

MICRÓFONO DIRECCIONAL BASADO EN BEAMFORMING EN TIEMPO REAL

Ricardo Madeira²; Pablo Alloza²; José Liaño²; Gonzalo García²; Lucille Lamotte¹
²Álava Ingenieros, Albasanz 16, 28037 Madrid; ¹ MicroDB, 28 chemin du petit Bois, F-69130 Francia

1. RESUMEN

La técnica de 'beamforming' acústico mediante array de micrófonos se utiliza ampliamente en muchos sectores como un método rápido, preciso y validado para la localización de fuentes de ruidos. En el presente documento se expone una nueva técnica basada en el beamforming cuya ventaja fundamental, respecto a los sistemas convencionales actualmente presentes en el mercado, radica en la simplificación del método de cálculo y del array que, junto con el empleo de micrófonos *electrets*, supone una drástica reducción en el coste de esta tecnología.

2. ABSTRACT

The technique of acoustic 'beamforming' using microphones array is widely used on many sectors as a fast, accurate and validated method for localization of noise sources. This document introduce the basic concepts of a new method based on beamforming whose main advantage, compared to other typical methods available on the market, relies on the simplification of both method and array, which together with the use of electret microphones, results on a drastic reduction on the cost of such technology.

3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

El objetivo de este artículo es presentar y evaluar una nueva técnica de localización de fuentes de ruido para diagnosis in situ basada en 'beamforming'. En los últimos años muchos fabricantes de instrumentación del sector de la acústica y las vibraciones han sacado al mercado soluciones de detección y localización de fuentes de ruido basadas en la técnica del 'beamforming' y el uso de diferentes formatos de arrays de micrófonos, abriendo un nuevo mercado que sigue en crecimiento alimentado por la implementación de nuevas aplicaciones en multitud de escenarios (automoción, aerogeneradores, bancos de ensayo, grandes entornos industriales, ...) y multitud de análisis (Filtrado, cálculo de órdenes, pass by, psicoacústica, ...) La técnica descrita en este artículo se engloba un paso por debajo de las citadas soluciones de detección y localización de fuentes de ruido, ya que es un sistema compacto con un único array para evaluación in situ; este sistema nace para ocupar el espacio entre un sonómetro y las soluciones multicanal de detección de fuentes; el sistema está orientado a una evaluación en tiempo real de las fuentes de ruido presentes, localizándolas espacialmente y cuantificándolas en el dominio de la frecuencia de una forma rápida y sencilla.. Además, estamos ante un sistema de bajo coste, el formato del array permite un menor número de canales, y el uso de micrófonos tipo electret reducen el precio final del equipo.

4. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS Y SUS FACTORES DE ELECCION: ESTADO DEL ARTE

En la actualidad existen diferentes técnicas para cuantificar y detectar la posición espacial de una o más fuentes sonoras. Los métodos más comunes son: Intensimetría, 'beamforming' y holografía regular e irregular:

- La intensidad sonora es la energía por unidad de tiempo (1 s) que fluye a través de un área unitaria (1 m²) y se representa por un vector (magnitud y dirección). Se puede medir con dos tipos de sondas: sondas P-P, basada en dos micrófonos separados por

un espaciador de longitud conocida (la más utilizada) y sondas P-V, constituidas un micrófono y una sonda que mide directamente la velocidad de partícula.

- La técnica 'beamforming' se utiliza en varios campos: radiofrecuencia (antenas directivas), acústica submarina (sónares), localización de fuentes sonoras y micrófonos de alta directividad. Consiste en la utilización de un array de micrófonos y un sistema de adquisición multicanal que graba simultáneamente la señal de todos los micrófonos. Con un procesamiento, que se puede realizar en el dominio del tiempo o de la frecuencia, se obtiene un mapa sonoro de la fuente. Los arrays incluyen una cámara de vídeo lo que permite superponer el mapa sonoro sobre la imagen real. Dado que se requiere un amplio procesamiento de la señal, inicialmente los sistemas no trabajaban en tiempo real, siendo necesario tres pasos: grabar, postprocesar y representar/analizar. Hoy en día varios fabricantes (GFAi, LMS, HEAD Acoustics, microDB,..) tienen ya desarrollados sistemas que son capaces de mostrar las imágenes en tiempo real.
- La holografía acústica está basada en las propiedades de las ondas evanescentes. El método consiste en realizar mediciones de presión sonora en campo cercano en puntos de medida equidistantes (holografía regular) o en puntos no equidistantes (holografía irregular). Después, tras una formulación matemática compleja, se proyecta tanto hacia la fuente como alejándonos de la fuente obteniendo la presión sonora en los diferentes puntos del espacio.

Para la elección de uno u otro método se deben tener en cuenta varios factores, a destacar: resolución espacial, distancia hacia la fuente, entorno, rango de frecuencias y si estamos frente a un ruido estacionario o transitorio:

- Resolución espacial: capacidad para separar dos fuentes sonoras. Es la distancia mínima que debe existir entre dos fuentes de ruido diferenciadas para que el sistema sea capaz de identificarlas de forma independiente y no como una única fuente. Cuanto menor sea esta distancia, mejor resolución espacial y, por tanto, mejor es la localización.
- Distancia entre los micrófonos o sondas hasta la fuente. Las diferentes técnicas requieren la colocación de los sensores en campo cercano o en campo lejano. Por tanto es muy importante tener en cuenta las limitaciones en cuanto a la distancia a la que nos podemos situar de la fuente. Por ejemplo, para localizar las fuentes de ruido generadas por un aerogenerador o por una planta industrial, necesitaremos medir siempre en el campo lejano, por lo que no podremos utilizar técnicas como la holografía, que requieren mediciones en campo cercano.
- Rango de frecuencias. En la práctica, todos los métodos de localización de fuentes sonoras están limitados en frecuencia, bien sea debido a su formulación teórica, por las limitaciones inherentes a los instrumentos o por motivos de tiempo de medición o de coste de los equipos a emplear. Por ello, uno de los factores más importantes de cara a la elección de uno u otro método es el rango de frecuencias de interés. Régimen estacionario o transitorio. Los métodos de localización que requieren un barrido de la sonda no son válidos para régimen transitorio, siendo necesaria la utilización de un array de sensores y un sistema de adquisición multicanal.

5. BEAFORMING TRADICIONAL

La emisión de una fuente de ruido tiene una propagación compleja, además de estar afectada por otras fuentes, lo que complica su medición directa, incluso con un micrófono en campo cercano. Por esta razón, algunos métodos de identificación de fuente de ruido se han desarrollado con el objetivo de separar el análisis en el dominio frecuencial y en el dominio temporal. La tecnología del 'beamforming' se basa en el análisis de los retardos y la suma de los mismos, teniendo como referencia la distancia entre micrófonos y fuente. La señal llega a cada micrófono con diferentes fases, es necesario identificarlas para poder realizar el sumatorio de forma correcta. Las posiciones de medida son flexibles con esta técnica además de poder realizar el procesado en tiempo o en frecuencia. La Figura 1 ilustra esta teoría.

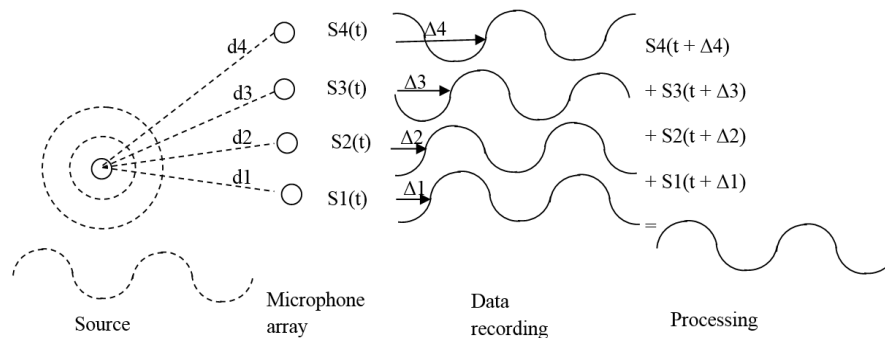


Fig.1: Teoría 'beamforming'

Las prestaciones de una técnica de localización de fuentes de ruido se definen por dos parámetros: la capacidad dinámica (nivel de "fuentes virtuales" comparadas con las verdaderas) y resolución espacial (capacidad para separar 2 fuentes cercanas). Como se ha descrito anteriormente estos valores están vinculados al tamaño del array, distancia de la fuente al array, distribución de micrófonos y frecuencia.

Por un lado, el tamaño del array debe ser lo suficientemente grande comparado con la longitud de onda para tener una buena resolución espacial (limita sobre todo la resolución a bajas frecuencias) y por el otro una pobre discretización espacial (alta separación entre micrófonos) puede dar lugar a la generación de fuentes virtuales en alta frecuencia debido al fenómeno del aliasing espacial. Por esta última razón el espaciado entre los micrófonos debería de ser menor que la mitad de la longitud de onda a la máxima frecuencia de interés. Estas reglas implican por tanto la necesidad de adaptar la geometría del array al rango de frecuencias de interés.

5.1 DIFERENTES ARRAYS EXISTENTES EN EL MERCADO PARA BEAMFORMING

Se puede realizar una clasificación de los arrays de micrófonos utilizados en la localización de fuentes sonoras en cuanto a su tamaño, su número y tipo de micrófonos o su disposición.

Las dimensiones y la disposición del array tienen una gran importancia sobre el rango dinámico y la resolución. Parámetros como la apertura máxima del array, la distancia entre los micrófonos que lo forman o la geometría de éstos (circular, espiral, esfera o matriz) determinarán la máxima frecuencia muestreable y la distancia entre la fuente bajo estudio y el array. Un tamaño de array grande y una distancia entre objeto y array pequeña, proporcionará una mayor resolución espacial. Una distancia entre micrófonos pequeña, proporcionará un mayor límite en alta frecuencia.

A continuación, en la Figura 3 se muestran varios tipos y configuraciones de array:

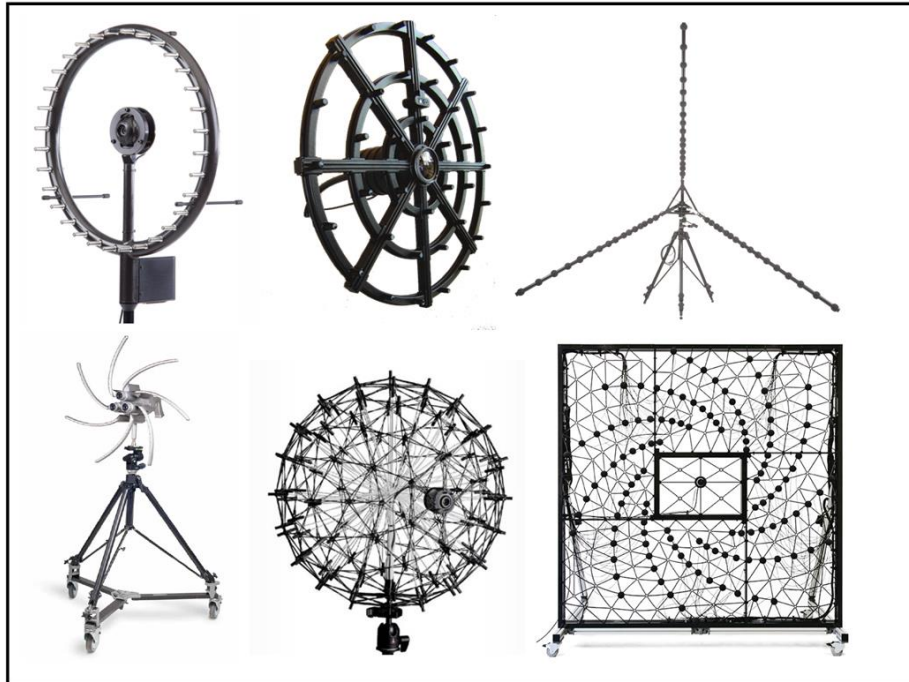


Fig.3: Tipos de arrays: Circular (Fte: GFAI), circular (Fte: LMS-Siemens), estrella (Fte: GFAI), espiral (Fte: HEAD Acoustics), esférico (Fte: GFAI) y grid (Fte: GFAI).

La tecnología que se trata en este artículo se basa en el denominado array 3D, ya que se compone de 3 planos diferentes de micrófonos, de distintos diámetros para no provocar interferencias con el plano posterior. De este modo, este array tiene 3 planos de evaluación en los que se calcularán diferentes retardos, ya que cada plano está a diferente distancia de la fuente. Esta configuración de array, con 16 micrófonos, permite que las dimensiones del mismo no sean muy grandes, orientándose a aplicaciones en tiempo real y de rápido montaje.



Fig.4: Array de 3 planos (Fte: MicrodB)

La Figura 2 presenta la directividad del array circular de 3 planos que se ha presentado en el capítulo anterior. Este array registra frecuencias desde 1 kHz a 4 kHz con una dinámica más 8 dB.

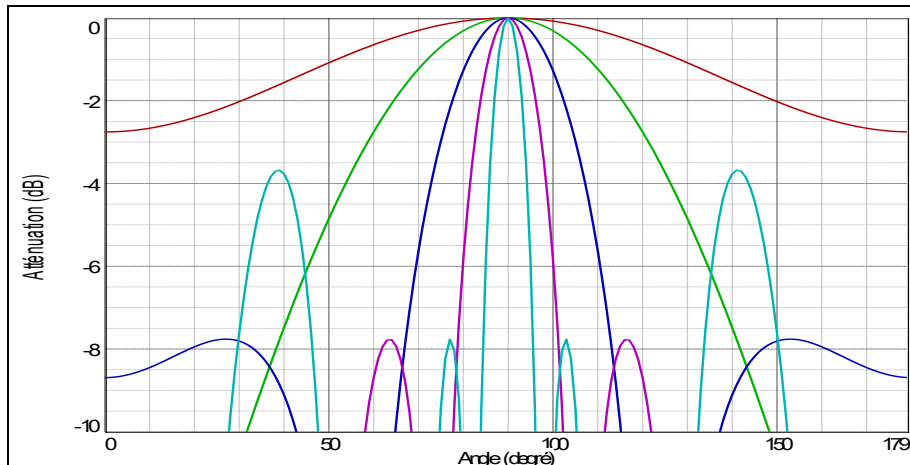


Fig.2: Directividad del array circular con 12 micrófonos regularmente espaciados, 240 mm de diámetro en tercera octava 500, 1000, 2000, 4000 and 8000 Hz.

6. DETECCIÓN DE FUENTES SONORAS MEDIANTE MICRÓFONO DIRECCIONAL BASADO EN BEAMFORMING

El objetivo final de esta técnica es obtener, a partir de una medida de la presión sonora en diferentes puntos de forma simultánea, una única señal sintetizada que se asemeje a la que podría ser obtenida con un micrófono direccional. Las principales diferencias de esta técnica utilizando el micrófono direccional respecto al 'beamforming' clásico o tradicional son las siguientes:

- ✓ Está pensado para localizar fuentes únicas y puntuales, y no para obtener un mapa global de las fuentes sonoras como en el 'beamforming' clásico.
- ✓ Utiliza un protocolo de diagnosis centrado en el movimiento de la posición del array, al contrario que el método tradicional que se basa en posiciones fijas de medida.
- ✓ Es el técnico el encargado de ir variando la posición del array con el objetivo de evaluar desde diferentes posiciones y con distintas distancias a la fuente.
- ✓ Durante todo el proceso de evaluación, el técnico puede valorar la señal que recibe a través de unos auriculares y visualizar el espectro frecuencial por pantalla.
- ✓ Reducción de coste por el menor número de canales de adquisición necesarios y la utilización de micrófonos electrets, más económicos que los utilizados en el 'beamforming' clásico.

6.2 Micrófono direccional 3D basado en 'beamforming'

Un solo array circular no puede distinguir la dirección real del frente de onda (por delante o por detrás) . En la Figura 5 se presenta una nueva configuración de array con varios anillos concéntricos en diferentes planos. Este conjunto se compone de 3 anillos de 240, 160 y 140 mm de diámetro espaciados respectivamente 40 y 80 mm. Cada anillo proporcionará un resultado independiente que finalmente puede ser combinado en uno único si se conociese la distancia a la fuente, por lo que el array se ha diseñado con un sensor de distancia en el centro de la misma. Con todos estos datos el procesador interno es capaz de realizar los cálculos en tiempo real para sintetizar una onda equivalente a la emitida por la fuente a la que estamos enfocando.

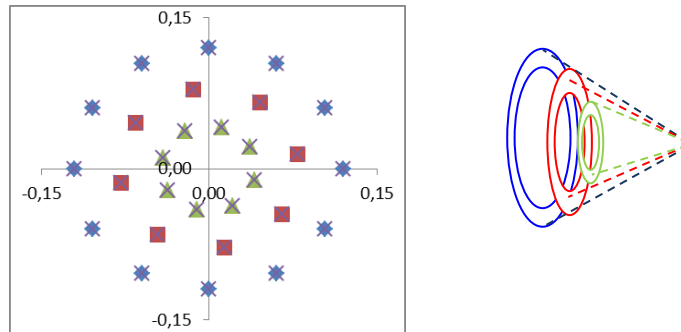


Fig.5: Micrófono direccional 3D

La directividad de este array ha sido definida experimentalmente empleando una fuente de ruido blanco, moviéndose alrededor del array con 2 distancias: 0,3 y 1,5 m. El punto de referencia es 0° cuando la fuente está en el eje del array.

Se ha trazado la diferencia de nivel para cada 15°. Estos resultados demuestran que la capacidad dinámica es más de 10 dB en 360° en las bandas (de tercios de octava) de 2 y 4 kHz. Sus prestaciones disminuyen debajo para frecuencias inferiores a 1000 Hz, siendo este un límite operativo de la solución presentada; el tamaño del array debería de aumentarse para poder medir a 500 Hz.

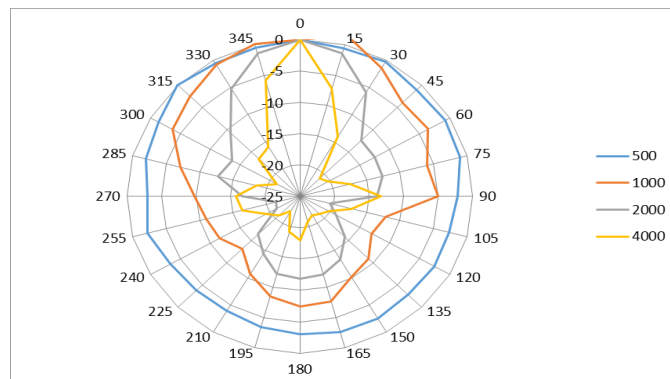


Fig.6: Directividad del micrófono direccional basado en 'beamforming' establecido experimentalmente con una fuente en campo lejano (1,5 m).

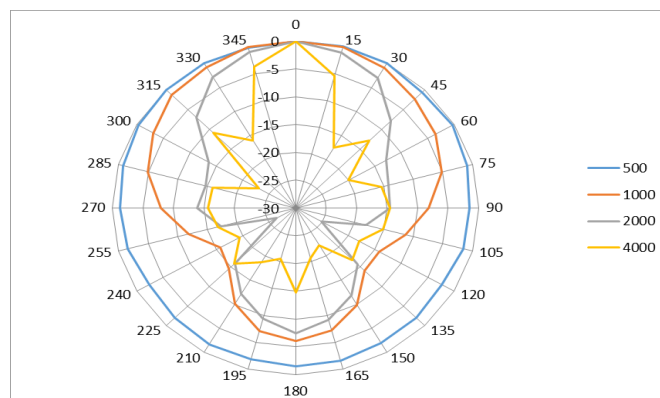


Fig. 7: Directividad del micrófono direccional basado en 'beamforming' establecido experimentalmente con una fuente en campo cercano (0,3 m).

7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DESCRITA

Se describen a continuación diferentes escenarios para evaluar el sistema de forma práctica. La tecnología fue evaluada con una prueba en la que se utilizó una fuente Sonora fija compuesta de 5 tonos puros (700, 1000, 1500, 2400 y 3700 Hz) junto a otra fuente sonora emitiendo ruido blanco que se iba moviendo alrededor de la primera. De este modo, la primera fuente sonora simulaba el foco de ruido bajo estudio y la segunda fuente el ruido de fondo.

Por un lado, se utilizó un micrófono de ¼ de pulgada, con el que se registran las señales de ambas fuentes al mismo nivel, como se muestra a continuación no es posible distinguir los tonos (Figura 8):

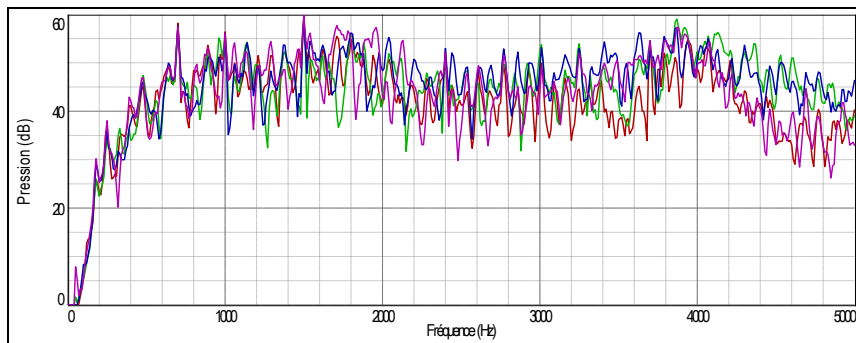


Fig. 8: Espectro del registro con micrófono de ¼ de pulgada con los siguientes ángulos entre las fuentes: 0, 45, 90 y 180°.

Por otro lado se utilizó la solución del micrófono direccional basado en 'beamforming'; a continuación se puede comprobar como con este sistema, es posible determinar claramente los tonos puros, con ambas fuentes sonoras en funcionamiento.

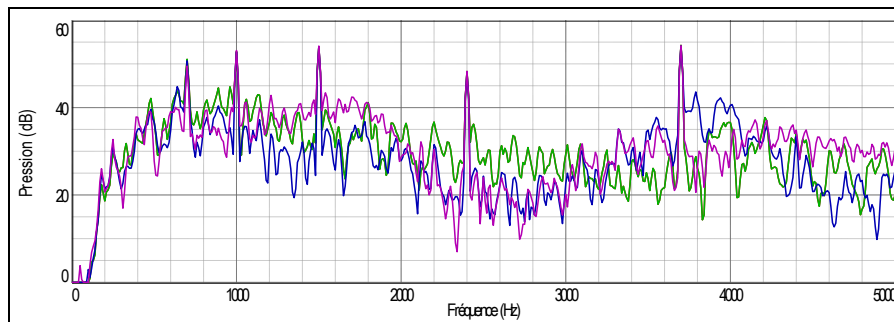


Fig. 9: Espectro del registro con el micrófono direccional, con los siguientes ángulos entre las fuentes: 45, 90 y 180°.

Para evaluar la última versión de este sistema, hardware y software, Álava Ingenieros ha preparado un escenario con 3 fuentes sonoras espaciadas 70 cm cada una. La primera es un calibrador acústico Tipo 1, que emite 1kHz a 94 dB; la segunda es un PC reproduciendo un barrido de frecuencias; la tercera es un teléfono móvil reproduciendo ruido blanco.

Con todas las fuentes en funcionamiento, acercándose a cada una de ellas, se puede distinguir rápidamente y en tiempo real la componente frecuencial determinante de cada una de ellas, tanto escuchándola en los auriculares como visualizando el espectro por pantalla.

A continuación se presentan un par de capturas del software con el sistema enfocando al calibrador acústico y al PC en el momento en que el barrido de frecuencia pasaba por 295 Hz, con las 3 fuentes en funcionamiento:

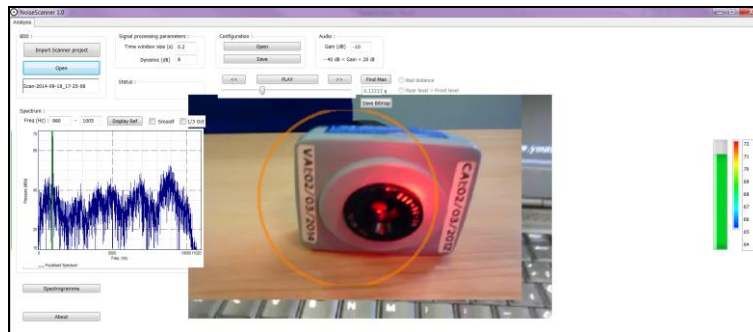


Fig.10: Espectro y captura de video del sistema enfocando un calibrador acústico emitiendo 1KHz

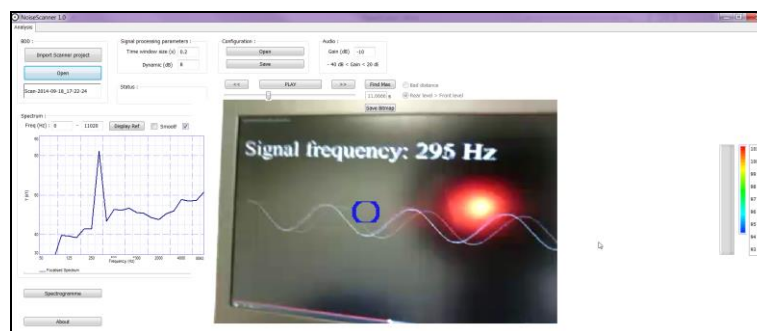


Fig.11: Espectro y captura de video del sistema enfocando un PC emitiendo un barrido de frecuencia.

8. CONCLUSIONES

La complejidad de aplicar la localización de Fuentes mediante 'beamforming' ha motivado la evolución de los primeros sistemas basados en arrays en un plano y múltiples micrófonos, orientados a obtener un mapa global de las fuentes sonoras. De éste desarrollo nace el sistema del beamformed microphone (micrófono direccional basado en la teoría de beamforming) que se ha presentado; usando un array de tres planos optimizado junto a una electrónica simple para el procesado, se ha conseguido un sistema simple y económico para localización de fuentes de ruido. Por otro lado, esta técnica carece de un software de postprocesado avanzado en contraposición a su facilidad de uso, portabilidad y precio reducido.

En el mercado en constante evolución, de la localización de fuentes, esta tecnología ocupa un puesto intermedio entre los sistemas de adquisición de datos monocal canal o sonómetros y los sistemas avanzados de cámaras acústicas. Las aplicaciones de diagnóstico de ruido, se verán beneficiadas con este sistema de localización de fuentes en cuanto a su rapidez y sencillez de manejo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Identifying acoustic bridges by using beamforming and sound intensity in situ measurement technique" J. Egea, Internoise 2010
- [2] "What is beamforming?" Dougherty, Berlin Beamforming Conference (BeBeC) Feb. 2008. Keynote Lecture.
- [3] "Directional real time beamformed microphone" L. Lamotte, International Conference Surveillance 6 2011
- [4] "Qualifying the noise sources in term of localization and quantification during flight test" L. Lamotte, C. Cariou, EUCASS 2009
- [5] "Técnicas avanzadas para la detección de fuentes sonoras" R. J. O'Brien, Mecánica Computacional Vol XXXII 2013