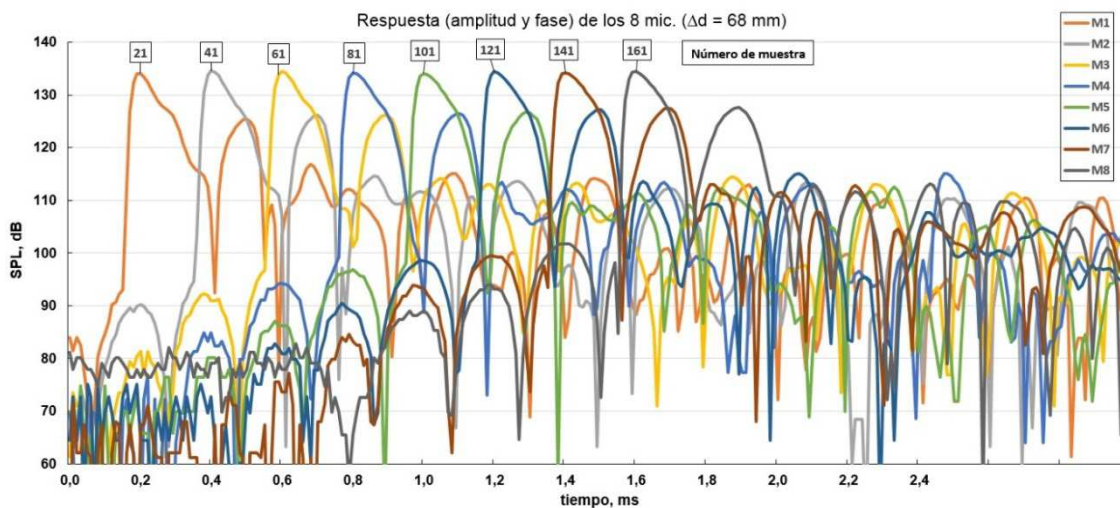


Fig.25. Registros temporales (NPS) para el segundo petardo en la primera configuración del array de micrófonos

Como observamos, 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  $\frac{68(mm) \cdot 10^{-3}(m/mm) \cdot 100.000(muestras)}{340(m)} = 20(muestras)$ .

Como muestran las figuras 24 y 25, 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°, en su fase, ante señales pseudoimpulsivas.

Para la segunda disposición (ver figura 26), con el array perpendicular a la línea que une el centro del array con la fuente impulsiva, se obtuvieron, respectivamente, las figuras 26 y 27. 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 de una muestra entre los máximos de la señal, como así se observa en las gráficas. Por otra parte, la apertura angular del array, desde la fuente es  $1,37^\circ$ , 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.

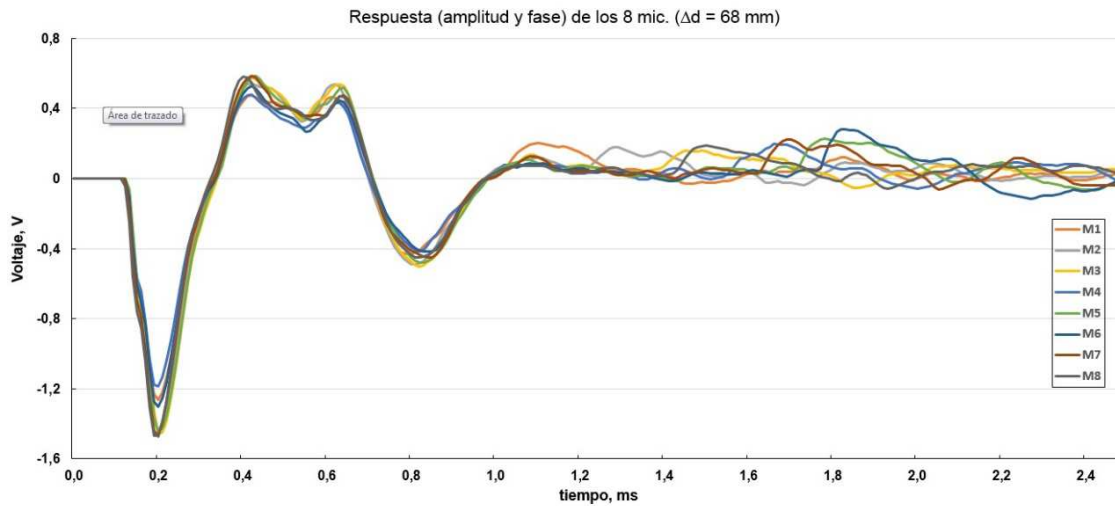


Fig. 26. Registros temporales para el primer petardo en la segunda configuración de array

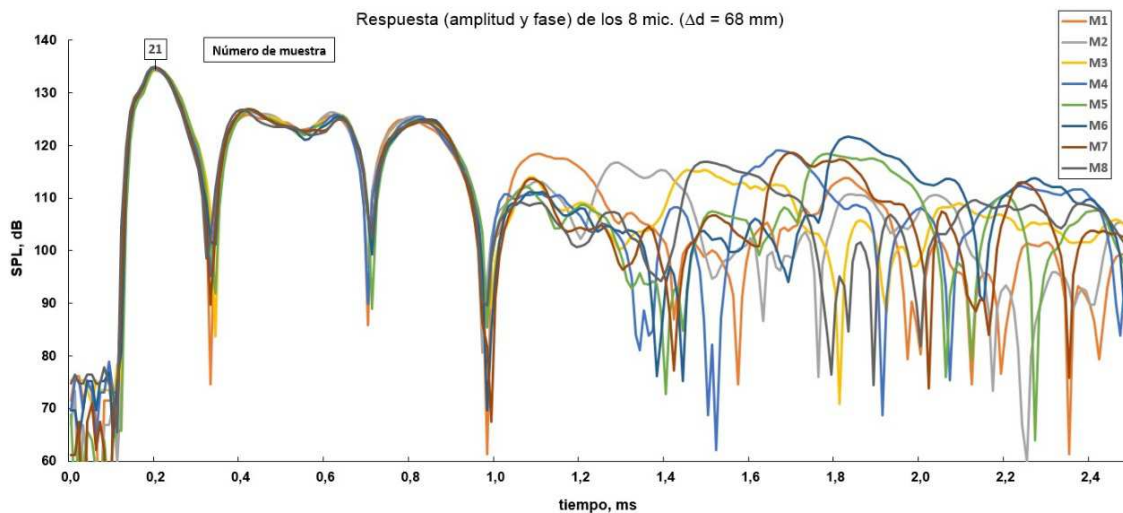


Fig.27 Registros temporales (NPS) para el primer petardo en la segunda configuración del array



## 6. RESULTADOS

### 6.1 MEDIDAS DE CAMPO CON FUENTES EN MOVIMIENTO EN 2D

Un 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, utilizando 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. El array microfónico está formado por 8 micrófonos G.R.A.S tipo A40, separados por una distancia constante de 6.8 cm formando una línea recta.

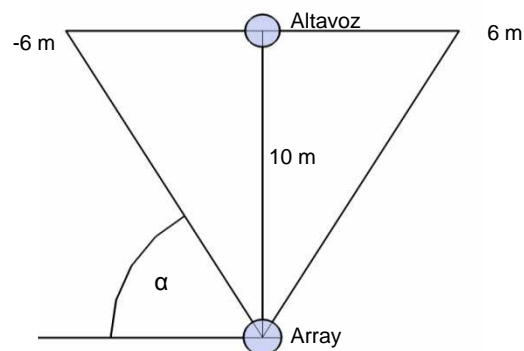


Fig. 28. Esquema del estudio de localización de la fuente en movimiento.

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.

Para este experimento se eligieron 2 tipos de ruido distintos, por un lado se realizaron pruebas con tonos puros de 500, 1000 y 2000 Hz, mientras que por otro lado se realizó una medición con ruido blanco.

Tal y como hemos comentado anteriormente en debemos tener en cuenta la configuración del array para ver cuáles son las de frecuencia mínima y máxima que puede localizar el array diseñado.

$$f_{max} = \frac{c}{2d} \qquad f_{min}(30^\circ) = \frac{2c}{D}$$
$$f_{max} = \frac{340}{2 * 0.068} = 2500 \text{ Hz} \qquad f_{min}(30^\circ) = \frac{2 * 340}{0.476} = 1429 \text{ Hz}$$

Con este array deberíamos poder localizar frecuencias entre 1429 y 2500 Hz.

### 6.1.1 Tonos puros

El primer paso para localizar la fuente de ruido es intentar identificar nuestra fuente de ruido, para ello realizamos una FFT de uno de los canales de grabación y observamos su espectro. En el caso que estamos estudiando se trata de tonos puros, por lo que son fácilmente identificables.

En la figura 29, 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 ( $60^\circ$ ) hasta la posición +6 metros ( $140^\circ$ ).

En todos los casos 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  $0.5^\circ$  del movimiento de la fuente.

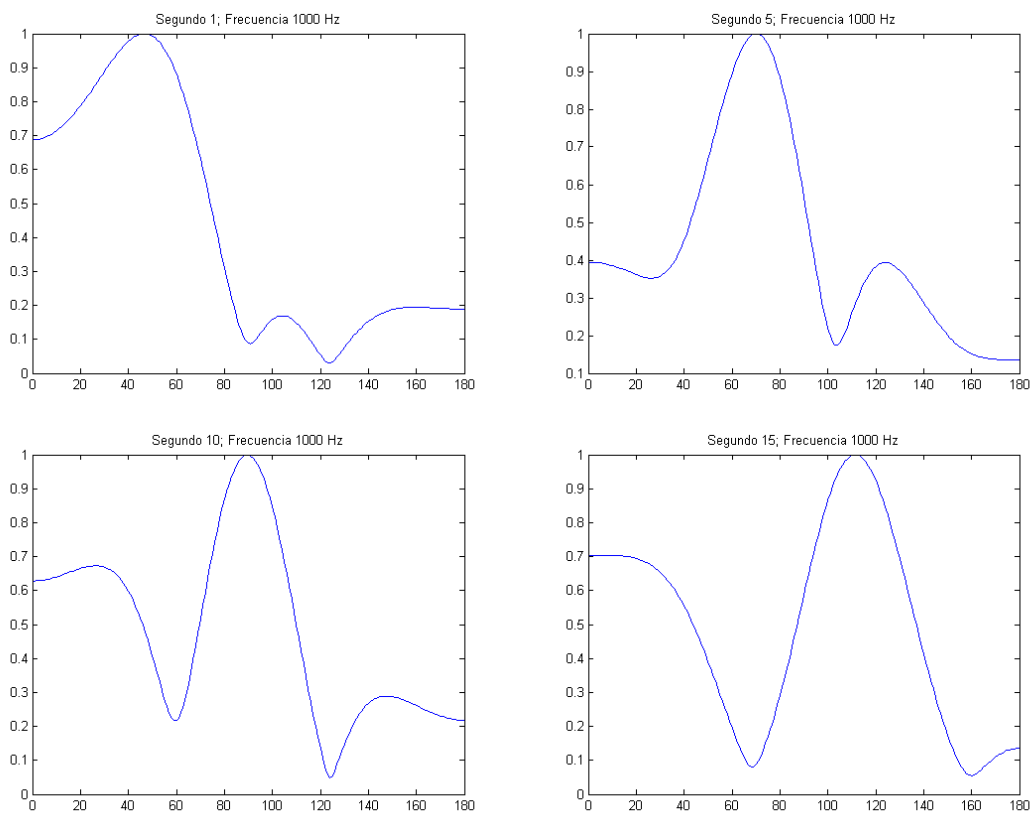


Fig. 29. Ángulo que indica la dirección de la fuente en distintos instantes de tiempo de la grabación (1, 5, 10 y 15 segundos). Eje x representa el ángulo de llegada en grados. Eje y unidades arbitrarias.

Al igual que en la imagen 29, la imagen 30, muestra la evolución temporal del ángulo de llegada del ruido, para los instantes 1, 5, 10 y 15 segundos, pero a la frecuencia de 500 Hz. En este caso no se aprecia bien el movimiento de la fuente, es debido al tamaño del array, ya que estamos intentando localizar una frecuencia por debajo de la frecuencia mínima del array.

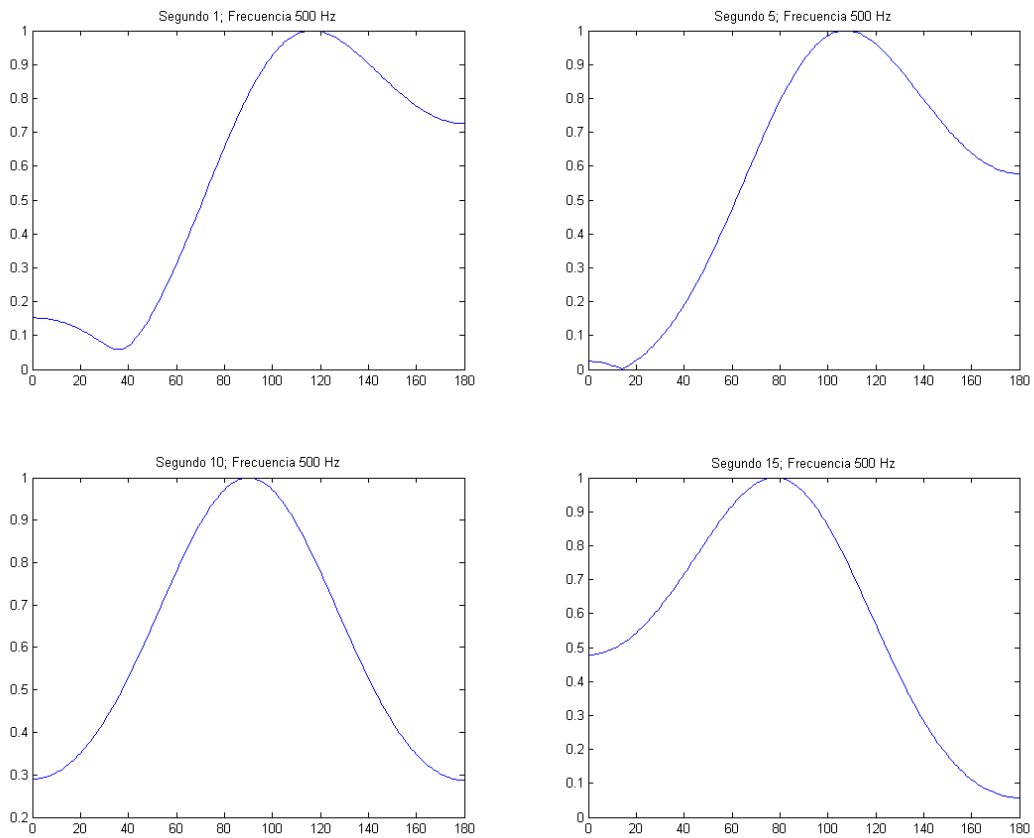
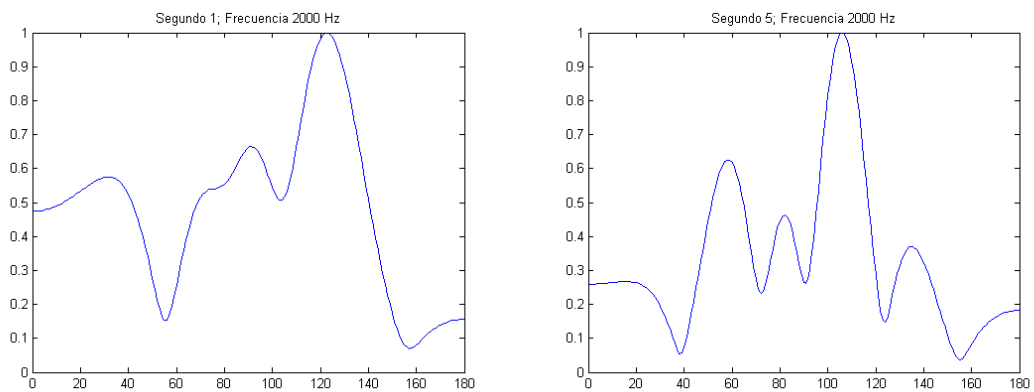


Fig. 30. Ángulo que indica la dirección de la fuente en distintos instantes de tiempo de la grabación (1, 5, 10 y 15 segundos). Eje x representa el ángulo de llegada en grados. Eje y unidades arbitrarias.

Sin embargo, la imagen 31 que muestra la frecuencia de 2000 Hz, sí que localiza bien la fuente de ruido, en este caso se desplaza desde 130° hasta 50°. Además empiezan a aparecer lóbulos secundarios debido a que nos acercamos a la frecuencia máxima localizable por el array.



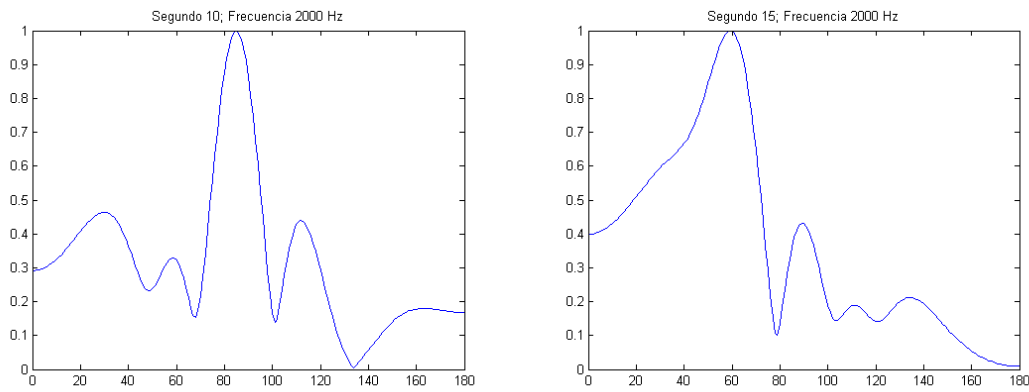
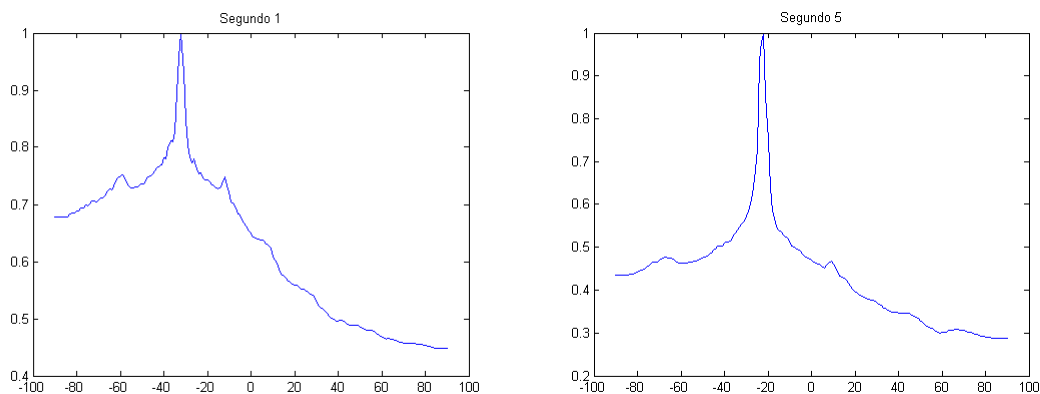


Fig. 31. Ángulo que indica la dirección de la fuente en distintos instantes de tiempo de la grabación (1, 5, 10 y 15 segundos). Eje x representa el ángulo de llegada en grados. Eje y unidades arbitrarias.

### 6.1.2 Ruido blanco

Debido a que la potencia del espectro del ruido blanco es plana, o dicho de otra forma, que no tiene ninguna frecuencia dominante no se debe utilizar el algoritmo DAS en el dominio frecuencial, sino que es mejor utilizar el algoritmo en el dominio temporal.

En la figura 32 se muestra la solución del algoritmo DAS para los mismo 4 instantes de tiempo (segundos 1, 5, 10 y 15). Al tratarse de un ruido de ancho espectro se suman las características propias de las fuentes de baja frecuencia, base del lóbulo de localización ancho, y las de alta frecuencia, punta del lóbulo estrecha.



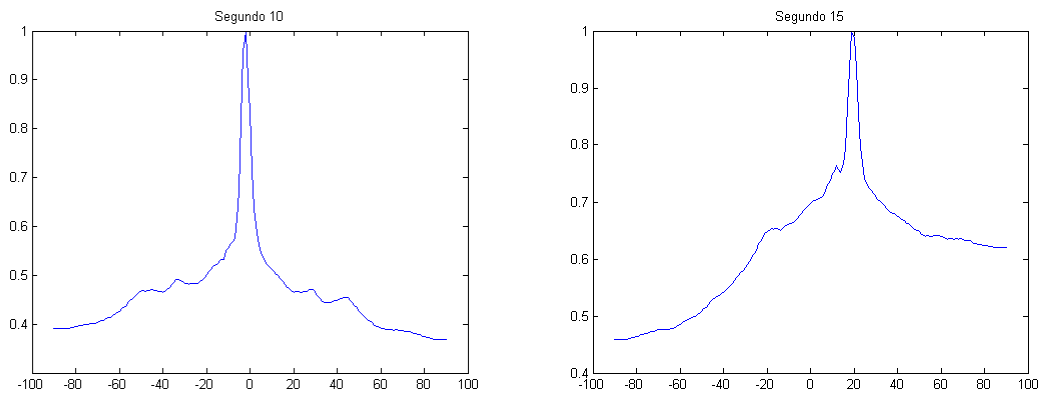


Fig. 32. Ángulo que indica la dirección de la fuente en distintos instantes de tiempo de la grabación (1, 5, 10 y 15 segundos). Eje x representa el ángulo de llegada en grados. Eje y unidades arbitrarias.

## 6.2 MEDICIONES 3D.

Tal y como se hizo para los algoritmos en 2 dimensiones, se ideó una serie de pruebas para estudiar el comportamiento de los algoritmos tridimensionales: el algoritmo convencional, MVDR y MUSIC.

Para ello se contó con el siguiente dispositivo experimental:

- 13 Micrófonos G.R.A.S modelo A40 y 1 AKO modelo XXX, todos ellos de condensador.
- Preamplificador de micrófonos Norsonic tipo 335 de 16 canales.
- 4 módulos de National Instruments modelo 9215 BNC de 4 canales.
- Módulo de adquisición COMPACTDAQ modelo CDAQ-9188 de National Instruments.
- 1 soporte para el array micrófonico formando una cuadrícula.
- PC HP Probook portátil.
- Software LabView

Como punto de partida se planteó diseñar un array que localizase fuentes de ruido entre los 800 y los 2500 Hz, para ello se realizó unos breves cálculos dando como resultado la siguiente disposición de receptores dentro del array:

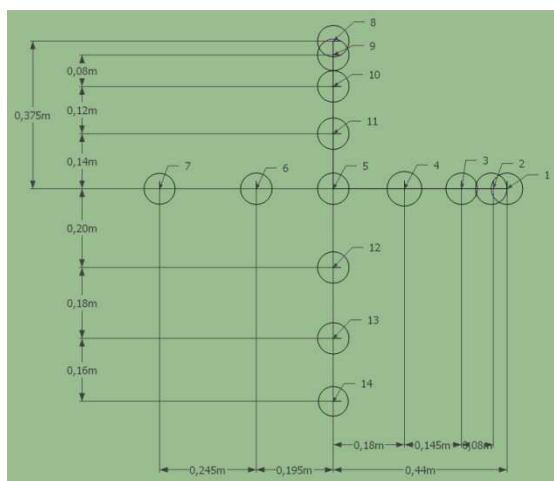


Fig. 33. Disposición de los sensores que forman el array.

Con el array ya definido, se pasó a revisar si los cálculos habían sido correctos, obteniendo como resultado una frecuencia mínima de 770 Hz y una máxima de 2800 Hz, por lo que los objetivos se vieron cumplidos. Aunque no debemos olvidar que las características a tener en cuenta a la hora de diseñar el array nos indica que debemos disponer de 30 micrófonos. En nuestro caso no disponemos de tanto equipo de medida, por lo que se decidió continuar con el sistema propuesto para ver los resultados.

$$f_{max} = \frac{c}{2d} f_{min}(30^\circ) = \frac{2c}{D}$$

$$f_{max} = \frac{340}{2 * 0.03} \approx 2800 \text{ Hz}$$

$$f_{min}(30^\circ) = \frac{2 * 340}{0.88} \approx 770 \text{ Hz}$$

Numero de receptores necesarios (para la localización de todas las frecuencias entre  $f_{min}$  y  $f_{max}$ )

$$0.88/0.03 = 29.33 \rightarrow 30 \text{ receptores}$$

Para estudiar el comportamiento del sistema de adquisición se realizaron varias configuraciones distintas de fuentes y frecuencias de emisión, como en los casos anteriores se eligieron tonos puros como señal de emisión. Las frecuencias de emisión van desde los 800 Hz hasta los 2100 Hz. En la tabla X podemos ver los diferentes casos medidos, en los que se especifica si las fuentes emiten o no y a qué frecuencia emiten.

Se colocaron 3 fuentes fijas de ruido en 3 ventanas del laboratorio y se situó el array en una zona ajardinada a 20 metros de la pared en la que están situadas las ventanas. Las fuentes están ubicadas a una altura de unos 9 metros sobre el suelo.

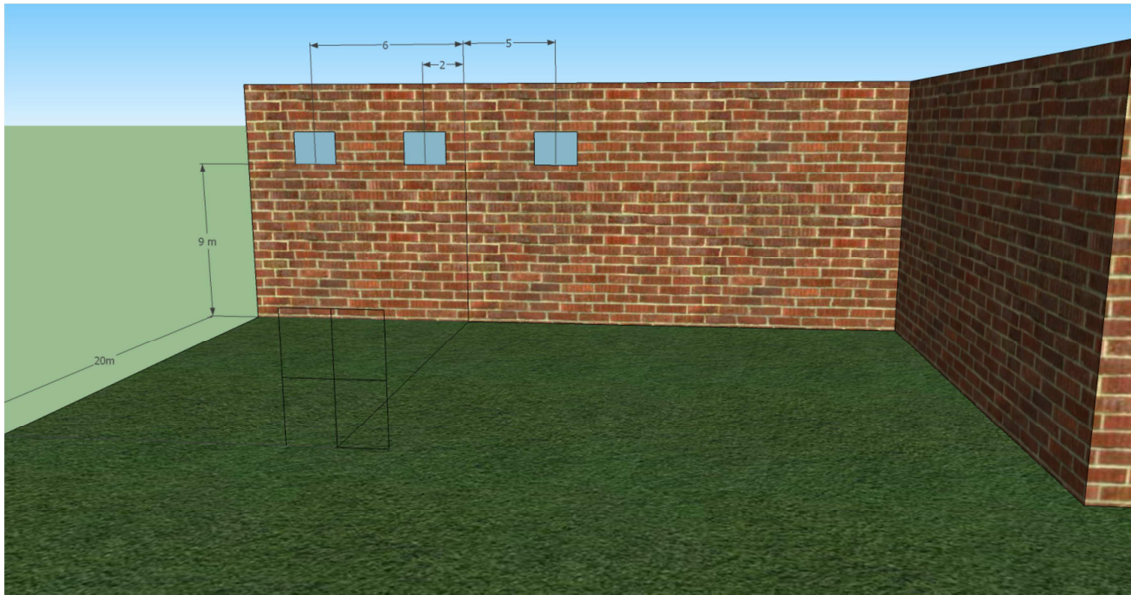


Fig. 34. Representación espacial de las fuentes (ventanas) y el array (rejilla) con sus distancias.

CASO	FUENTE 1	FUENTE 2	FUENTE 3
A	1500	-	-
B	1500	800	-
C	1500	800	2100
D	2100	1500	800
E	800	2100	1500
F	-	1700	1700
G	900	-	1200
H	1400	1400	1400
I	1700	900	1700
J	900	-	-
K	Las 3 fuentes la misma frecuencia, se encienden consecutivamente		
Movimiento	Movimiento de una fuente arriba y abajo		
Movimiento 2	Movimiento pendular		

Tabla 2. Distintos casos que se llevaron a cabo durante las mediciones.

De los micrófonos utilizados se tuvieron que eliminar todos los registros de 2 de ellos, el primer micrófono, el número uno, es debido a que la señal registrada tiene un nivel de continua muy elevado (0.5 V). La eliminación del otro de los micrófonos, el número 14, puede ser debido a que se trataba de otro modelo distinto de micrófono (AKO) y que debido a que sus dimensiones su colocación en el plano Y no fuese la misma que la del resto de los micrófonos, lo que puede provocar diferencias en la fase.

A continuación se muestran algunos de los resultados de las mediciones realizadas, se muestra las soluciones del algoritmo MUSIC en todas ellas, tal y como se ha visto en el apartado de las simulaciones se trata de uno de los algoritmos con mejores resultados. Para facilitar su interpretación se han añadido simulaciones de las mismas configuraciones

Caso C.

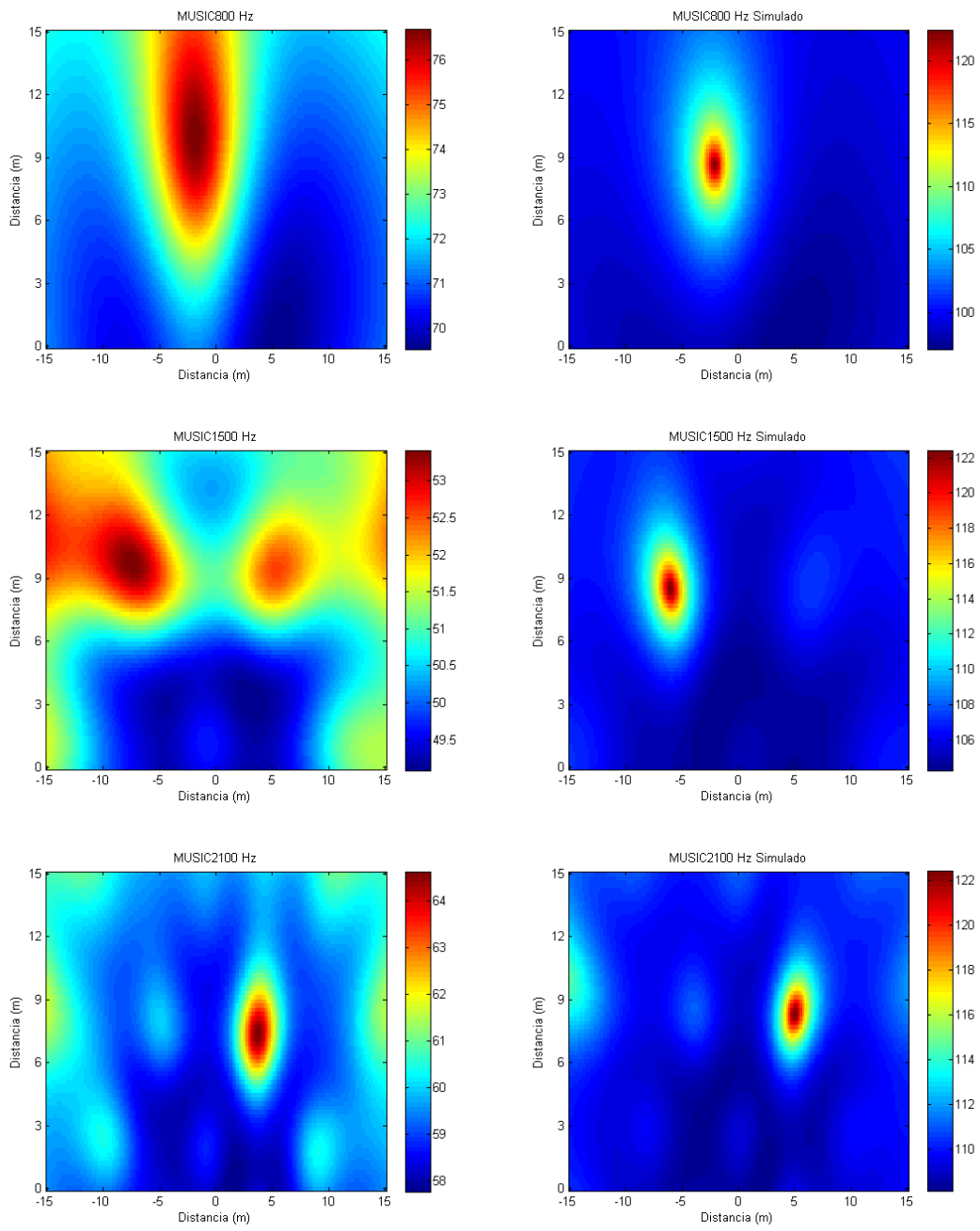


Fig. 35. Resultado del algoritmo MUSIC para el caso C en medición y simulado, para las 3 frecuencias a estudio.



## Caso D

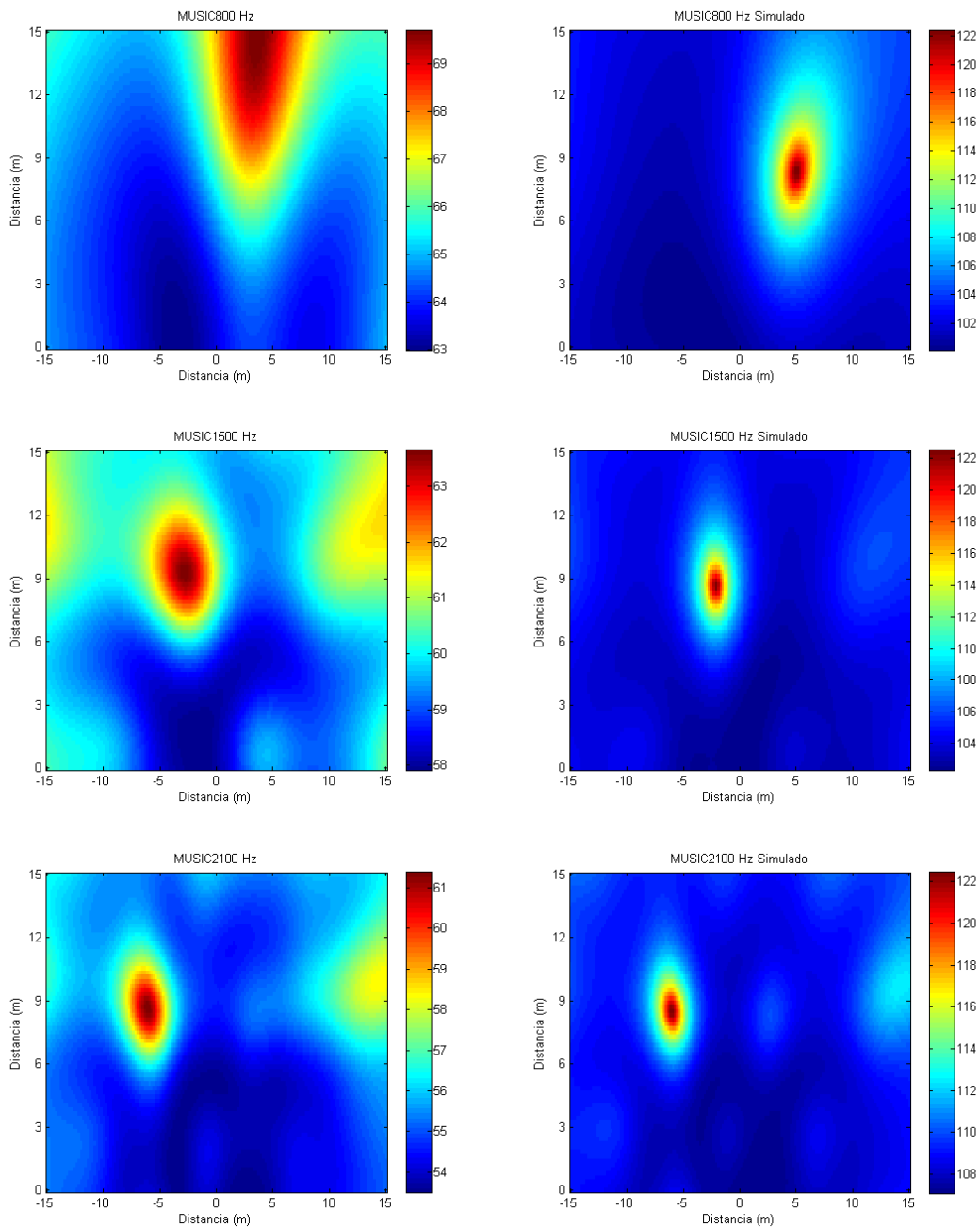


Fig. 36. Resultado del algoritmo MUSIC para el caso D en medición y simulado, para las 3 frecuencias a estudio.

Lo primero que llama la atención en las figuras 35 y 36, son las diferencias de tamaño de las localizaciones de las fuentes dependiendo de la frecuencia de sintonización. A menor frecuencia mayor es el área de influencia. Otra cuestión a destacar es la deslocalización de la fuente a baja frecuencia. Este algoritmo localiza aproximadamente en uno de los ejes (el X), mientras que en el otro (eje Z) comete bastante error (normalmente la localización es demasiado alta).

También llama la atención es la aparición de lóbulos secundarios en las mediciones, sobre todo en las frecuencias de 1500 y 2100 Hz, aunque si observamos las simulaciones vemos como también aparecen, aunque de menor nivel, estos lóbulos secundarios. Por lo que llegamos a la conclusión de que algunos de los lóbulos son propios del par algoritmo-array.

Buscando una explicación a la aparición de los lóbulos anteriormente comentados se decidió simular la misma situación que en el caso anterior, pero cambiando la configuración del array de medida, el nuevo array sigue una distribución en forma de espiral. El resultado de estas simulaciones para los casos C y D a la frecuencia de 2100 Hz se muestra en la figura 37. Se puede apreciar como desaparecen las zonas azules claras de las simulaciones, por lo que creemos que los lóbulos secundarios, en este caso, dependían de la distribución del array.

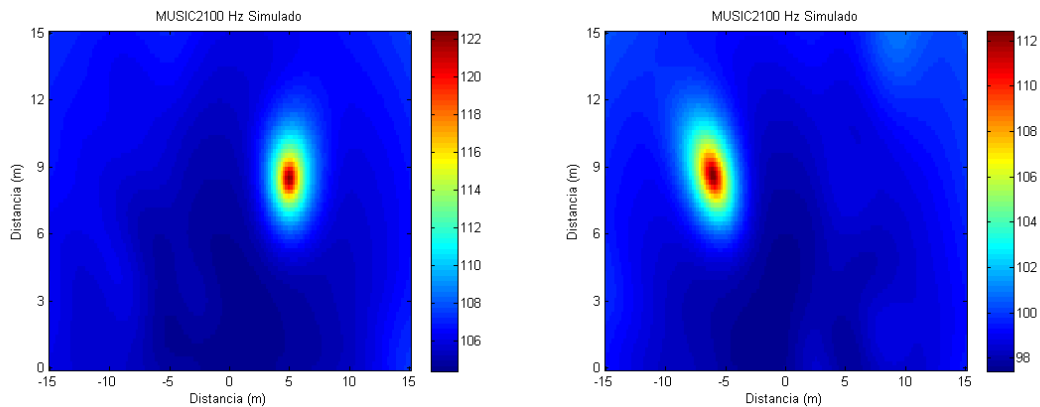


Fig. 37. Resultado del algoritmo MUSIC para el caso C (izq.) y D (dcha.) simulado, para la frecuencia de 2100 Hz.

Debemos tener en cuenta algunas consideraciones, como puede ser que haya alguna diferencia a la hora de comparar la localización de las fuentes entre las mediciones y las simulaciones. Esto es debido a que las medidas llevadas a cabo para posicionar las fuentes, durante las mediciones, fueron difíciles de realizar, por lo tanto sus coordenadas son aproximadas. Otra cuestión es que no se pueden comparar las potencias entre simulaciones y medidas, ya que no se registró la potencia de emisión de cada una de las fuentes, por lo que se decidió simular todas las fuentes y a todas las frecuencias con una potencia de 1 Watio.

## **7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

Este trabajo ha servido para introducirnos en el campo de la localización de fuentes de ruido, diseño de arrays, calibración de sistemas de adquisición de datos, etc. A su vez, se ha realizado un estudio sobre los algoritmos de Beamforming más usados, se ha comprendido su funcionamiento y se han implementado.

Se han realizado una serie de simulaciones en las que se ve el correcto funcionamiento de los algoritmos desarrollados.

Se elaboró un diseño del array microfónico con parámetros óptimos y suficientes para realizar las mediciones de prueba. A pesar de tener menos recursos de lo requerido, el array utilizado nos ofrece una localización lo suficientemente buena.

Se lograron localizar fuentes de ruido mediante programas en Matlab tanto en 2 como en 3 dimensiones y en Labview en 2D. Se pudieron localizar fuentes de ruido estáticas y dinámicas en las mediciones de prueba.

Se encontró una relación en la anchura de lóbulos de las localizaciones entre el número de micrófonos y la frecuencia analizada.

Se puede concluir en que con el poco equipo disponible se pueden localizar ruidos en situaciones contraladas (campo libre, tonos puros, etc.).

### **Líneas futuras**

Una de las primeras actuaciones podría ser la de añadir una cámara de video sincronizada al array microfónico para poder hacer una grabación del entorno. De esa manera, se podría ver la correlación entre los eventos visuales y los audibles, siempre teniendo en cuenta la diferencia de velocidad de propagación de la luz y del audio.

Una segunda posibilidad sería la de establecer dos o más arrays microfónicos con el objetivo de mejorar la localización.

Otra 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.

Por último, sería también de interés optimizar los algoritmos para dar lugar a localizaciones más rápidas, con el objetivo de poder localizar en tiempo real.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Phased array beamforming applied to wind tunnel and fly-over tests. P. Sijtma. International Noise and Vibration Congress, Brasil. Octubre 2010.
- [2] A low cost, high resolution acoustic camera with a flexible microphone configuration. R. van der Goot, et al. BEBEC 2012.
- [3] Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines. S. Oerlemans, Ph. Thesis, University of Twente, ISBN 978-90-806343-9-8. The Netherlands, 2009.
- [4] Acoustic Array Systems: Theory, Implementation, and Application. Mingsian R. Bai, Jeong-Guonlh, Jacob Benesty. Editorial John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-82723-9. Abril, 2013.
- [5] High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. J. Capon, Proc. IEEE, vol. 57, pp. 1408 -1418 , 1969.
- [6] Multiple emitter location and signal parameter estimation. R. O. Schmidt, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 34, pp. 276-280, 1986.
- [7] CLEAN based on spatial source coherence. P. Sijtsma. Nota técnica del National Aerospace Laboratory NLR. 2007.
- [8] Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. Högbom, J.A. Astron. Astrophys. Suppl., No. 15, pp. 417-426. 1974
- [9] IEC 61400-11, Wind turbines- Part 11: Acoustic noise measurements techniques, 2012, Geneva, Switzerland.
- [10] Calculating the impulse response in rooms using pseudo-impulsive acoustic sources. M. Arana, A. Vela, L. San Martin. ACUSTICA - Acta Acustica, 89 pp.377-380, 2003.