

LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE DEL  
VECTOR DE INTENSIDAD ACÚSTICA Y LA TÉCNICA DE BEAMFORMING HACIENDO  
USO DE LA SONDA P-U

CÉSAR AUGUSTO ARAQUE ARGÜELLES



UNIVERSIDAD DE  
SAN BUENAVENTURA  
MEDELLÍN

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA MEDELLÍN

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA DE SONIDO

MEDELLÍN

2016

LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE DEL  
VECTOR DE INTENSIDAD ACÚSTICA Y LA TÉCNICA DE BEAMFORMING HACIENDO  
USO DE LA SONDA P-U

CÉSAR AUGUSTO ARAQUE ARGÜELLES

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero de Sonido

Asesor: Oscar Esneider Acosta Agudelo

Magíster (MSc) en Acústica y vibraciones



UNIVERSIDAD DE  
SAN BUENAVENTURA  
MEDELLÍN

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA MEDELLÍN

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA DE SONIDO

MEDELLÍN

2016

## **Agradecimientos**

Doy gracias a los docentes que me brindaron asesoría durante el desarrollo de este proyecto, doy un cálido agradecimiento a mis compañeros quienes me ayudaron con las actividades desarrolladas durante este proceso y especialmente doy gracias a mis padres, quienes me acompañaron y apoyaron a lo largo de estos años.

## Tabla de contenido

Resumen.....	10
1. Planteamiento del Problema.....	12
1.1. Antecedentes.....	12
2. Justificación.....	16
3. Objetivos .....	17
3.1. Objetivo General.....	17
3.2. Objetivos Específicos.....	17
4. Marco Teórico .....	18
4.1. Intensidad sonora .....	18
4.2. Sonda P-U .....	20
4.2.1. Características de la sonda P-U .....	21
4.3. Scan & Paint .....	21
4.4. Beamforming .....	22
4.5. Virtual Phased Array.....	23
5. Metodología .....	25
5.1 Características de la fuente sonora a evaluar.....	25
5.2. Protocolos de localización de fuentes sonoras .....	25
5.2.1. Aspectos generales.....	25
5.2.2. Procedimiento de reconocimiento del vector de intensidad acústica. ....	28
5.2.3. Procedimiento de medición a partir de la técnica de formación de haz.....	29
5.3. Características de las mediciones realizadas. ....	32
5.3.1. Mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica. ....	33
5.3.2. Mediciones de localización de fuentes sonoras a partir de la técnica de formación de haz. ....	35
6. Resultados .....	38
6.1. Mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica. ....	38
6.1.1. Mediciones en espacio cerrado.....	38
6.1.2 Mediciones en espacio abierto. ....	43

6.2. Mediciones de localización de fuentes mediante la técnica de formación de haz.....	49
6.2.1. Mediciones en espacio cerrado.....	49
6.2.2. Mediciones en espacio abierto.....	52
6.2.3 Mediciones en una obra de construcción. ....	56
7. Discusión.....	59
8. Conclusiones .....	61
Anexos .....	64

## Lista de Tablas

Tabla I. Características de la sonda P-U [16].....	21
Tabla II. Ángulos en azimut hallados para la fuente electroacústica en la posición de receptor 1. .....	39
Tabla III. Ángulos hallados para la fuente desde el punto de receptor 2. ....	40
Tabla IV. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2. ....	41
Tabla V. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2. ....	42
Tabla VI. Ángulos en azimut hallados para la fuente electroacústica en la posición de receptor 1. .....	44
Tabla VII. Ángulos hallados para la fuente desde el punto de receptor 2. ....	45
Tabla VIII. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2. ....	47
Tabla IX. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2. ....	48

## Lista de Figuras

Fig. 1. Energía sonora transmitiéndose a través de superficies esféricas de radios $r$ . .....	18
Fig. 2. Vector de intensidad sonora visualizado en 3 dimensiones. ....	20
Fig. 3. Representación de la discretización espacial de una señal grabada con el software “ <i>Scan &amp; Paint</i> ”. Tomado de: [7]. .....	22
Fig. 4. Diferentes sensores recibiendo señales provenientes de diferentes direcciones .....	23
Fig. 5. Respuesta en frecuencia (izq) y patrón directivo (der) del sensor de velocidad de partícula de la sonda P-U. ....	26
Fig. 6. Ejemplo de disposición de los elementos de medición, vista lateral (dimensiones en metros). .....	28
Fig. 7. Disposición de los elementos de medición. ....	28
Fig. 8. Esquema de conexionado para la medición. ....	29
Fig. 9. Reconocimiento del vector de intensidad acústica en tres dimensiones.....	29
Fig. 10. Esquema de conexionado para la medición. ....	30
Fig. 11. Ejemplo de disposición de los elementos de medición.....	30
Fig. 12. Desplazamiento de la sonda a través del plano de medición (vista frontal). ....	31
Fig. 13. Disposición de los elementos de medición. ....	31
Fig. 14. Esquema de los puntos de medición en el <i>rec room</i> del Estudio A (vista en planta). Dimensiones en metros.....	33
Fig. 15. Esquema de medición en espacio abierto (Vista en planta).....	34
Fig. 16. Fotografías del montaje de medición.....	34
Fig. 17. Esquema de medición en espacio cerrado (vista en planta). ....	35
Fig. 18. Esquema de medición en espacio abierto (vista en planta). ....	36
Fig. 19. Fotografías de los montajes de medición de localización de fuentes. ....	36
Fig. 20. Fotografías de los puntos de medición en la obra de construcción. (Izq) Bombas de cemento, principales fuentes de ruido de la obra. (Der) Vista de la planta de mezcla de cemento desde un apartamento cercano. ....	37
Fig. 21. Densidad espectral hallada para la fuente electroacústica. ....	38

Fig. 22. Direcciones halladas para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 39

Fig. 23. Ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 39

Fig. 24. Plano con vista en planta de los ángulos hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 40

Fig. 25. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 40

Fig. 26. Densidad espectral hallada para la fuente no electroacústica. .... 41

Fig. 27. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). ..... 41

Fig. 28. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). ..... 42

Fig. 29. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). ..... 42

Fig. 30. Plano con vista lateral de los ángulos en elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). ..... 43

Fig. 31. Densidad espectral hallada para la fuente electroacústica. .... 44

Fig. 32. Direcciones halladas para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 44

Fig. 33. Ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 45

Fig. 34. Plano con vista en planta de los ángulos hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 45

Fig. 35. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul). ..... 46

Fig. 36. Densidad espectral hallada para la fuente no electroacústica. .... 46

Fig. 37. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). ..... 47

Fig. 38. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). ..... 47

Fig. 39. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). .....	48
Fig. 40. Plano con vista lateral de los ángulos en elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul). .....	48
Fig. 41. Densidad espectral de potencia hallada para la fuente electroacústica.....	49
Fig. 42. Localización obtenida de la fuente electroacústica alrededor de los 500 Hz.....	50
Fig. 43. Localización de la fuente electroacústica hallada para la frecuencia de 1 kHz. ....	50
Fig. 44. Densidad espectral medido de la fuente no electroacústica. ....	51
Fig. 45. Localización de la fuente no electroacústica alrededor de los 500 Hz. ....	51
Fig. 46. Localización de la fuente no electroacústica hallada para la frecuencia de 1,2 kHz.....	52
Fig. 47. Densidad espectral obtenida de la fuente electroacústica. ....	53
Fig. 48. Localización de la fuente electroacústica obtenida para la frecuencia de 500 Hz. ....	53
Fig. 49. Localización de la fuente sonora para la frecuencia de 1 kHz. ....	54
Fig. 50. Densidad espectral hallada para la fuente no electroacústica. ....	54
Fig. 51. Localización de la fuente no electroacústica para la frecuencia de 500 Hz.....	55
Fig. 52. Localización de la fuente no electroacústica para la frecuencia de 1 kHz.....	55
Fig. 53. Densidad espectral obtenida en la medición realizada en la planta de mezclado de cemento de la obra.....	56
Fig. 54. Localización de la fuente de ruido obtenida para la frecuencia de 500 Hz. ....	56
Fig. 55. Localización de la fuente de ruido obtenida para la frecuencia de 1 kHz. ....	57
Fig. 56. Densidad espectral obtenida de la medición realizada desde un apartamento cercano a la planta. ....	57
Fig. 57. Localización de la fuente de ruido alrededor de los 500 Hz. ....	58
Fig. 58. Localización de la fuente de ruido alrededor de 1 kHz. ....	58

## Resumen

En este documento se presenta cómo, a partir del uso de la sonda P-U de *Microflown Technologies*, se logra obtener la localización de una fuente sonora. Esta localización de la fuente se logra mediante el uso de 2 técnicas: a partir del reconocimiento del vector de intensidad acústica y a partir de la técnica de formación de haz (*beamforming*). Así mismo, se presentan las metodologías para llevar a cabo las mediciones, las restricciones en las características de la fuente que se desea localizar, las limitaciones que presentan ambos métodos usados y los procedimientos utilizados para la realización de las mediciones. Se toman dos diferentes fuentes para localizar, una fuente electroacústica emitiendo una señal controlada y una fuente no electroacústica (base-motor de licuadora). Para ambas fuentes evaluadas se buscó obtener la localización en dos diferentes espacios: un espacio cerrado con bajo nivel de ruido de fondo y absorción controlada y un espacio abierto. De los resultados obtenidos se realizan comparaciones entre la localización hallada para diferentes frecuencias, entre las fuentes evaluadas y para los espacios escogidos.

**Palabras clave:** Localización, vector de intensidad acústica, sonda P-U, formación de haz.

### **Abstract**

In this document are presented how, by the use of the Microflown Technologies's P-U probe, is obtained the localization of a sound source. This source localization is tackled by two techniques: by the recognition of the acoustic intensity vector and using the beamforming technique. Also, this document presents the methods to carry out the measurements, the restrictions of the source characteristics, the limitations of both techniques and the actual used procedures. The localization is plied to two different sound sources, an electroacoustic source radiating a controlled signal and a non-electric-acoustic source (a blender motor). For both sources it is wanted to obtain its localization in two different places: A closed space, with low levels of background noise and controlled absorption, and an open space. From the results it's made comparison between the found localization for different frequencies, between the evaluated sources and between the chosen places.

**Keywords:** Localization, acoustic intensity vector, P-U probe, beamforming.

## 1. Planteamiento del Problema

Como pregunta de investigación de este proyecto se plantea ¿Cómo localizar una fuente de ruido fija a partir del reconocimiento del vector de intensidad acústica y a partir de la técnica de formación de haz haciendo uso de la sonda P-U?

A partir de la identificación del vector de intensidad se puede determinar la dirección de una fuente de ruido en espacio libre, conociendo la amplitud de la velocidad de partícula en un determinado punto en tres direcciones (ejes  $X, Y$  y  $Z$ ) y la presión sonora en el mismo punto. Esta intensidad acústica se puede medir a partir de una sonda que obtiene valores de presión sonora y velocidad de partícula (Sonda P-U) [1].

También existen técnicas para localización de fuentes dado un campo sonoro estacionario en el tiempo, que requiere de dos sensores, uno fijo (micrófono de presión) y uno móvil (sonda P-U), que permiten simplificar la localización de fuentes de ruido fijas. Haciendo un seguimiento del recorrido del sensor móvil a través de un área y asociando la señal capturada con dicho recorrido, se puede dividir el área del recorrido en subregiones y cada subregión se puede tomar como un elemento virtual de un arreglo de micrófonos al cual, a partir de algoritmos de formación de haz o *beamforming*, se puede determinar la dirección de proveniencia (DOA) de dicha fuente para diferentes frecuencias.

Estas técnicas presentan limitaciones en que se debe conocer de antemano una ubicación aproximada de la fuente. La máxima longitud de onda que se desee localizar depende del tamaño del área en la que se realizará el barrido con la técnica de arreglos de micrófonos virtuales.

### 1.1. Antecedentes

Una onda sonora puede caracterizarse a través de dos magnitudes físicas, la presión sonora y la velocidad de partícula. Una alternativa para medir directamente la velocidad de partícula es el *Microflown*, presentado por H-E de Bree [2]. Este consiste de tres resistores, los dos más externos son usados como sensores y el del medio como calorífero. Cuando un flujo es aplicado a los resistores sensores, el cambio de temperatura genera un cambio en la resistencia que puede ser medido en ambos resistores, este cambio es proporcional al flujo aplicado. Los resultados obtenidos

dejan una puerta abierta para futura investigación en mejoras al dispositivo y diferentes futuras aplicaciones.

En 1999, H-E de Bree et al. presentaron un método para obtener la intensidad sonora en un punto a partir de medir la velocidad de partícula directamente con tres sensores *Microflown* y un micrófono de presión (método P-U) [3]. También fueron realizadas comparaciones con métodos tradicionales para medir intensidad sonora, como la sonda P-P, que obtiene la intensidad a partir de calcular la velocidad de partícula mediante de la diferencia de fase entre dos micrófonos de presión puestos muy cerca el uno del otro y calcular la presión promedio entre ambos micrófonos. Por último, se mostraron las ventajas que presenta el método P-U sobre el método P-P para medir la intensidad sonora en tres dimensiones.

Posteriormente H-E de Bree et al. presentaron, en 2003, aplicaciones de mediciones y avances realizados con *Microflown*. Las aplicaciones presentadas son tanto en el campo cercano como en el campo lejano, y debido a que con este dispositivo se puede medir la velocidad de partícula directamente, también se puede obtener información de impedancia acústica e intensidad sonora. También fueron presentados los logros en cuanto a productos robustos diseñados y aplicaciones que tienen estos productos como la sonda P-U que posee un sensor que mide velocidad de partícula y un micrófono que mide presión sonora, con lo cual se puede hallar la intensidad sonora en un punto para una dimensión [4].

Una vez conocida la intensidad acústica debido a una fuente sonora en un punto receptor con los métodos descritos, es posible determinar la ubicación de dicha fuente. En 2009, H-E de Bree et al. presentaron una técnica de localización de fuentes de ruido de baja frecuencia en tres dimensiones. Esto lo logran ubicando tres sondas P-U de manera perpendicular (*Acoustic Vector Sensor AVS*), de esta manera logran determinar la intensidad acústica dada por dicha fuente. Para hallar la ubicación de la fuente se realizó un montaje experimental en un laboratorio para verificar la localización en el ángulo de elevación. También, fueron realizadas las mediciones de campo en un ambiente urbano, ubicando la fuente sobre una torre. La precisión de los resultados se ve afectada por el espaciamiento entre los sensores y por ciertas reflexiones en el sitio de medición [5].

En 2009, J. Fricke et al. Realizaron un análisis sobre una técnica de localización de fuentes de ruido haciendo uso de arreglos de múltiples sensores AVS, que consisten de tres sensores de velocidad de partícula y un micrófono de presión. Para la localización de fuentes se aplica un algoritmo que

usa componentes del ruido para estimar la dirección de proveniencia de un ruido. Para estimar la precisión y resolución de los resultados, se realizaron comparaciones con un método ya establecido basado en micrófonos de presión. Los resultados muestran mayor precisión y resolución en el método basado en AVS, sin embargo, los resultados son más susceptibles de error si no se considera calibración de posición entre los sensores AVS [6].

En 2011, D. García Escribano y E. Tijs presentaron un método para la realización de mapas de ruido a partir de medir la intensidad acústica con sensores AVS, localizando las fuentes de ruido dominantes en un sector portuario en la ciudad de Nijmegen en Holanda. Se realizaron 6 mediciones de 10 segundos cada una a lo largo de una vía. También presentaron una etapa de monitoreo en tiempo real y una etapa de post-procesamiento en la cual se muestra la ubicación de las fuentes en a través de un sistema de información geográfica [1].

Una forma de visualizar el campo sonoro generado por una fuente sonora se logra a partir del software “*Scan & Paint*” [7]. En 2013 D. Fernández Comesaña et al. presentaron antecedentes históricos a la visualización de campos sonoros. Este software asocia el recorrido de una sonda P-U a través de un área, grabado con una cámara de video, con la señal capturada por la sonda, permitiendo realizar una “visualización” del campo sonoro generado por una fuente evaluada. Debido a que la medición se realiza con un sensor móvil se puede producir un cambio en la frecuencia debido al efecto Doppler, se presentan velocidades de escaneo apropiadas para hacer insignificante el efecto Doppler sobre las mediciones. También fueron presentadas aplicaciones en distintos ámbitos de este software como la localización de fuentes sonoras en campo lejano y campo cercano.

Tradicionalmente se ha determinado la localización de fuentes sonoras haciendo uso de arreglos de micrófonos, que, a partir de una calibración en fase de cada uno de sus elementos, logra determinar la dirección de proveniencia de una onda que incide en dicho arreglo. A partir de la herramienta de “*Scan & Paint*” de *Microflown Technologies* se muestra un método de localización de fuentes sonoras a partir del uso de sólo dos sensores, uno fijo y uno móvil. A partir de esta técnica novedosa se logra eliminar las limitaciones que presentan las técnicas tradicionales. Se realizan simulaciones para comparar los resultados ambos sistemas de localización de fuentes. La dirección de proveniencia del ruido se determina a partir de algoritmos de formación de haz.

También, se presentaron las ventajas que tienen los arreglos de micrófonos de forma virtual sobre los convencionales [8].

A modo de comparación, D. Fernández Comesaña et al. presentaron en 2011 simulaciones y mediciones para localizar fuentes sonoras en campo lejano a partir de determinar la dirección de proveniencia (DOA) a partir de dos diferentes algoritmos sobre los resultados obtenidos a partir de arreglos virtuales con dos sensores. Las mediciones se hicieron en cámara anecoica, con un altavoz como fuente sonora. Se mostraron las ventajas y desventajas que tienen dichos algoritmos de formación de haz respecto para esta clase de evaluación de fuentes de ruido [9].

Con el fin de mejorar la resolución espacial de los resultados obtenidos de un formador de haz, D. Fernández Comesaña et al. presentaron en 2013 las bases teóricas y simulaciones de diferentes algoritmos de formación de haz para la localización de fuentes sonoras a partir de phased arrays virtuales (VPA), aplicados sobre resultados obtenidos por la técnica de formación de haz convencional. Fueron realizadas comparaciones entre diferentes algoritmos y se presentan las ventajas de un nuevo algoritmo [10].

## **2. Justificación**

A la hora de crear mapas de ruido estratégicos es importante conocer la ubicación de las fuentes de ruido, para poder estudiar el impacto generado por dichas fuentes sobre las zonas expuestas a las mismas, especialmente en lugares donde los niveles de ruido superan los umbrales permitidos legalmente o donde se presentan quejas o molestias. El conocimiento de las fuentes de ruido permite tomar medidas correctivas y planes de acción sobre las mismas.

A partir del reconocimiento del vector de intensidad acústica y de algoritmos de formación de haz se puede obtener la localización de fuentes sonoras, asumiendo unas características temporales y frecuenciales del ruido generado por la fuente sonora.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Localizar la dirección de proveniencia de una fuente de ruido mediante las técnicas de reconocimiento del vector de intensidad acústica y la técnica de formación de haz a partir del uso de la sonda P-U.

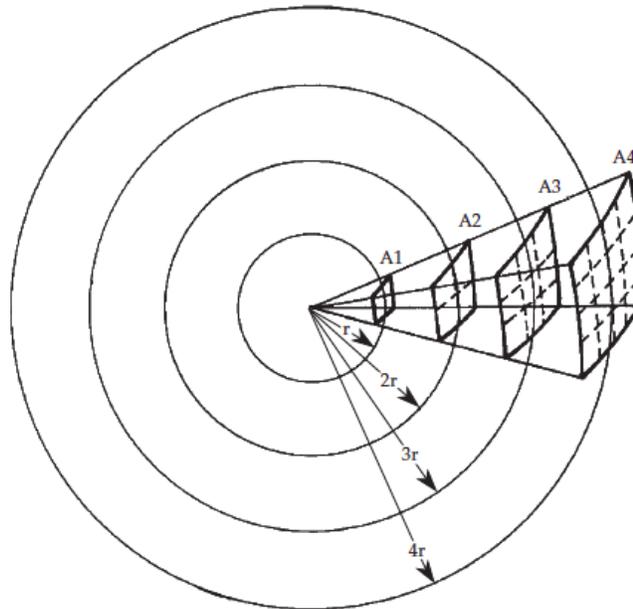
#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Plantear protocolos de medición para localización de una fuente sonora a partir de las técnicas de reconocimiento del vector de intensidad acústica y formación de haz.
- Obtener la localización de una fuente sonora a partir de mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica y la técnica de formación de haz.
- Establecer las diferencias entre los dos métodos planteados para la localización de la fuente mediante el análisis y la comparación de las mediciones.

## 4. Marco Teórico

### 4.1. Intensidad sonora

Para definir la intensidad sonora se debe considerar una fuente puntual la cual irradia una potencia fija, como se muestra en la Fig. 1. en la cual se muestran círculos de diferentes radios los cuales representan esferas. Para este caso la intensidad sonora es uniforme, es decir que a través del área A1 pasa la misma energía que a través de las áreas A2, A3 y A4, independientemente que estas se encuentren a diferentes radios [11]. De lo anterior se puede decir que la intensidad sonora es la tasa promedio a la cual la energía sonora se transmite a través de un área que es perpendicular a una dirección de propagación específica respecto a un punto considerado [12].



**Fig. 1. Energía sonora transmitiéndose a través de superficies esféricas de radios r.**

Tomado de: [11].

Para un instante de tiempo  $t$  la intensidad sonora  $I(t)$  se define como el producto entre la presión sonora  $p(t)$  y la velocidad de partícula  $\vec{u}(t)$  [13]. La intensidad sonora  $I$  es una cantidad vectorial, (a la cual se le asocia una magnitud y una dirección) definida como el promedio temporal del producto de la presión sonora (cantidad escalar) y la velocidad de partícula (cantidad vectorial) en la misma posición, es decir

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \vec{u}(t) dt \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]. \quad (1)$$

La intensidad sonora es una útil herramienta para medir potencia acústica, identificar, caracterizar y localizar fuentes sonoras, visualizar campos sonoros, identificar vías de transmisión, entre otras aplicaciones. [12]

En tres dimensiones, la presión sonora y la velocidad de partícula son elementos que tienen diferencias de fase las cuales dependen de la dirección de llegada de la onda y la ubicación de la fuente. Esto implica que la presión sonora y las tres componentes ortogonales de la velocidad de partícula compongan un vector complejo que es la intensidad sonora compleja, de la cual su parte reactiva representa la energía sonora que no se propaga en el medio y la parte activa que representa la energía que se propaga en el medio, esta última es la más comúnmente usada para el estudio de la intensidad. Por ejemplo

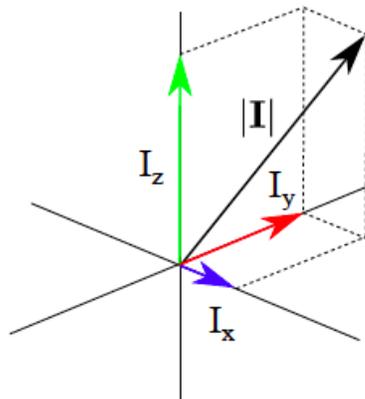
$$I = \{I_x, I_y, I_z\} = \langle pu \rangle_t = \frac{1}{2} \text{Re}\{pu\}. \quad (2)$$

Donde el operador  $\langle . \rangle$  es el promedio temporal del producto entre la presión sonora y la velocidad de partícula.

Para fines de visualización se puede hallar la magnitud de la intensidad sonora a partir de obtener el módulo del vector, de esta forma

$$|I| = \frac{1}{2} \sqrt{\text{Re}(pu_x)^2 + \text{Re}(pu_y)^2 + \text{Re}(pu_z)^2}. \quad (3)$$

En la Fig. 2. se muestra una representación de la intensidad sonora en tres dimensiones



**Fig. 2. Vector de intensidad sonora visualizado en 3 dimensiones.**

**Tomado de:** [14].

A partir de conocer las tres componentes del vector de intensidad se pueden hallar los ángulos de elevación ( $\theta$ ) y azimut ( $\varphi$ ) de la siguiente forma

$$\theta = \arccos\left(\frac{I_z}{|I|}\right) \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_y}{I_x}\right). \quad (5)$$

#### **4.2. Sonda P-U**

La sonda P-U desarrollada por *Microflown Technologies*, está compuesta por un sensor de presión sonora y un sensor de velocidad de partícula, que a partir de conocer estas dos variables se puede calcular la intensidad sonora.

El sensor de velocidad de partícula está compuesto por dos cables ultra delgados. Estos cables son dos resistores de platino de 1mm de largo y 200nm de espesor, que funcionan como sensores de temperatura. Estos son alimentados por una corriente eléctrica que hace que se calienten, este incremento en la temperatura conlleva a un incremento en la resistencia de los cables. Cuando no hay presencia alguna de ondas sonoras la temperatura típica de estos cables es de entre 200°C y 400°C [4].

Cuando la velocidad de partícula de una onda sonora se propaga de manera ortogonal a través de estos cables, de forma asimétrica la distribución de la temperatura alrededor de los cables. La diferencia de resistencia resultante del cambio de temperatura entre los cables provee una señal lineal para un amplio rango de frecuencias (de 0 Hz hasta al menos 20 kHz) la cual es proporcional a la velocidad de partícula hasta niveles sonoros de 135 dB. Este sensor presenta un patrón polar de figura de 8 [15].

### 4.2.1. Características de la sonda P-U

En la Tabla I. se presentan las características físicas y técnicas de la sonda P-U en cuestión.

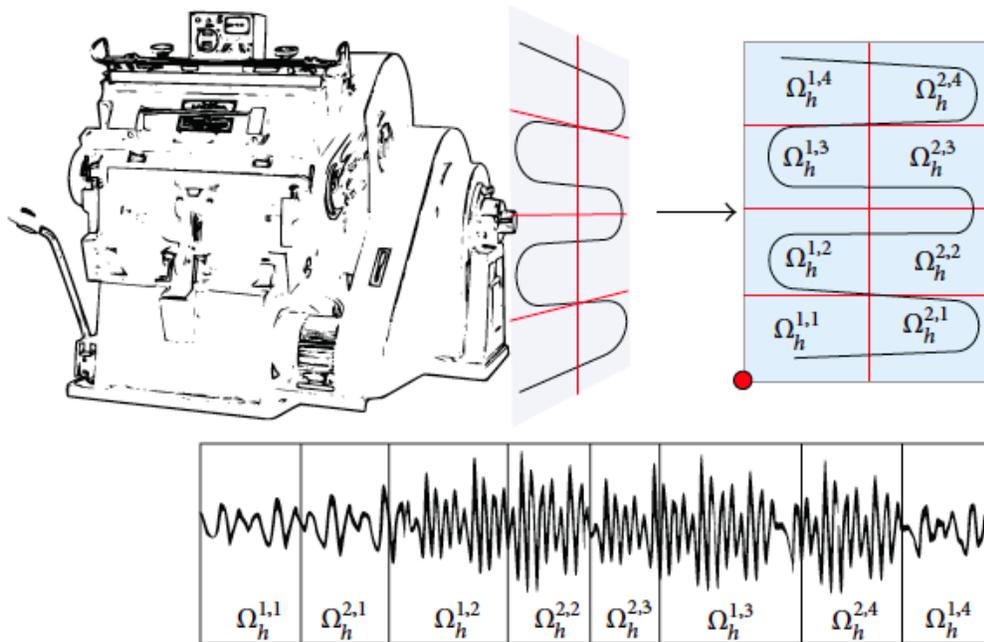
**Tabla I. Características de la sonda P-U.**

<b>Características físicas</b>		
Diámetro		½"
Longitud		90 mm
Peso		38 g
<b>Propiedades acústicas</b>		
<b>Sensor</b>	<b>Presión</b>	<b>Velocidad de partícula</b>
Respuesta en frecuencia	20 Hz – 20 kHz	1 Hz – 20 kHz
Máximo nivel	110 dB (SPL ref 20uP)	125 dB (PVL ref @ 50 nm/s)
Sensibilidad	20 mV/Pa	50 mV/(mm/s)
<b>Senor</b>	<b>Presión</b>	<b>Velocidad de partícula</b>
Directividad	Omni	Figura de 8
Relación señal a ruido (@ 1 kHz con ancho de banda de 1 Hz)	105 dB	107 dB
<b>Características eléctricas</b>		
Alimentación	Acondicionador de señal de 4 canales	
Conexión	Puerto Lemo de 7 pines	

**Nota:** [16].

### 4.3. Scan & Paint

Es una técnica propuesta como alternativa de visualización de campos sonoros. Las señales acústicas del campo sonoro son adquiridas a partir de mover un sensor a través de una superficie de medida mientras se registra el proceso con una cámara de video. En la etapa de post-procesamiento, se obtiene la posición del sensor a partir de aplicar detección automática de color a cada cuadro del video grabado. Con el recorrido del sensor es posible dividir la señal en varios fragmentos. Cada segmento de la señal será asociado a una celda de una rejilla, dependiendo de la posición en la cual se encuentre durante la medición. Gráficamente esto se muestra en la Fig. 3.

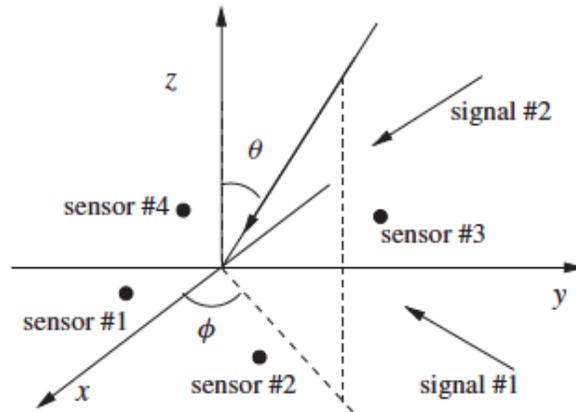


**Fig. 3. Representación de la discretización espacial de una señal grabada con el software “Scan & Paint”.**  
Tomado de: [7].

Varias de las aplicaciones de este método de evaluación del campo sonoro están relacionadas con localización de fuentes de ruido en campo cercano, análisis de vía de transmisión, mapeo de impedancia y absorción, mapeo del campo de vector de intensidad y localización de fuentes de ruido en el campo lejano.

#### 4.4. Beamforming

El procesamiento de señales en arreglo, conocido como *beamforming*, es una de las grandes áreas del procesamiento de señales que ha sido estudiada en el pasado gracias a su amplio campo de operación en áreas como radar, sonar, arreglos de micrófonos, radio, astronomía, sismología y diagnóstico y tratamientos médicos. Este involucra múltiples sensores (antenas, micrófonos, etc.) ubicados en diferentes posiciones en un espacio, con el fin de procesar señales recibidas que provienen de diferentes direcciones como se muestra en la Fig. 4, para la cual la dirección de llegada está caracterizada por un ángulo de elevación ( $\theta$ ) y un ángulo de azimut ( $\varphi$ ) [17].



**Fig. 4. Diferentes sensores recibiendo señales provenientes de diferentes direcciones**

Para el caso de micrófonos, operaciones de filtrado espacial, conocidas como formación de haz (*beamforming*), son aplicadas a los datos adquiridos por estos arreglos de sensores con el fin de extraer información de localización de fuentes de ruido. Una serie de transductores capturan ciertas propiedades de un campo sonoro en un grupo de posiciones discretas. Luego los datos son procesados usando modelos de propagación de ondas sonoras para estimar la dirección de proveniencia, actuando como un filtro discriminador espacial [14].

#### 4.5. Virtual Phased Array

Existen muchas aplicaciones de arreglos de micrófonos para localizar fuentes sonoras, la resolución de la localización las fuentes dada por estos arreglos depende de la cantidad de micrófonos presentes en el arreglo y de cómo estos estén dispuestos geoméricamente en el espacio. Si se tiene un gran número de micrófonos, el tamaño del arreglo podría volverse significativo para algunas frecuencias, desviando la caracterización del campo sonoro generado por la fuente [8].

Una forma de abordar este problema se logra a partir de arreglos de sensores virtuales, superando problemas prácticos presentados por los arreglos de sensores convencionales suponiendo un campo sonoro estacionario en el tiempo. Este acercamiento permite la caracterización de un área de medición a partir de una serie de “transductores virtuales” con un sistema de medición más simple. Un único sensor móvil adquiere datos continuamente a través del espacio mientras un micrófono estático de referencia registra el evento. La señal acústica registrada es separada en bloques los cuales tienen asociada una información espacial, cada bloque representa un elemento de un arreglo

de sensores virtual. La fase de cada bloque es relativa al micrófono de referencia fijo. Debido a que los datos se adquieren con un solo sensor, se eliminan problemas relacionados con la calibración de transductores en fase. La dirección de proveniencia de la fuente se determina a partir de un algoritmo de formación de haz, este algoritmo está definido por

$$B_{ff}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{S_{PmPn}(\omega)}{P_m^*(\omega)} e^{-jkd \text{ sen}(\varphi)(n-1)} \quad (6)$$

Donde

$B_{ff}(\omega)$  es la salida del formador de haz.

$S_{PmPn}(\omega)$  es la densidad espectral de potencia del sensor móvil.

$P_m^*(\omega)$  es el espectro conjugado del sensor fijo.

Este algoritmo de formación de haz es conocido como “*Delay and Sum Beamforming*” (DAS) y consiste en dirigir un haz a una particular dirección, computando de forma apropiada una ponderación de la suma de las señales obtenidas por diferentes sensores individuales, resultando esto en una suma de las señales que provienen de la dirección de enfoque y atenuando las señales provenientes de otras direcciones [14].

Esta técnica de localización de fuentes de ruido es aplicada a partir del uso del software “*Scan & Paint Virtual Phased Array (VPA)*” El cual funciona bajo el mismo principio del software “*Scan & Paint*” de discretizar la señal capturada y asociar cada tramo con el recorrido de la sonda a través de un plano, con la diferencia que para el *Virtual Phased Array*, cada tramo de la señal sería un componente virtual de un arreglo de micrófonos. La resolución espacial de la localización de la fuente depende de las características del montaje de medición y del procesamiento efectuado. Para mejor resolución en baja frecuencia, las dimensiones de la superficie de medición deben ser mayores, es decir mientras más área tenga dicha superficie, mejor será la resolución en bajas frecuencias. La mejor resolución en alta frecuencia se obtiene de la cantidad y tamaño de las celdas de la rejilla creada sobre el recorrido de la sonda sobre el plano; mientras más celdas tenga la rejilla, menor tamaño tendrá cada celda y se tendrá mayor resolución en altas frecuencias [8].

## 5. Metodología

A continuación, se presenta el desarrollo metodológico con el cual se obtendrá la localización de las fuentes sonoras en cuestión. Primero se dan las características de la fuente sonora que se desea localizar, de tal forma que los resultados de las mediciones a efectuar sean válidos. Luego se plantean métodos de medición a modo de protocolos, tanto para el reconocimiento del vector de intensidad acústica como para la técnica de formación de haz. Con la información anterior, se busca establecer un procedimiento para posteriormente llevar a cabo las mediciones de localización de fuentes sonoras.

### 5.1 Características de la fuente sonora a evaluar

Para obtener la localización de una fuente de ruido, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Espaciales*: La fuente debe permanecer en una posición fija.
- *Temporales*: La fuente debe tener un carácter continuo, con tendencia estacionaria en el tiempo, es decir, que el campo sonoro generado por la fuente debe ser similar para diferentes instantes en el tiempo [8].
- *En frecuencia*: La fuente debe tener energía entre los 40 Hz y los 10000Hz [18].
- *De nivel*: El nivel de presión sonora generado por la fuente a medir se debe encontrar significativamente por encima del ruido de fondo presente en la locación de medición.

### 5.2. Protocolos de localización de fuentes sonoras

Estos protocolos tienen como objetivo plantear una metodología con la cual se realicen mediciones de localización de fuentes de sonoras que se encuentran en el campo lejano, esto a partir del uso del software *Scan & Paint* y la sonda P-U de *Microflown Technologies*, haciendo uso de las técnicas de reconocimiento del vector de intensidad y formación de haz. Este diseño metodológico se plantea con base en experimentos realizados con dicha técnica.

#### 5.2.1. Aspectos generales

Para obtener la localización de una fuente sonora a partir del reconocimiento del vector de intensidad y la técnica de formación de haz se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones.

## Equipo de medición

### Sonda P-U.

Sonda que contiene un transductor que mide la velocidad de partícula y un micrófono que mide la presión sonora. Para esta sonda, el sensor de velocidad de partícula tiene la respuesta en frecuencia y directividad que se muestra en la Fig. 5, el micrófono de presión tiene patrón directivo omnidireccional.

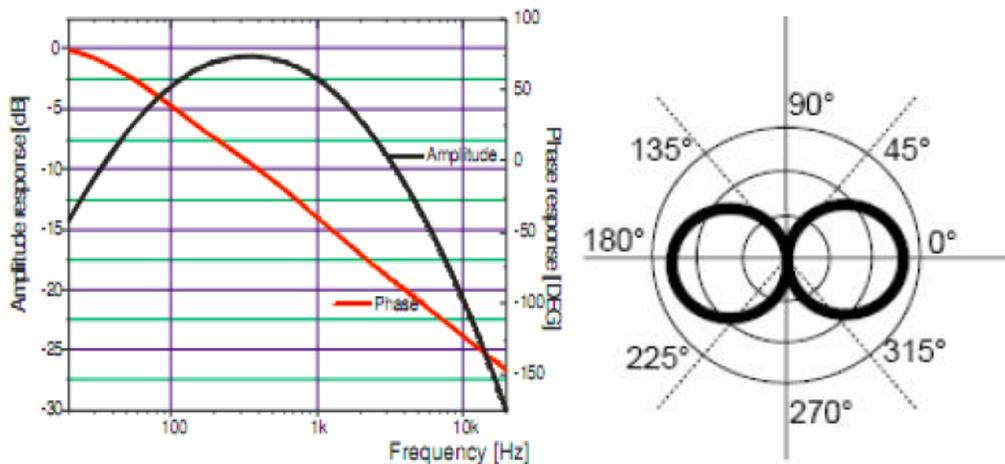


Fig. 5. Respuesta en frecuencia (izq) y patrón directivo (der) del sensor de velocidad de partícula de la sonda P-U.

Tomado de: [19].

### Acondicionador de señal

Dispositivo que provee alimentación a la sonda para que esta sea funcional, amplificación a la señal capturada con la sonda y ecualización correctiva en caso de ser necesario.

### Interfaz de audio (scout 422).

Interfaz de captura de datos, desarrollado para mediciones de ruido y vibraciones realizadas con sondas de *Microflown Technologies*. Posee 4 entradas, una salida. Este dispositivo se encarga de convertir la señal capturada de analógica a digital con una frecuencia de muestreo máxima de 52kHz y una profundidad en bits de 24 bits [20].

### **Equipo de análisis y captura.**

Para la captura y el análisis de la señal es necesario un computador con sistema operativo basado en Microsoft Windows, en el cual se encuentre instalado el software *Scan & Paint* de *Microflown Technologies*. Este equipo se conecta por medio de USB con la interfaz de audio.

### **Cámara web.**

Debe tener la suficiente resolución y velocidad de cuadros para hacer un correcto seguimiento de la sonda P-U.

### **Micrófono de referencia.**

Con este micrófono se captura información de fase relativa, se conecta a la interfaz *Scout 422* a partir de puerto BNC. Este micrófono debe tener patrón directivo omnidireccional. Este micrófono debe ser piezoeléctrico, ya que la interfaz no provee alimentación *phantom power*.

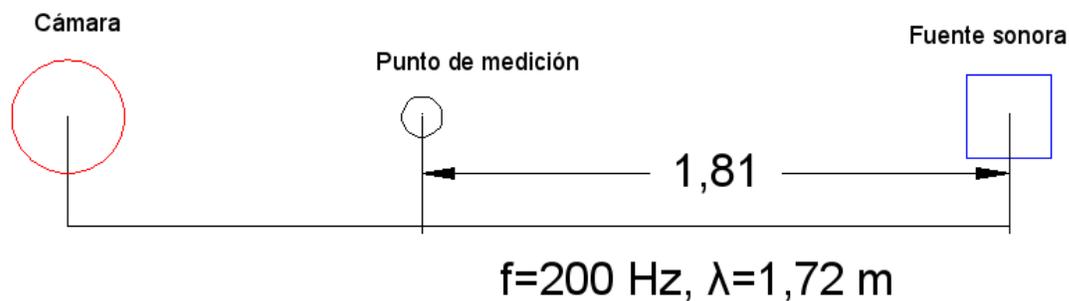
### **Anemómetro**

Para hacer mediciones en exteriores es necesario conocer la velocidad del viento, con el fin de determinar la viabilidad del uso de pantallas contra el viento, evitando que se induzca ruido que desvíe los resultados de la medición.

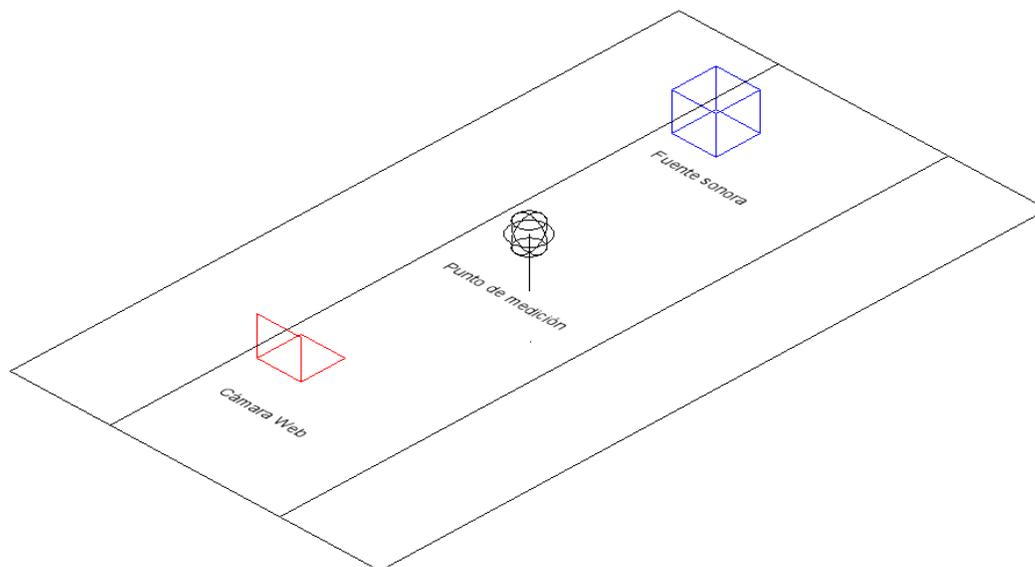
### **Ubicación del lugar de medición**

La medición se debe realizar en un lugar donde no haya mayor influencia de reflexiones que puedan desviar los resultados de la medición. Sin embargo, no es necesario que la medición se realice en un espacio anecoico.

La distancia del punto de medición respecto a la fuente sonora debe ser la suficiente para que este se encuentre en el campo lejano. Es decir, que esta distancia sea mayor a la máxima longitud de onda que se desee registrar. Por ejemplo, para una frecuencia de 200 Hz, cuya longitud de onda es de 1,72 m, la distancia entre la fuente y el plano de medición debe ser mayor a 1,72 m como se muestra en la Fig. 6. En la Fig. 7 se muestra la disposición de la fuente y de la cámara respecto al punto de medición [8].



**Fig. 6.** Ejemplo de disposición de los elementos de medición, vista lateral (dimensiones en metros).



**Fig. 7.** Disposición de los elementos de medición.

El lugar de medición debe tener suficiente iluminación para que la cámara logre identificar la trayectoria de la sonda P-U a través de la superficie de medición.

### 5.2.2. Procedimiento de reconocimiento del vector de intensidad acústica.

#### Conexión de los equipos.

En la Fig. 8. se muestra un esquema del conexionado de los equipos para proceder con la medición de reconocimiento del vector de intensidad acústica. La sonda PU se conecta al acondicionador de señal mediante un cable LEMO de 7 pines. La conexión entre el acondicionador de señal y la interfaz Scout 422 se hace a partir de conexiones BNC analógicas. Finalmente se conecta la interfaz Scout 422 con un computador que contenga el software Scan & Paint por medio de un cable USB 2.0.

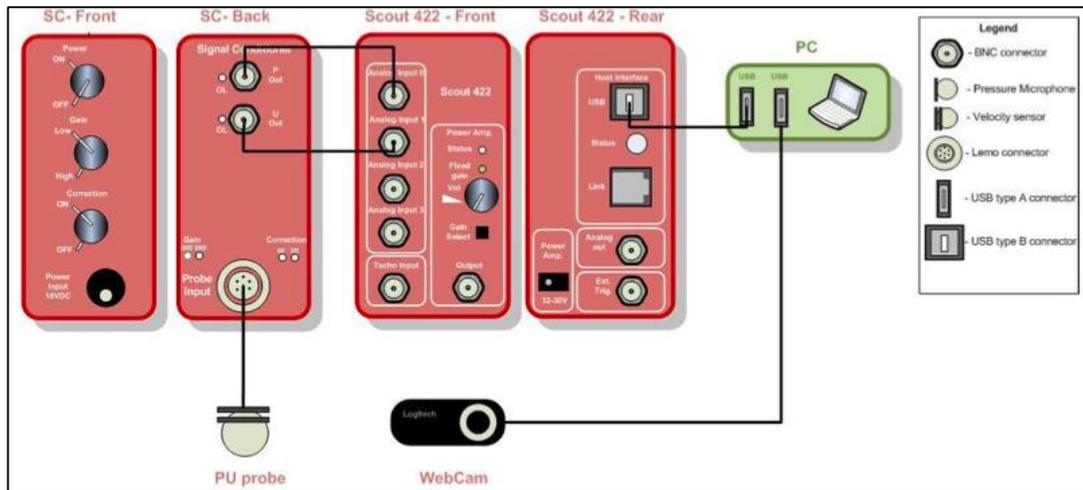


Fig. 8. Esquema de conexionado para la medición.

Tomado de: [18].

### Procedimiento de medición.

Se debe medir el vector de intensidad en las tres dimensiones espaciales (X, Y, Z). Debido a que la sonda P-U de *Microflown* Technologies mide la intensidad acústica en una sola dimensión, se deben realizar tres mediciones diferentes para cada dimensión. Estas tres mediciones se deben realizar sobre un mismo punto [5], como se muestra en la Fig. 9. La duración de cada medición debe ser la suficiente para registrar los eventos sonoros producidos por la fuente.



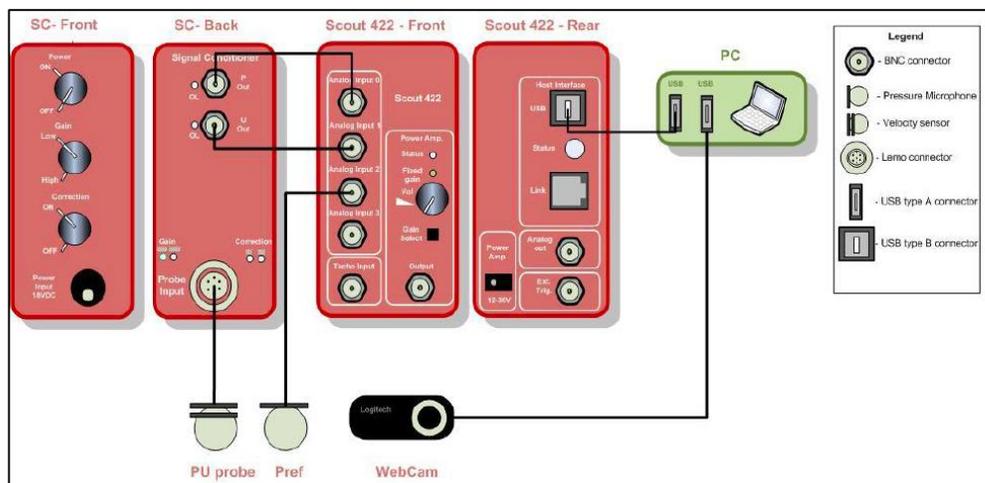
Fig. 9. Reconocimiento del vector de intensidad acústica en tres dimensiones

Tomado de: [19].

### 5.2.3. Procedimiento de medición a partir de la técnica de formación de haz.

Para el caso de la medición a partir de la técnica de formación de haz, en la Fig. 10. se muestra un esquema del conexionado de los equipos. Primero la sonda P-U se conecta al acondicionador de señal mediante un cable LEMO de 7 pines. Luego se conecta el acondicionador de señal y la interfaz *Scout 422* a partir de conexiones BNC analógicas. Posteriormente el micrófono de presión

de referencia se conecta mediante un cable BNC a la interfaz *Scout 422*. Finalmente se conecta la interfaz *Scout 422* con un computador que contenga el software *Scan & Paint* por medio de un cable USB 2.0.

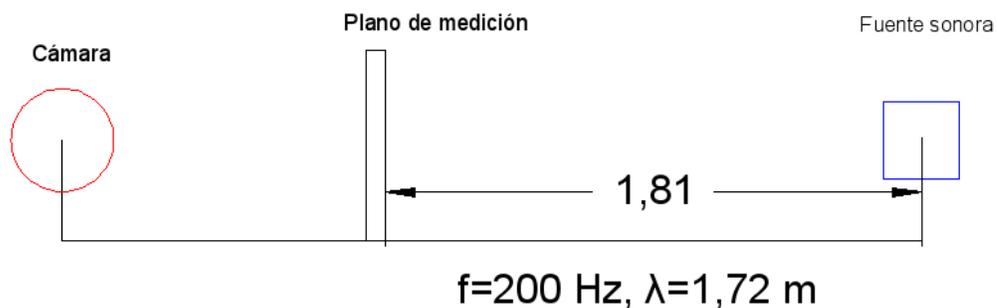


**Fig. 10. Esquema de conexionado para la medición.**

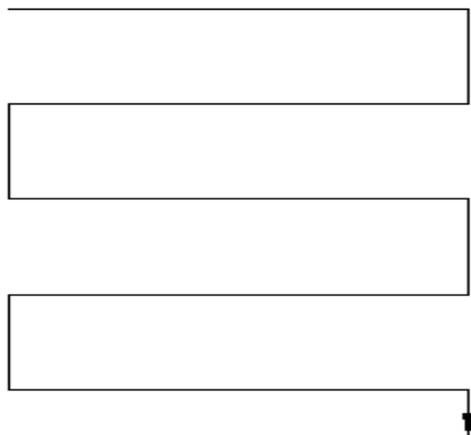
Tomado de [21].

### Procedimiento de medición.

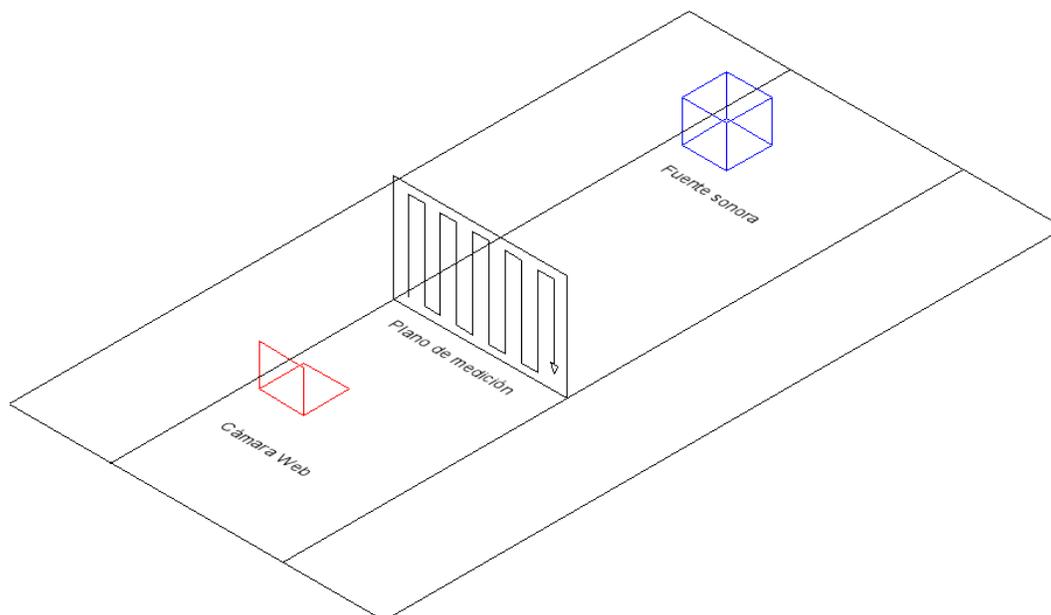
Se debe seleccionar un plano (virtual) con forma rectangular, cuyo vector normal se encuentre perpendicular a la fuente; este plano debe estar ubicado a una distancia comparable de la fuente como se muestra en la Fig. 11. Sobre este plano virtual se debe hacer un escaneo con la sonda PU de la forma indicada en la Fig. 12. Este proceso debe ser grabado por una cámara web, con la cual se hará seguimiento del recorrido a través de plano. Para mejores resultados se debe posicionar la cámara web de forma perpendicular al plano de medición [22]. En la Fig. 13. se muestra la disposición de la fuente y de la cámara web respecto al plano de medición.



**Fig. 11. Ejemplo de disposición de los elementos de medición.**



**Fig. 12.** Desplazamiento de la sonda a través del plano de medición (vista frontal).



**Fig. 13.** Disposición de los elementos de medición.

El tamaño de la superficie de medición debe ser proporcional a la longitud de onda máxima que se desee localizar, teniendo en cuenta las limitaciones en frecuencia de esta técnica de medida.

La sonda debe estar cubierta con una cinta de color, de tal forma que no se obstruyan los transductores. Esta cinta debe ser de un color que se diferencie en el sitio de medición, ya que a partir de la identificación de este color el software hará el seguimiento del recorrido de la sonda.

Para obtener la información de fase relativa se ubica un micrófono de referencia en una posición fija. Este micrófono debe ser ubicado en un lugar donde registre el campo sonoro durante todo el

procedimiento de medición. Este micrófono se debe encontrar cerca al plano de medición y debe estar enfocado por la cámara de video.

Debido a que la sonda hará captura de datos mientras se encuentra en movimiento, se puede producir error en los datos obtenidos por el efecto Doppler. Para hacer despreciable este efecto se recomienda una velocidad de escaneo de entre 2,5 a 5 cm/s [8].

En exteriores es necesario el uso de protección contra el viento, para vientos con velocidades superiores a 2 m/s, la protección se debe aplicar tanto a la sonda como al micrófono de referencia.

### **Captura de datos.**

A partir del seguimiento del recorrido de la sonda a través de la superficie virtual de medición, el software Scan & Paint asigna una porción de la señal grabada a cada tramo del recorrido registrado por la cámara. De esta forma, se discretiza la superficie de medición en subregiones. Cada subregión corresponde a un elemento del formador de haz.

La resolución y precisión de la localización en alta frecuencia dependen del tamaño y la cantidad de subregiones escogidas, es decir que las dimensiones de cada celda deben ser proporcionales a la longitud de onda correspondiente a la máxima frecuencia que se desee localizar.

### **Posibles causas de error.**

Una mala alineación entre el plano de medición y el eje de la cámara web puede generar una desviación en los resultados. Se debe buscar una buena ubicación de la cámara web.

Errores como entrar en contacto con la superficie de medida o emitir ruidos durante el proceso de medición son inherentes a esta técnica de medición. Estos errores pueden ser corregidos en la etapa de post-procesamiento.

### **5.3. Características de las mediciones realizadas.**

Las mediciones de localización de fuentes sonoras se realizaron en dos diferentes espacios: Un espacio cerrado, con absorción acústica, y un espacio abierto. Como espacio cerrado se tomó el *rec*

room del Estudio A (ver Anexo A). El espacio abierto escogido se encuentra en el campus de la Universidad de San Buenaventura sede Bello.

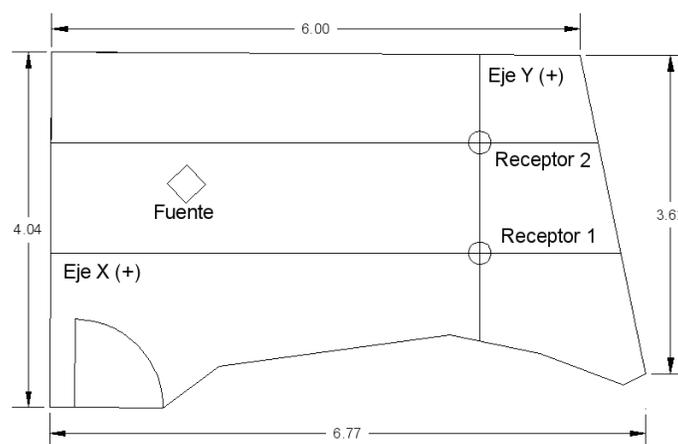
Para llevar el experimento a cabo se tomaron dos fuentes diferentes, una fuente electroacústica y una fuente rotativa. La fuente electroacústica era una cabina que emitía ruido rosa con componentes tonales en 250 Hz, 500 Hz y 1000Hz. La fuente rotativa tomada es la base-motor de una licuadora *Oster*. Las posiciones de receptor fueron tomadas a distancias superiores a 1,80 metros de la fuente, con el fin de asegurar que estas se encontraran en el campo lejano para frecuencias superiores a los 200 Hz.

A continuación, se presentan los procedimientos utilizados para las mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica y para la técnica formación de haz.

### 5.3.1. Mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica.

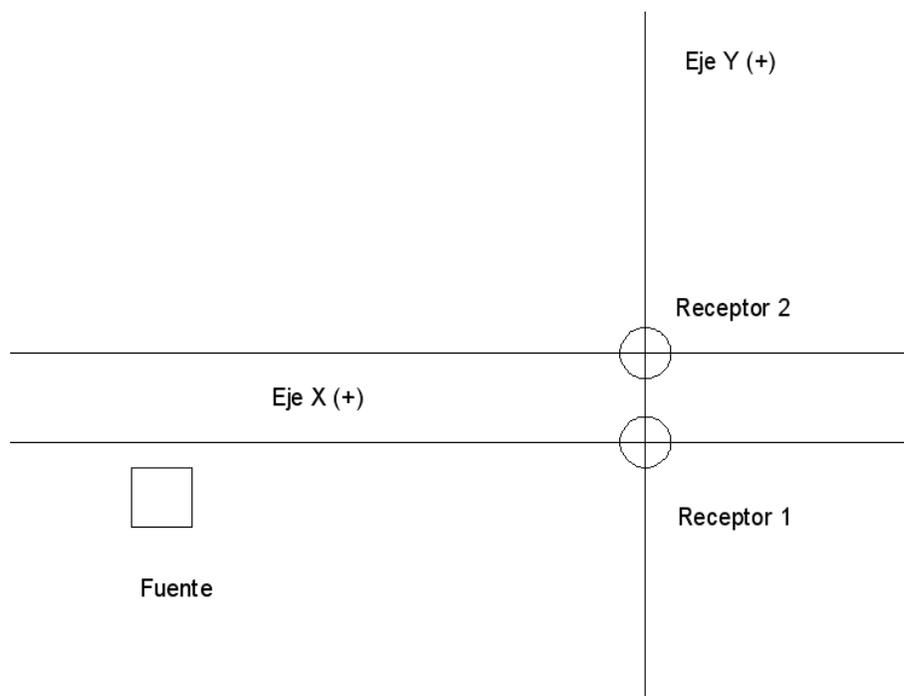
Para estas mediciones se tomaron 2 puntos de receptor, en los cuales se realizó el procedimiento descrito en el apartado 5.2.2. Para cada una de las dimensiones espaciales (X, Y y Z) se midió con la sonda P-U durante un periodo no inferior a 10 segundos.

Para la medición realizada en espacio cerrado, la posición de receptor 1 se encontraba a 3,70 metros de la fuente y con ángulos de  $21^\circ$  en azimut y  $9^\circ$  en elevación. La posición de receptor 2 se encontraba a 3,40 metros de la fuente y con ángulos de  $4^\circ$  en azimut y 6 grados en elevación, como se muestran en la Fig. 14. En esta medición la fuente no electroacústica se encontraba ubicada sobre una mesa.



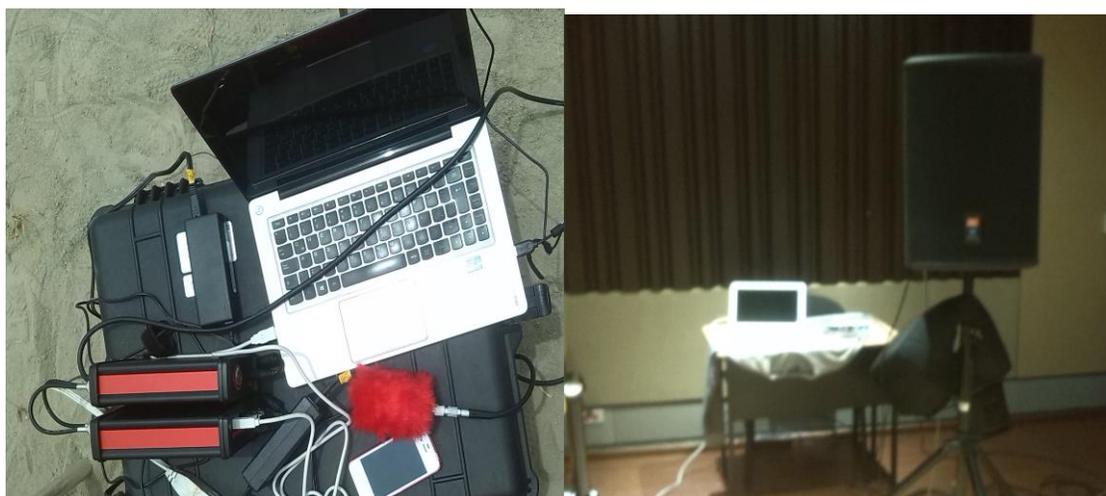
**Fig. 14. Esquema de los puntos de medición en el *rec room* del Estudio A (vista en planta). Dimensiones en metros**

Para las mediciones en espacio abierto se aplicó protección contra el viento a la sonda. En estas mediciones La posición de receptor 1 se encontraba a  $7^\circ$  en azimut y 6 grados en elevación respecto a la fuente. La posición de receptor 2 se hallaba a  $17^\circ$  en azimut y 6 grados en elevación de la fuente. Las posiciones tomadas se muestran en la Fig. 15.



**Fig. 15. Esquema de medición en espacio abierto (Vista en planta)**

Tanto para las mediciones en espacio cerrado como las de espacio abierto la sonda se ubicó a 1,05 metros del suelo. En la Fig. 16. se muestran fotografías de los montajes de medición.



**Fig. 16. Fotografías del montaje de medición**

### 5.3.2. Mediciones de localización de fuentes sonoras a partir de la técnica de formación de haz.

La superficie de medición tomada para estas mediciones fue de  $4\text{m}^2$  enmarcados por una estructura hecha en tubos de PVC de 2 metros de largo por 2 metros de alto. El recorrido de la sonda estaba demarcado por hilos amarrados de forma horizontal a través de la estructura, los hilos se encontraban separados a 40 cm entre sí. Con esto se aseguraba un recorrido uniforme de la sonda a través del área de escaneo.

Como sensor de referencia se tomó el sensor de presión de otra sonda P-U. Este se ubicó en un lugar en el cual fuera visible para la cámara.

En las mediciones realizadas en espacio cerrado la fuente sonora se ubicó a 1,80 metros de la superficie de medición mientras la cámara de video se ubicaba a 2,50 metros de la superficie de medición, la posición de la fuente en esta medición se tomó conservando como mínimo 1,50 metros de las paredes, como se muestra en la Fig. 17. Para las mediciones realizadas en espacio abierto la distancia fuente-superficie de medición tomada fue de 7,60 metros y la distancia cámara-superficie de medición fue de 2,50 metros como se muestra en la Fig. 18. La duración de cada medición fue aproximadamente de 1 minuto y treinta segundos.

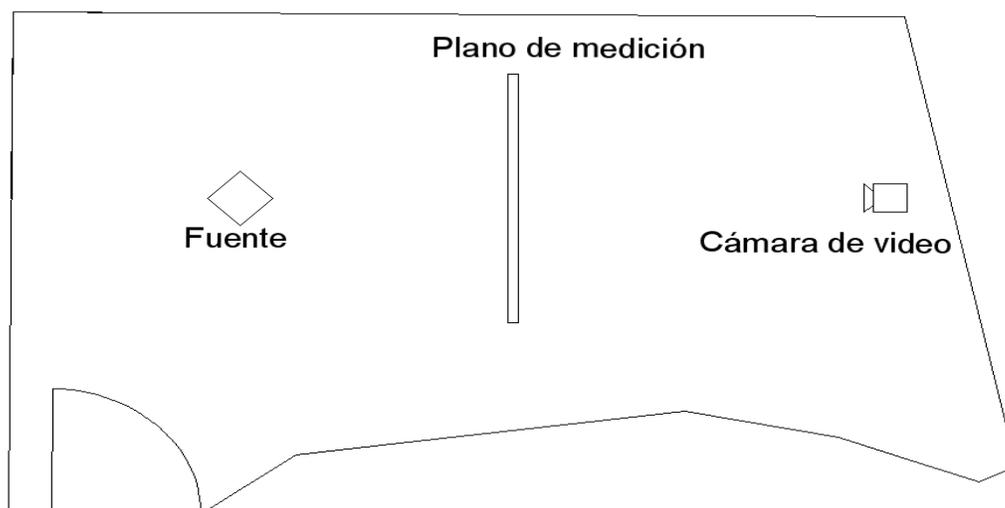
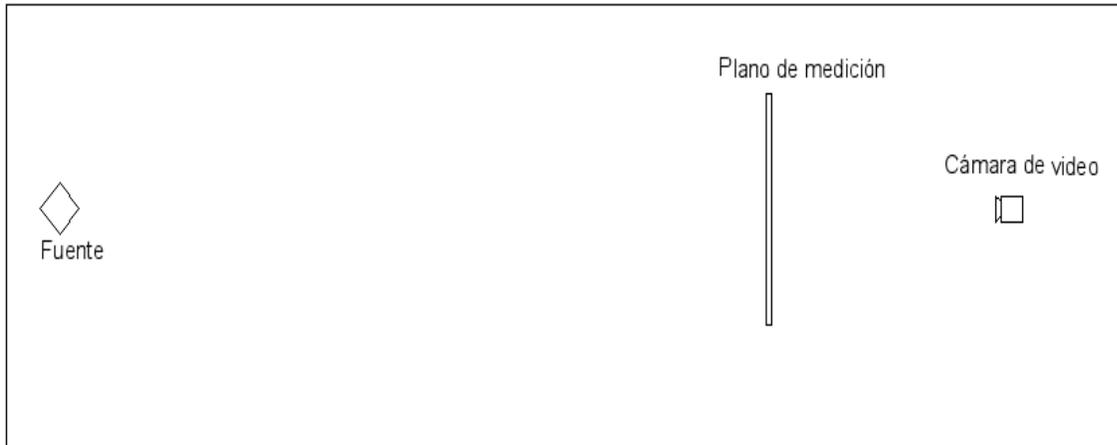


Fig. 17. Esquema de medición en espacio cerrado (vista en planta).



**Fig. 18. Esquema de medición en espacio abierto (vista en planta).**

Tanto para las mediciones en espacio cerrado como en espacio abierto el sensor de referencia se ubicó a 1 metro del suelo. La sonda P-U fue cubierta con una pantalla anti-viento la cual tenía un color rojo que se distinguía de los demás elementos presentes en el cuadro registrado por la cámara de video, esto para facilitar el posterior seguimiento por parte del software.

En la Fig. 19. se muestran fotografías de los montajes de medición.



**Fig. 19. Fotografías de los montajes de medición de localización de fuentes.**

También se realizaron estas mediciones en una obra de construcción, para la cual se buscó localizar la fuente de ruido principal, que era una bomba que se encontraba en la planta de mezclado de cemento de la obra. Se tomó un punto cercano al interior de la planta, ubicando el plano de

medición a 10 metros de la fuente, y se tomó un segundo punto desde el balcón de un apartamento en construcción ubicado en el cuarto piso del edificio, desde el cual se tenía vista directa a la planta, para este último punto se desconocía la distancia de la fuente a la superficie de medición. En la Fig. 20. se muestran fotografías de los lugares donde se realizaron las mediciones.



**Fig. 20. Fotografías de los puntos de medición en la obra de construcción. (Izq) Bombas de cemento, principales fuentes de ruido de la obra. (Der) Vista de la planta de mezcla de cemento desde un apartamento cercano.**

## 6. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de reconocimiento del vector de intensidad y de localización de fuentes sonoras a partir de la técnica de formación de haz, realizadas tanto en espacio cerrado como en espacio abierto.

### 6.1. Mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica.

Los resultados obtenidos de las mediciones de reconocimiento del vector de intensidad se dan en términos del ángulo azimutal. Se presentan esquemas con vista en planta de las locaciones de medición y con diferentes colores se muestra el ángulo de la fuente identificado tras la medición.

#### 6.1.1. Mediciones en espacio cerrado.

##### 6.1.1.1. Fuente electroacústica.

Para la localización de la fuente electroacústica fueron evaluadas las frecuencias de 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz., como se muestra en la Fig. 21. Los ángulos hallados para los dos puntos de receptor tomados se muestran en las Tablas II y III. Gráficamente estos resultados se pueden apreciar en las Fig. 22. a la 25.

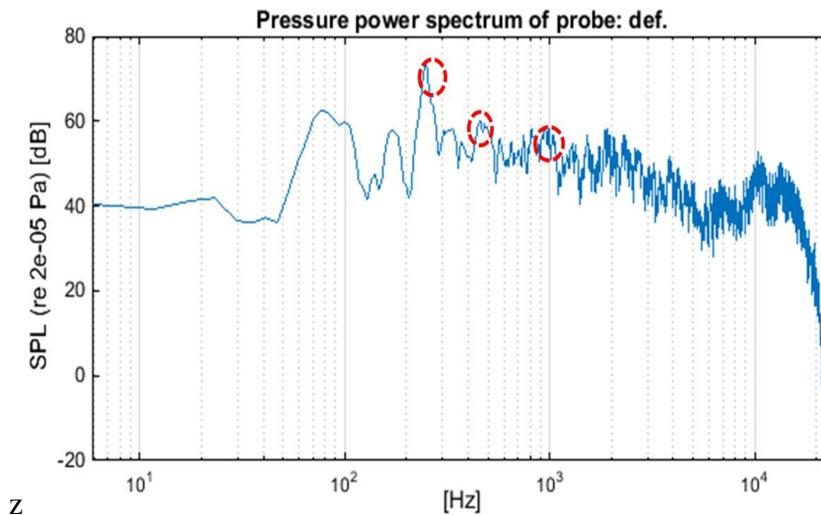
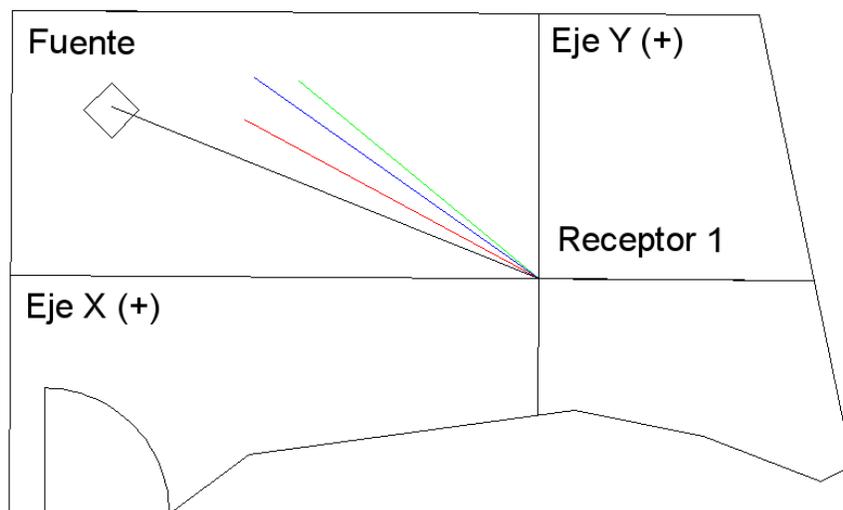


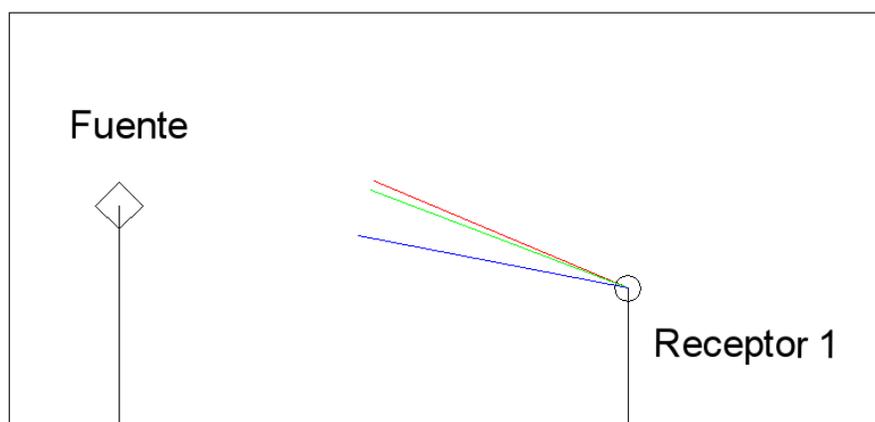
Fig. 21. Densidad espectral hallada para la fuente electroacústica.

**Tabla II. Ángulos en azimut hallados para la fuente electroacústica en la posición de receptor 1.**

Frecuencia (Hz)	250	500	1000
Elevación (°)	22,58	20,49	10,82
Azimut (°)	27,72	38,42	34,97



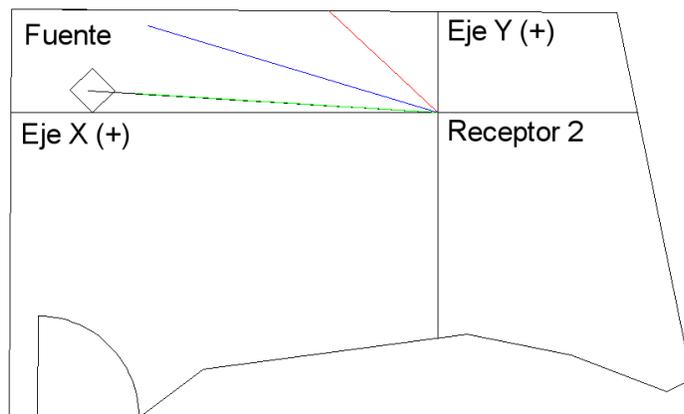
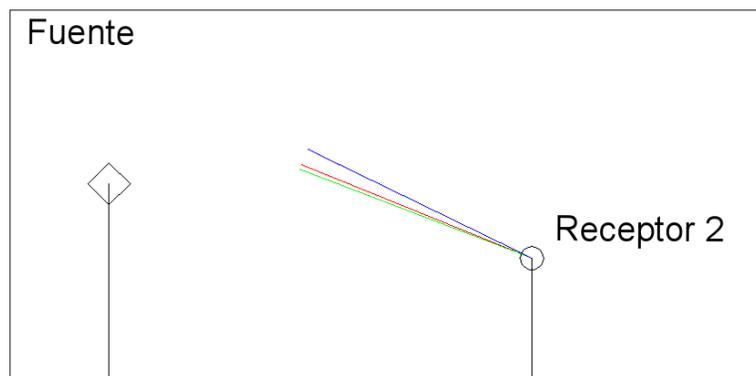
**Fig. 22. Direcciones halladas para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).**



**Fig. 23. Ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).**

**Tabla III. Ángulos hallados para la fuente desde el punto de receptor 2.**

Frecuencia (Hz)	250	500	1000
Elevación (°)	21,87	20,95	25,18
Azimut (°)	43,86	5,25	17,71

**Fig. 24. Plano con vista en planta de los ángulos hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).****Fig. 25. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).**

### 6.1.1.2. Fuente no electroacústica.

Para localizar la fuente no electroacústica se evaluaron las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, como se muestra en la Fig. 26. En las Tablas IV y V se presentan los ángulos en azimut obtenidos de las mediciones, los cuales se observan gráficamente en las Fig. 27. a la 30.

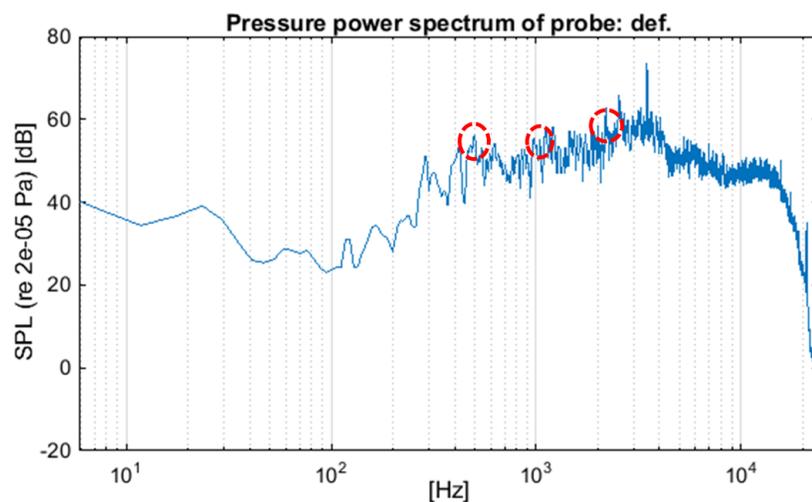


Fig. 26. Densidad espectral hallada para la fuente no electroacústica.

Tabla IV. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2.

Frecuencia (Hz)	500	1000	2000
Elevación (°)	49,68	34,58	35,75
Azimut (°)	38,77	21,78	34,10

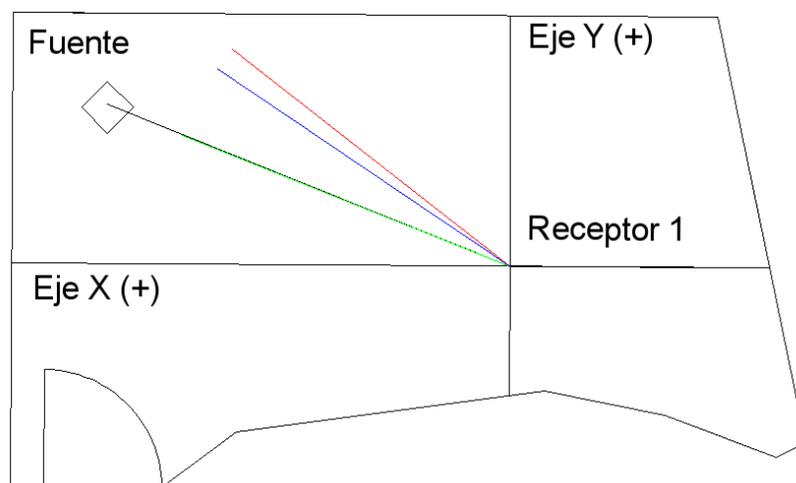
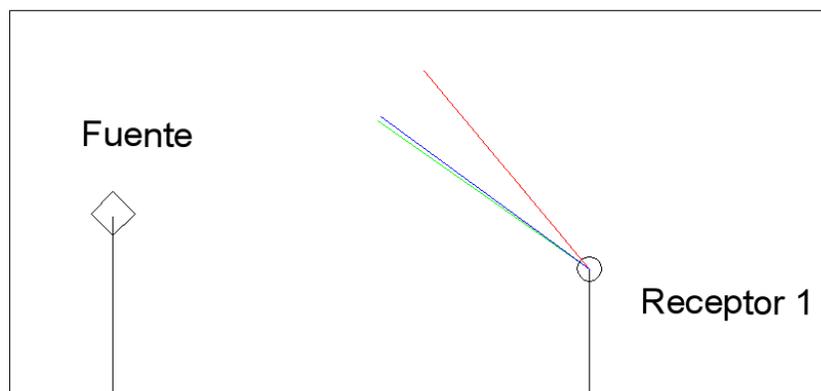


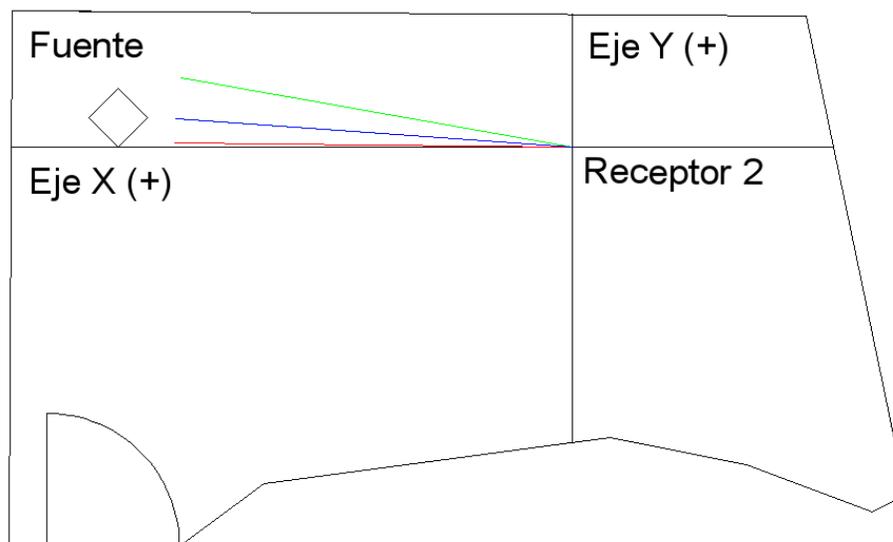
Fig. 27. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).



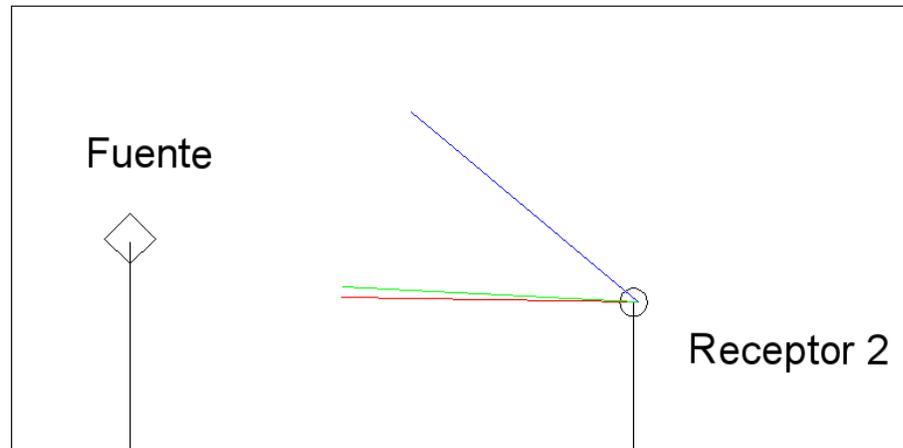
**Fig. 28.** Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).

**Tabla V.** Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2.

Frecuencia (Hz)	500	1000	2000
Elevación (°)	1,17	3,28	40,50
Azimut (°)	0,62	9,14	4,08



**Fig. 29.** Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).



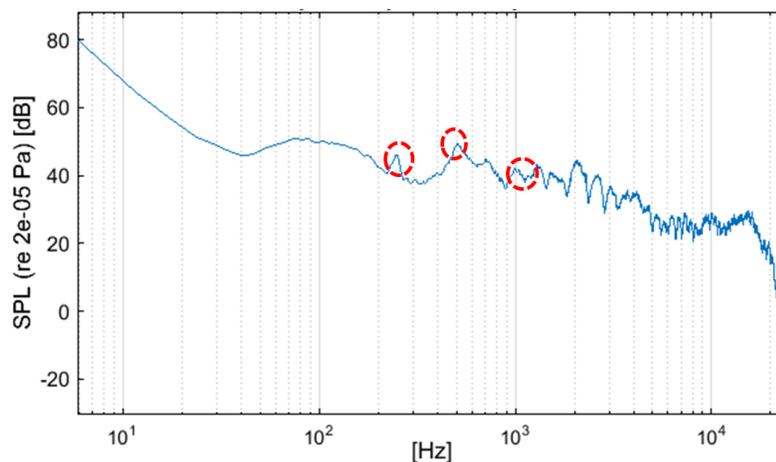
**Fig. 30. Plano con vista lateral de los ángulos en elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).**

## **6.1.2 Mediciones en espacio abierto.**

### **6.1.2.1. Fuente electroacústica.**

En estas mediciones se buscó caracterizar los ángulos de azimut y elevación a los cuales se encontraba la fuente respecto a los puntos de medición. Para lograr esto, se buscó que el nivel de presión sonora se encontrara por encima del ruido de fondo presente en el sitio de medición. En el caso de la fuente electroacústica, el nivel de presión sonora generado por esta se encontraba 28,9 dB por encima del nivel de ruido de fondo y para el caso de la fuente no electroacústica, el nivel de presión sonora generado por esta se encontraba 22,5 dB por encima del ruido de fondo. La velocidad del viento registrada durante esta medición oscilaba entre los 0,2 y 2,1 m/s.

En la Fig. 31. se muestra la densidad espectral de potencia hallada para la fuente electroacústica y se señalan frecuencias de interés sobre las cuales se realizó la localización.

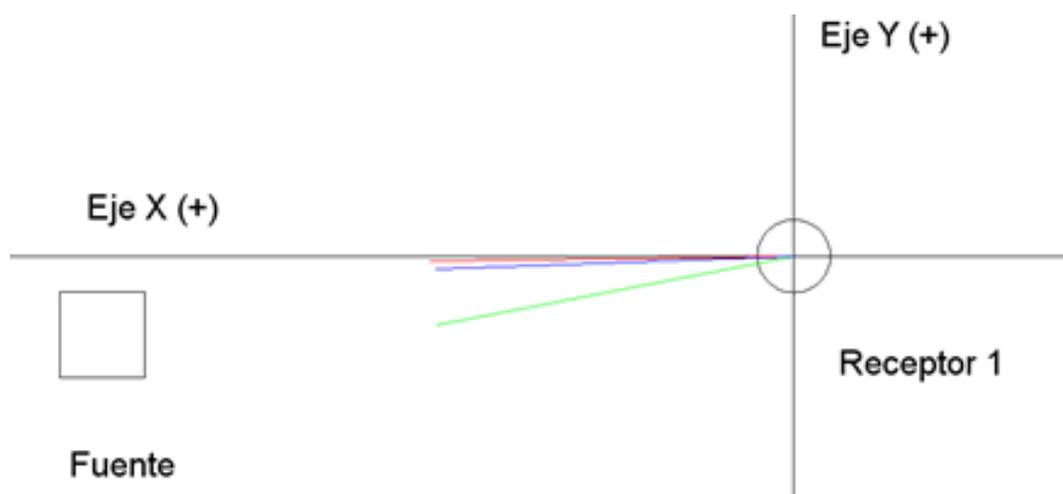


**Fig. 31. Densidad espectral hallada para la fuente electroacústica.**

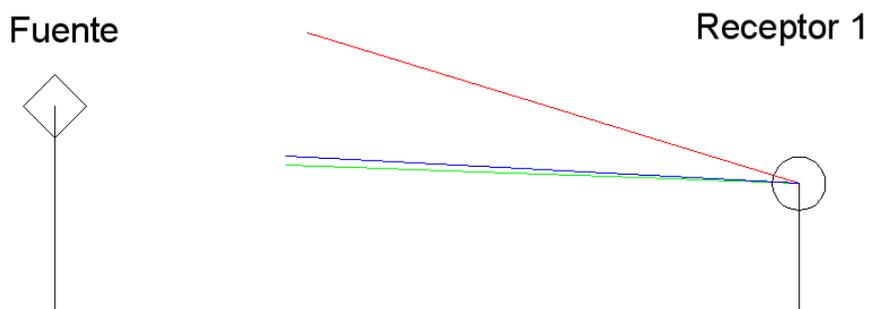
En la Tabla VI. se muestran los ángulos de elevación y azimut para las frecuencias de interés. Dichos ángulos se muestran de manera gráfica en las Fig. 32. y 33.

**Tabla VI. Ángulos en azimut hallados para la fuente electroacústica en la posición de receptor 1.**

Frecuencia (Hz)	250	500	1000
Elevación (°)	17,50	1,87	2,88
Azimut (°)	-0,77	-11,07	-2,61



**Fig. 32. Direcciones halladas para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1(250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).**

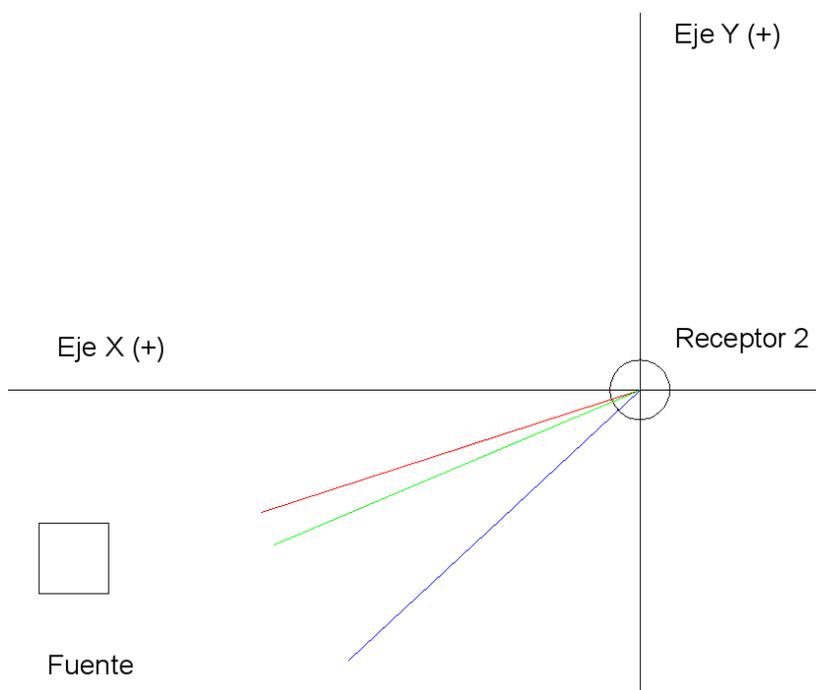


**Fig. 33. Ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 1 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).**

Para la posición de receptor 2 se obtuvo los ángulos que se muestran en la Tabla VII. Estos se pueden apreciar gráficamente en las Fig. 34. y 35.

**Tabla VII. Ángulos hallados para la fuente desde el punto de receptor 2.**

Frecuencia (Hz)	250	500	1000
Elevación (°)	-54,77	8,40	5,35
Azimut (°)	-17,88	-23,61	-43,96



**Fig. 34. Plano con vista en planta de los ángulos hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).**

Fuente

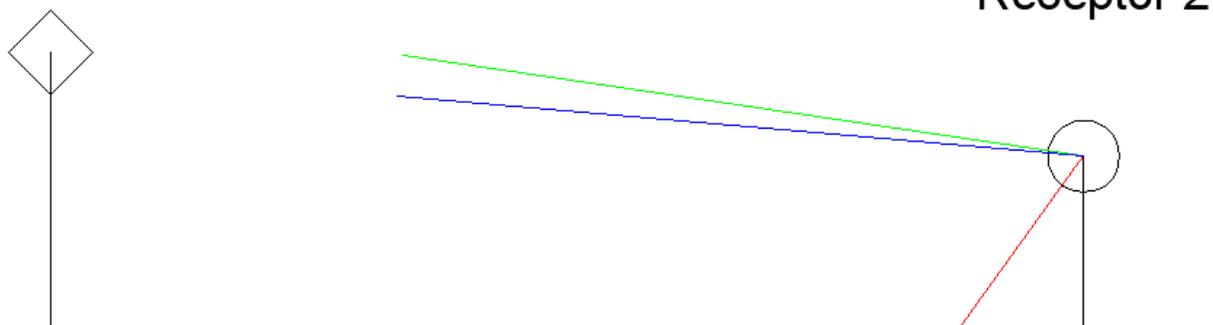


Fig. 35. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente electroacústica desde el punto de receptor 2 (250 Hz en rojo, 500 Hz en verde, 1000 Hz en azul).

### 6.1.2.2. Fuente no electroacústica.

De las mediciones realizadas para obtener la localización de la fuente no electroacústica se halla la densidad espectral de potencia que se observa en la Fig. 36. donde también se señalan las frecuencias de interés para la cuales se obtuvo la localización.

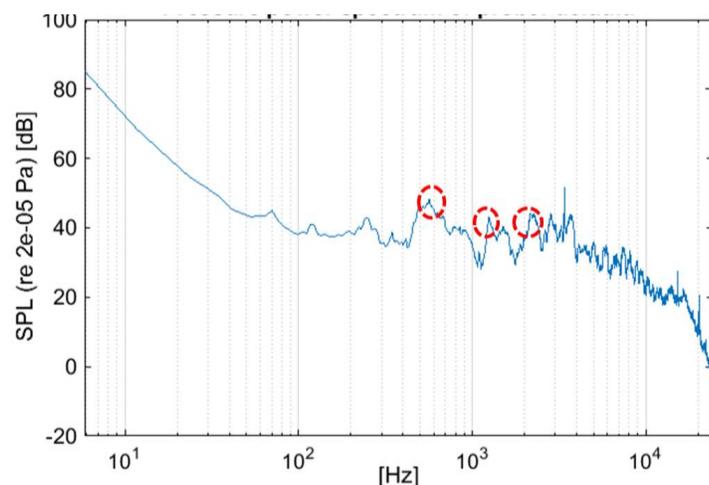
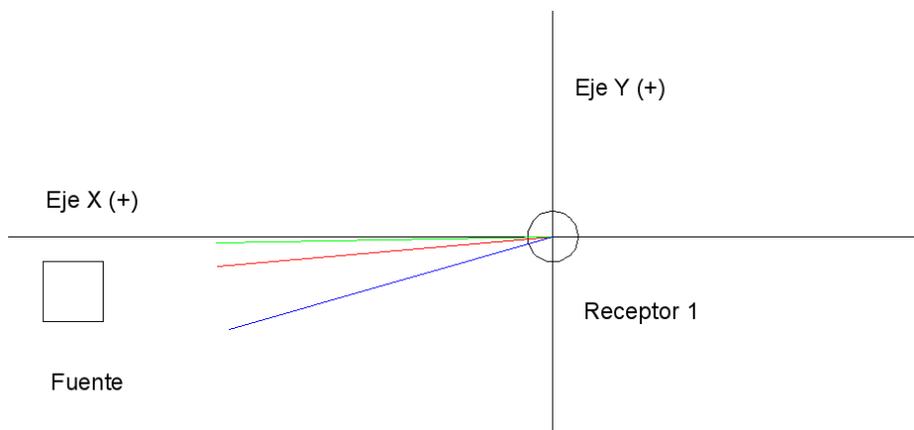


Fig. 36. Densidad espectral hallada para la fuente no electroacústica.

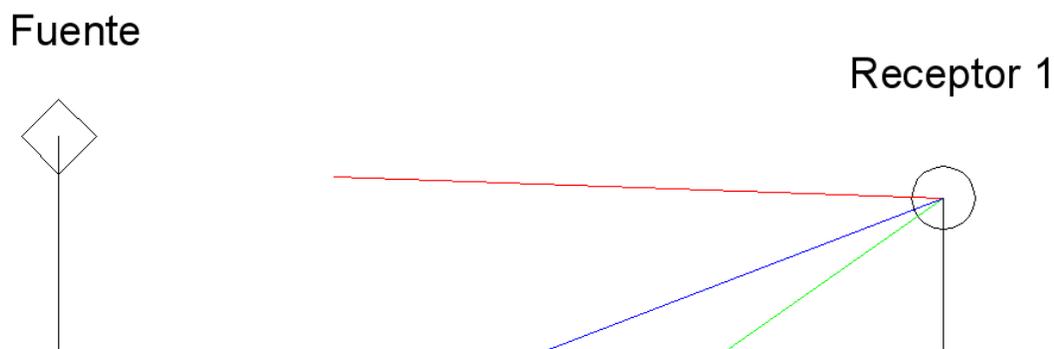
En la Tabla VIII se muestran los ángulos en elevación y azimut hallados para la posición de receptor 1. Estos se pueden apreciar de manera gráfica en las Fig. 37. y 38.

**Tabla VIII. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2.**

Frecuencia (Hz)	500	1000	2000
Elevación (°)	2,32	-35,84	-21,79
Azimut (°)	-5,24	-1,05	-16,20



**Fig. 37. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).**

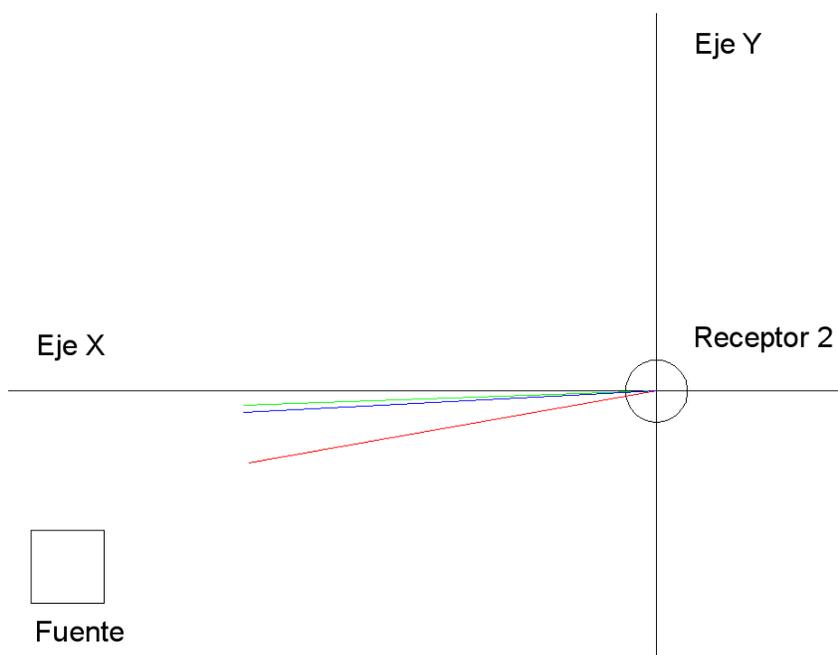


**Fig. 38. Plano con vista lateral de los ángulos de elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).**

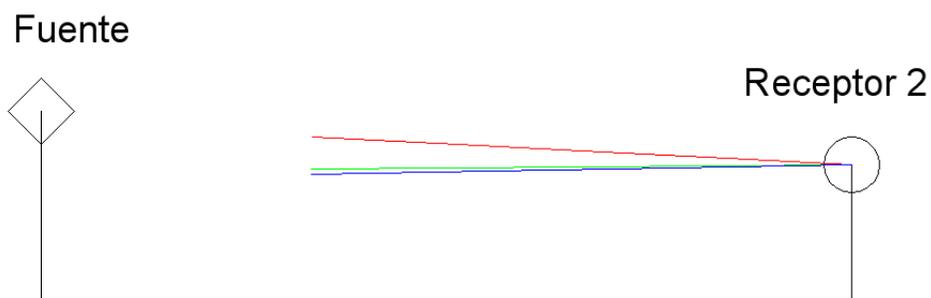
Para la posición de receptor 2 se hallaron los ángulos en elevación y azimut que se muestran en la Tabla IX. Estos ángulos se encuentran representados gráficamente en las Fig. 39. y Fig. 40.

**Tabla IX. Ángulos en azimut hallados en diferentes frecuencias para la fuente no electroacústica en la posición de receptor 2.**

Frecuencia (Hz)	500	1000	2000
Elevación (°)	3,32	-0,45	-1,15
Azimut (°)	-10,60	-2,66	-2,45



**Fig. 39. Plano con vista en planta de los ángulos en azimut hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).**



**Fig. 40. Plano con vista lateral de los ángulos en elevación hallados para la fuente no electroacústica desde el punto de receptor 21 (500 Hz en rojo, 1000 Hz en verde, 2000 Hz en azul).**

## 6.2. Mediciones de localización de fuentes mediante la técnica de formación de haz.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de localización de fuentes de sonoras a partir de la técnica de formación de haz. Los resultados se muestran en una serie de figuras donde se observan gráficos de densidad espectral con las principales frecuencias de análisis para cada fuente en cada locación de medición y se muestran los resultados obtenidos en holografías, con escala de color en decibeles SPL, donde se señala la posición de la fuente sonora. Debido a las características de las mediciones, las frecuencias de interés tomadas se ven limitadas entre los 500 Hz y los 1700 Hz.

### 6.2.1. Mediciones en espacio cerrado.

#### 6.2.1.1. Fuente electroacústica.

Para la fuente electroacústica se evalúa la localización de esta, alrededor de las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz, como se muestra en la Fig. 41. La localización de la fuente se muestra en las Fig. 42. y Fig. 43.

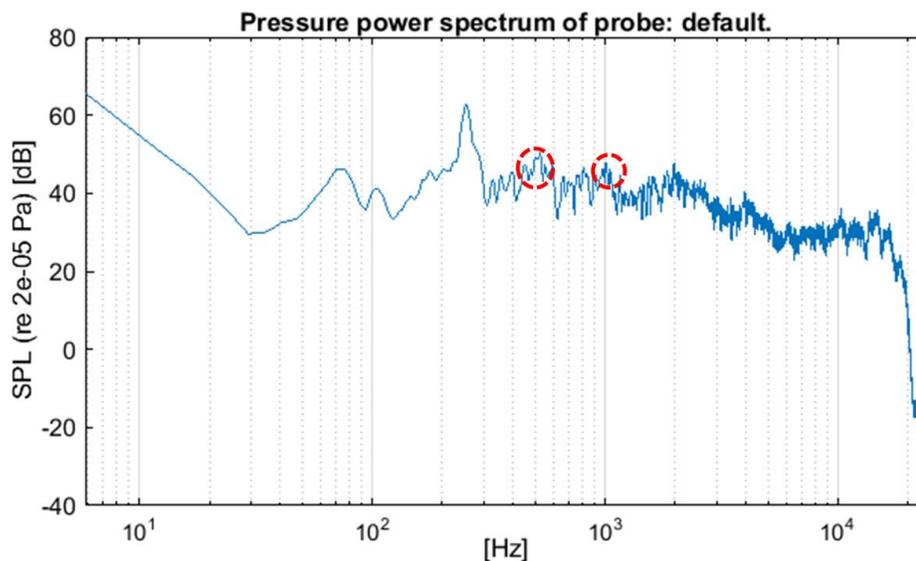


Fig. 41. Densidad espectral de potencia hallada para la fuente electroacústica.

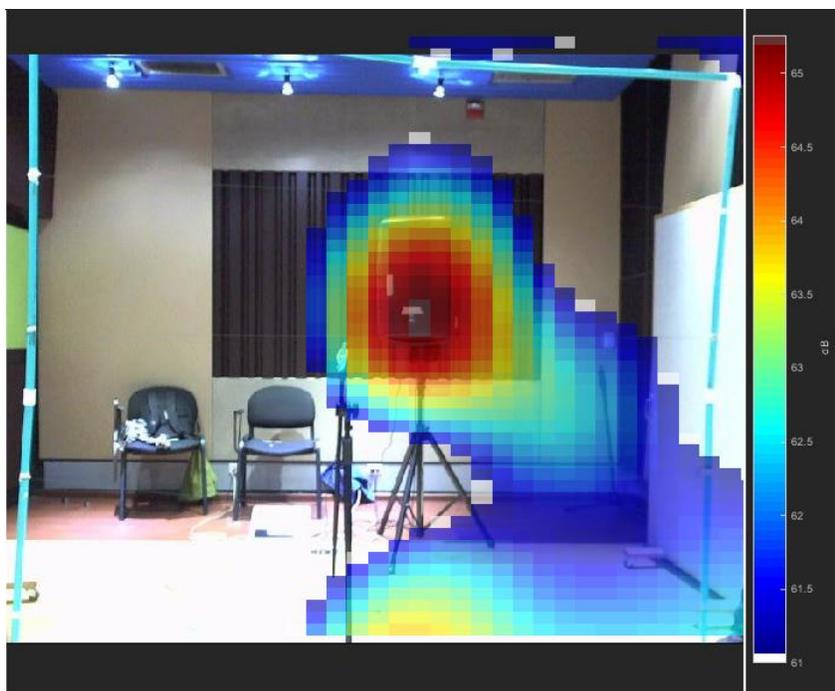


Fig. 42. Localización obtenida de la fuente electroacústica alrededor de los 500 Hz.

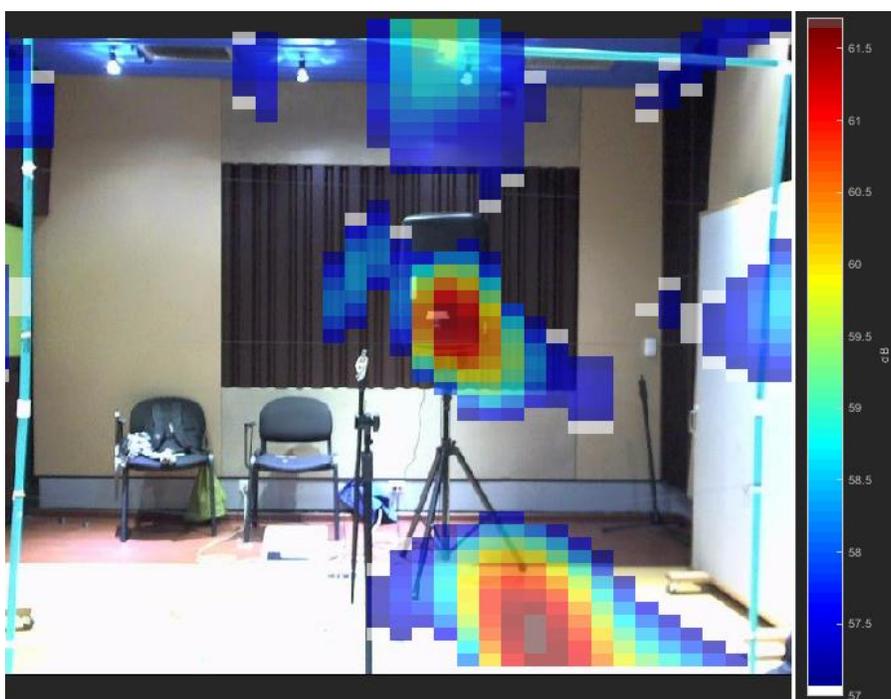


Fig. 43. Localización de la fuente electroacústica hallada para la frecuencia de 1 kHz.

### 6.2.1.2. Fuente no electroacústica.

Para la fuente no electroacústica se evalúa la localización de esta, alrededor de las frecuencias de 500 Hz y 1,2 kHz, como se muestra en la Fig. 44.

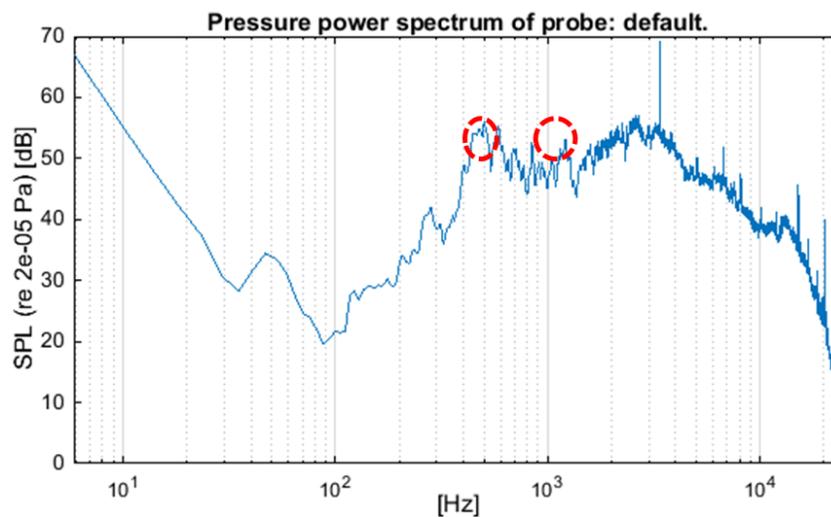


Fig. 44. Densidad espectral medido de la fuente no electroacústica.

En las Fig. 45. y Fig. 46. se muestra la localización de la fuente para las frecuencias de análisis.

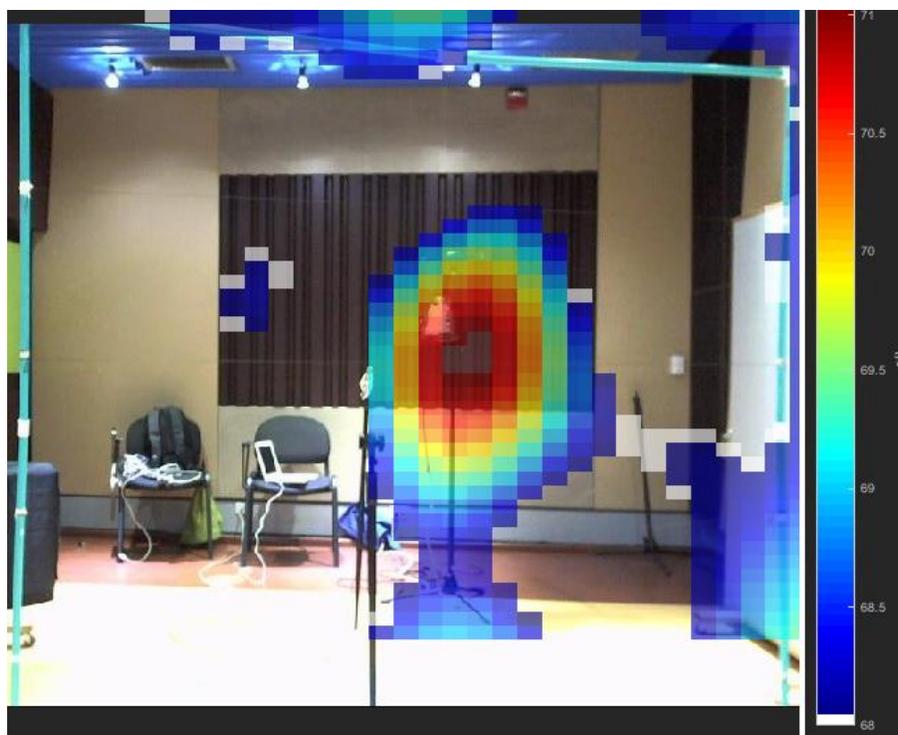


Fig. 45. Localización de la fuente no electroacústica alrededor de los 500 Hz.

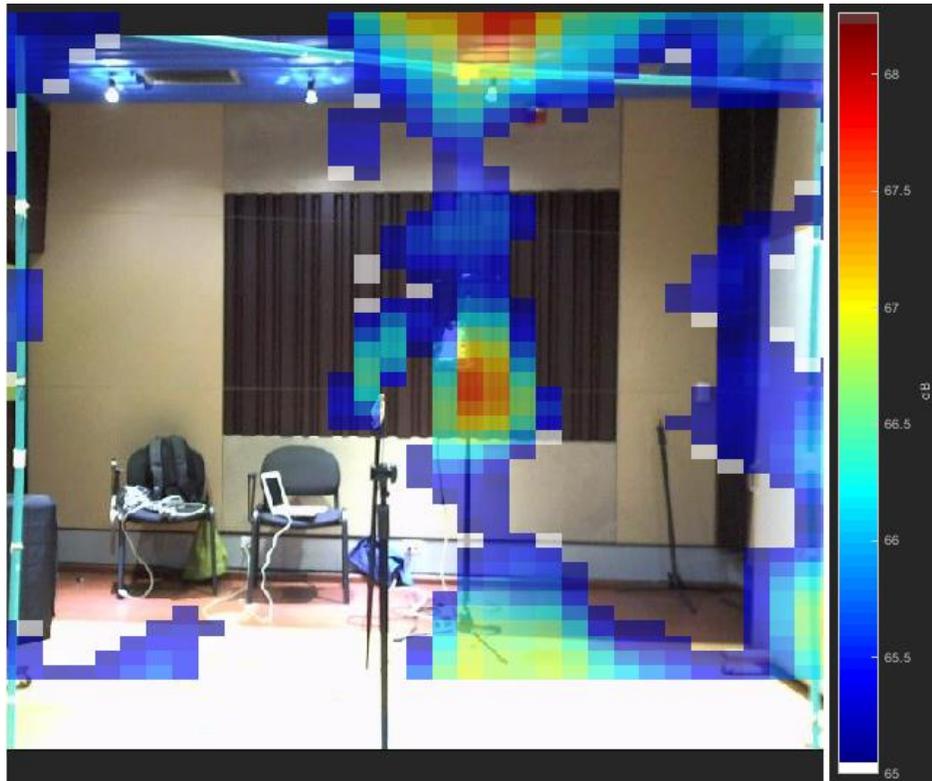


Fig. 46. Localización de la fuente no electroacústica hallada para la frecuencia de 1,2 kHz.

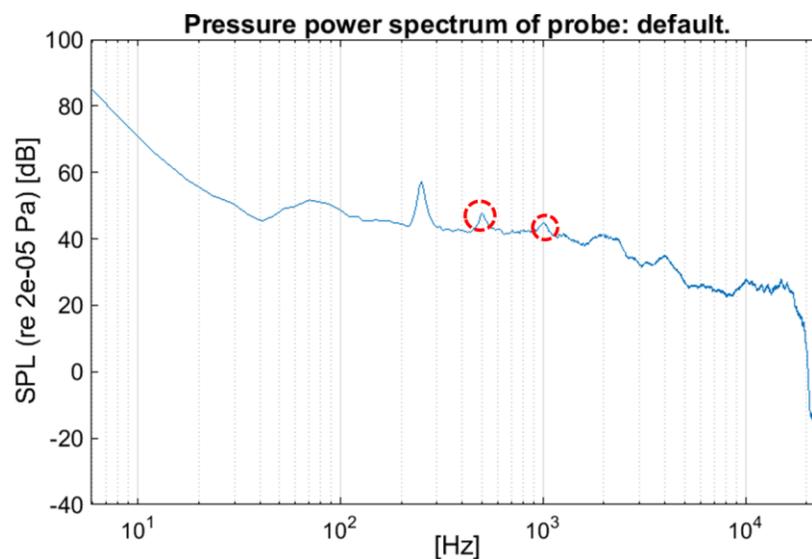
## 6.2.2. Mediciones en espacio abierto.

### 6.2.2.1. Fuente electroacústica.

Debido a que estas mediciones se realizaron en un lugar abierto, se procuró que el nivel de presión sonora generado por la fuente estuviera por encima del nivel de ruido de fondo presente en dicho lugar. El nivel de presión sonora generado por la fuente electroacústica se encontraba 20,6 dB por encima del nivel de ruido de fondo, mientras para la fuente no electroacústica se superó el nivel de ruido de fondo por 14,6 dB. También se registró la velocidad del viento la cual oscilaba entre 0,5 y 2,2 m/s. Durante estas mediciones el eje de la cámara de video se encontraba desalineado del eje normal del plano de medición. Sin embargo, este error se pudo corregir durante la etapa de post-procesamiento.

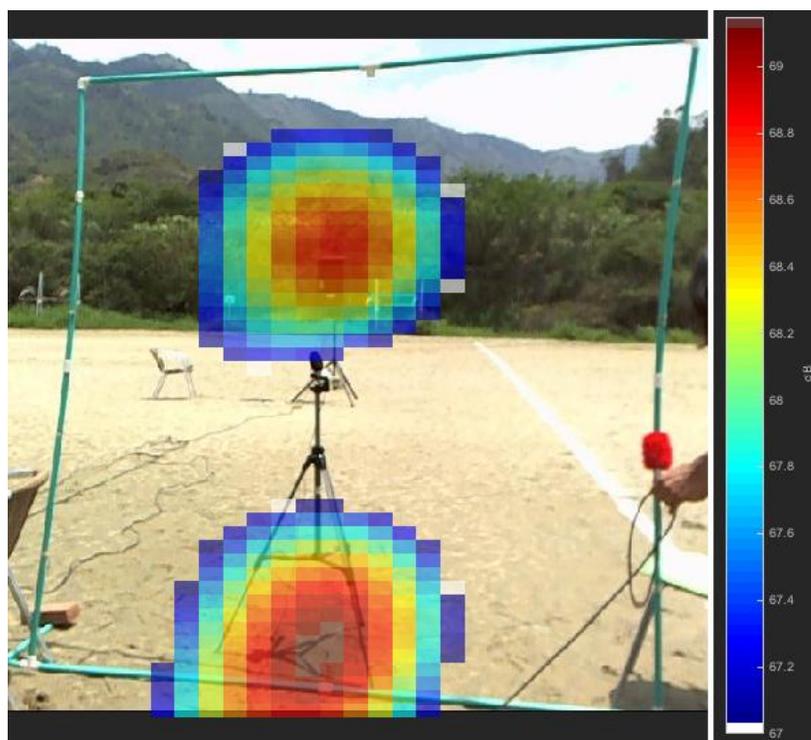
Para la fuente electroacústica se realizó la localización de la fuente alrededor de las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz como se muestra en la Fig. 47. No se realiza análisis en la frecuencia de 250 Hz

debido a que las condiciones de la medición no permiten extender el análisis por parte del software *Scan & Paint VPA*.



**Fig. 47. Densidad espectral obtenida de la fuente electroacústica.**

En las Fig. 48. y Fig. 49. se muestra la localización de la fuente en las frecuencias de interés.



**Fig. 48. Localización de la fuente electroacústica obtenida para la frecuencia de 500 Hz.**

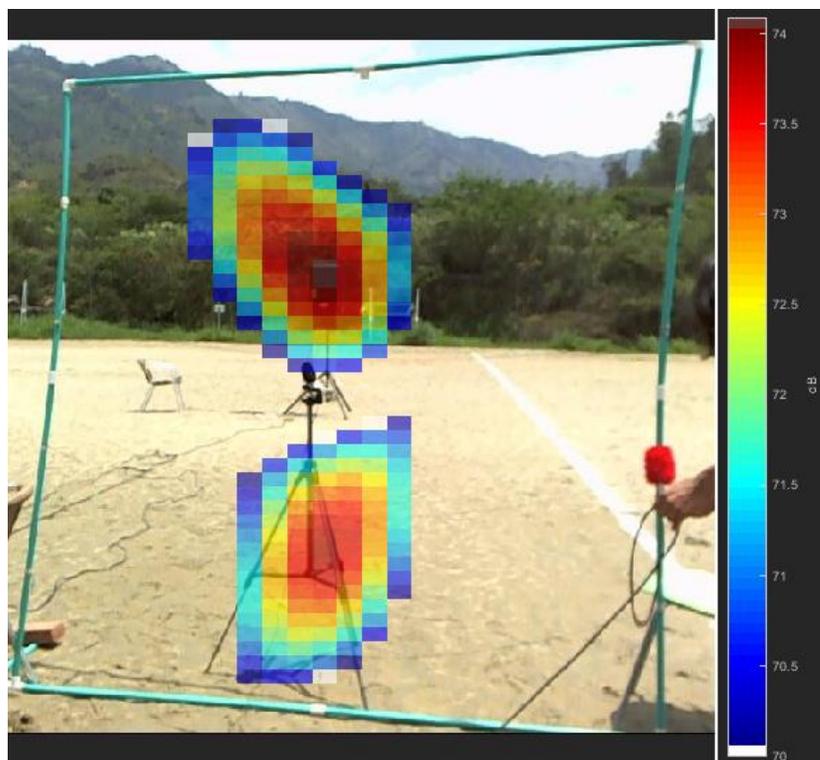


Fig. 49. Localización de la fuente sonora para la frecuencia de 1 kHz.

#### 6.2.2.2. Fuente electroacústica.

Para la fuente no electroacústica se obtuvo la localización alrededor de las frecuencias de 500 Hz y 1,2 kHz como se muestra en la Fig. 50.

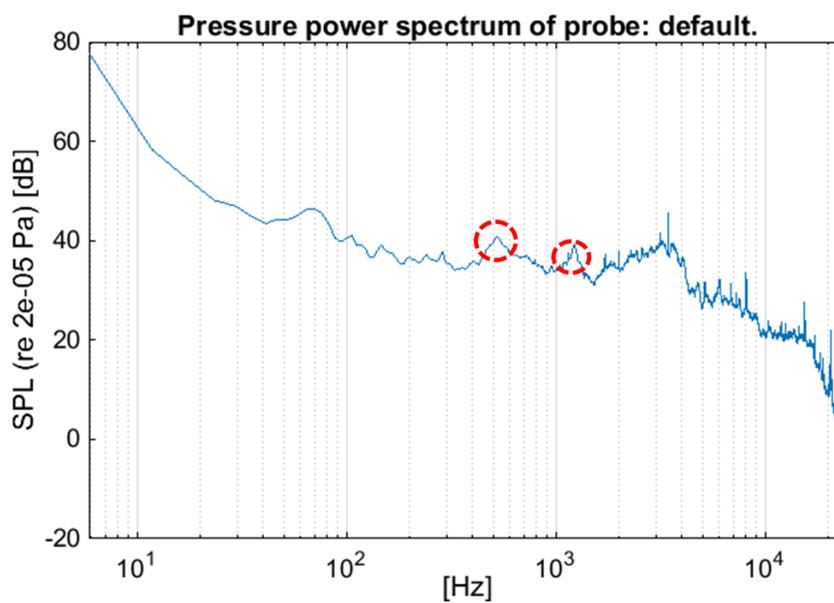
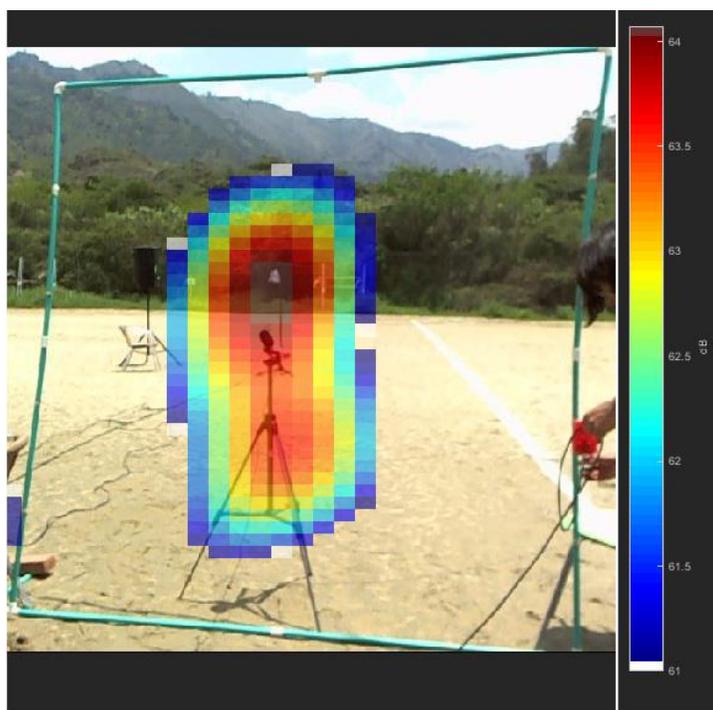
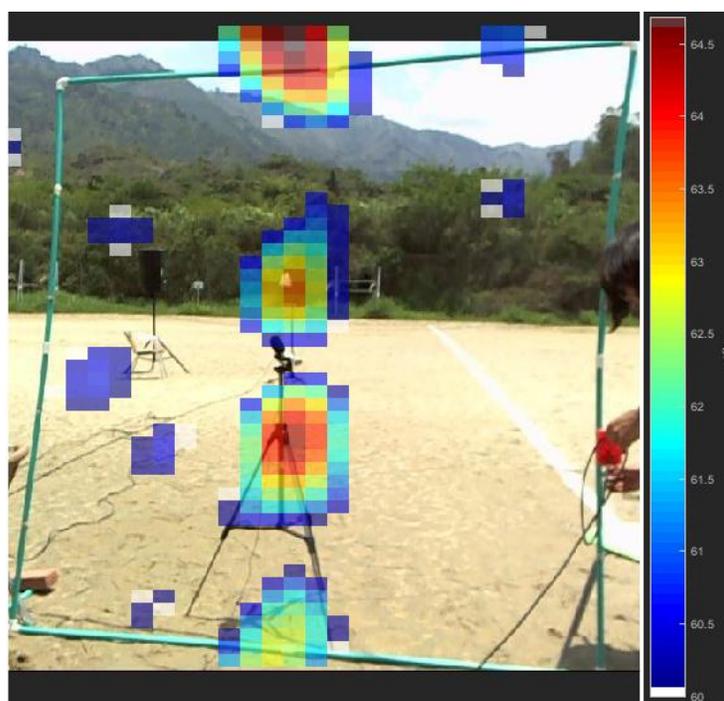


Fig. 50. Densidad espectral hallada para la fuente no electroacústica.

La localización de la fuente no electroacústica en las frecuencias de interés se muestra en las Fig. 51. y Fig. 52.



**Fig. 51. Localización de la fuente no electroacústica para la frecuencia de 500 Hz.**



**Fig. 52. Localización de la fuente no electroacústica para la frecuencia de 1 kHz.**

### 6.2.3 Mediciones en una obra de construcción.

Para las mediciones realizadas cerca de la planta de mezclado de cemento se obtiene la densidad espectral de potencia que se muestra en la Fig. 53. donde se observan las frecuencias de interés sobre las cuales se obtuvo la localización de la fuente de ruido, la cual es presentada en las Fig. 54. y Fig. 55. A pesar de que se encuentra una componente significativa alrededor de los 60 Hz, no se realiza análisis debido a que las condiciones de la medición no permiten este análisis en baja frecuencia.

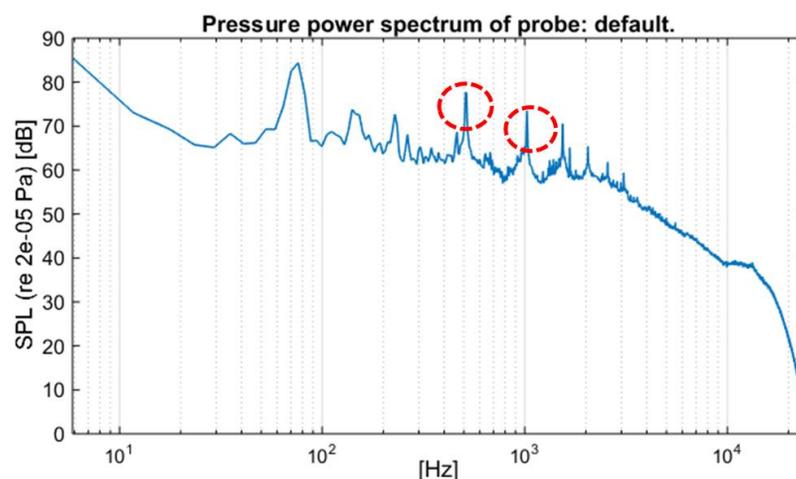


Fig. 53. Densidad espectral obtenida en la medición realizada en la planta de mezclado de cemento de la obra.

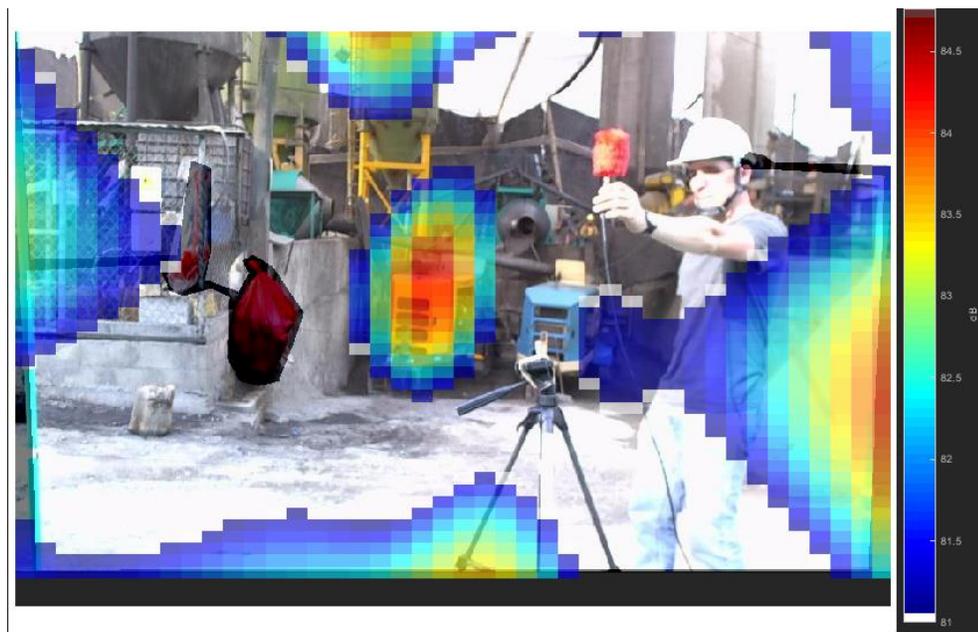
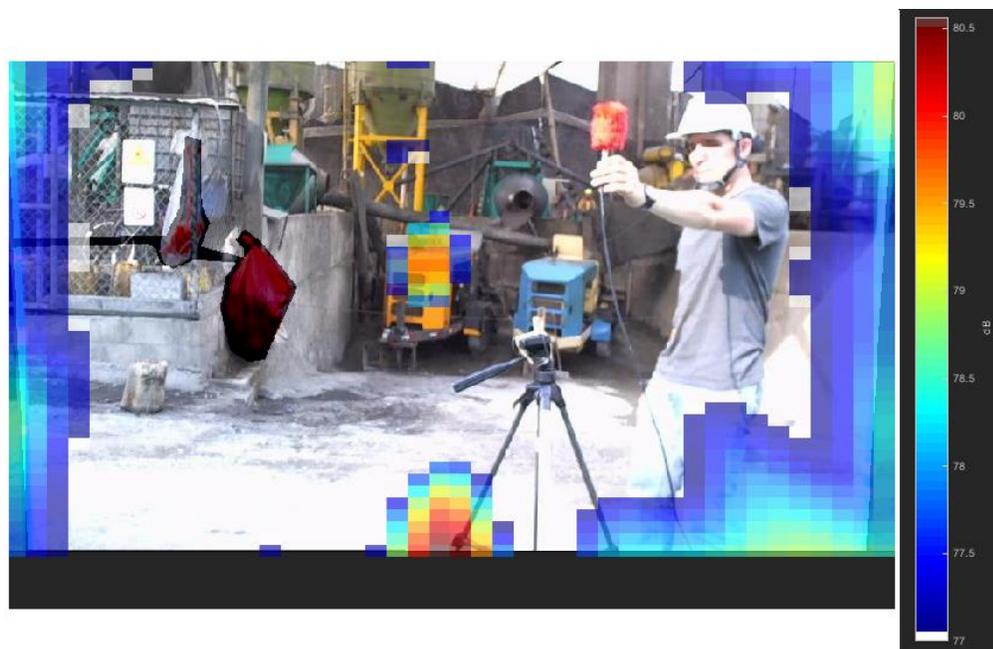
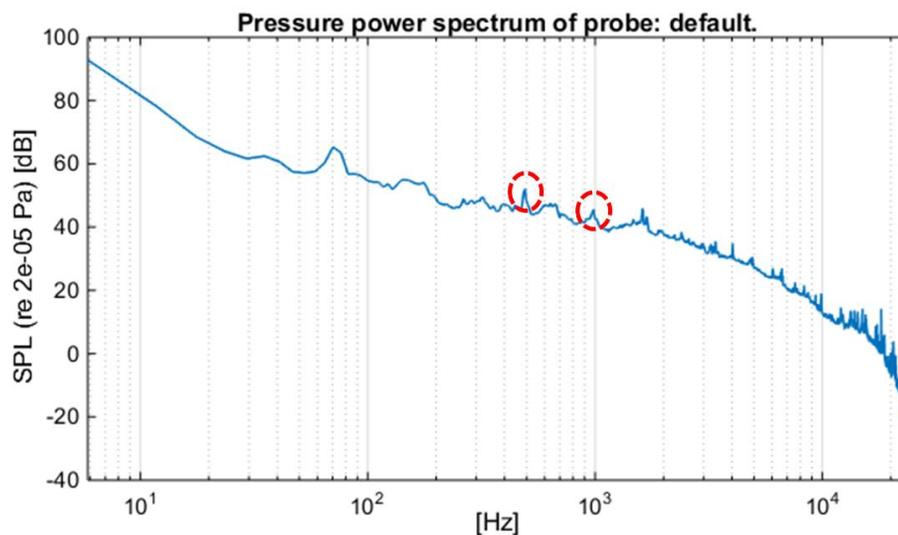


Fig. 54. Localización de la fuente de ruido obtenida para la frecuencia de 500 Hz.



**Fig. 55. Localización de la fuente de ruido obtenida para la frecuencia de 1 kHz.**

Las frecuencias de interés para evaluar la localización de la fuente de ruido, obtenida de las mediciones realizadas desde un apartamento cercano a la planta de mezcla de cemento de la obra se muestran en la Fig. 56. Dichas frecuencias se encuentran alrededor de 500 Hz y 1 kHz.



**Fig. 56. Densidad espectral obtenida de la medición realizada desde un apartamento cercano a la planta.**

En las Fig. 57 y Fig. 58 se muestra la localización de la fuente para las frecuencias de interés.

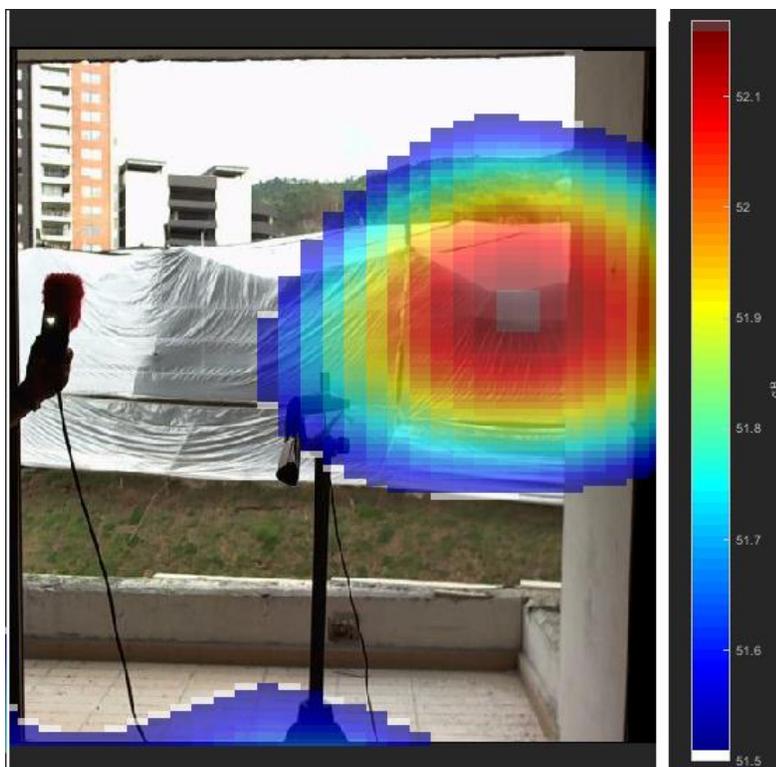


Fig. 57. Localización de la fuente de ruido alrededor de los 500 Hz.

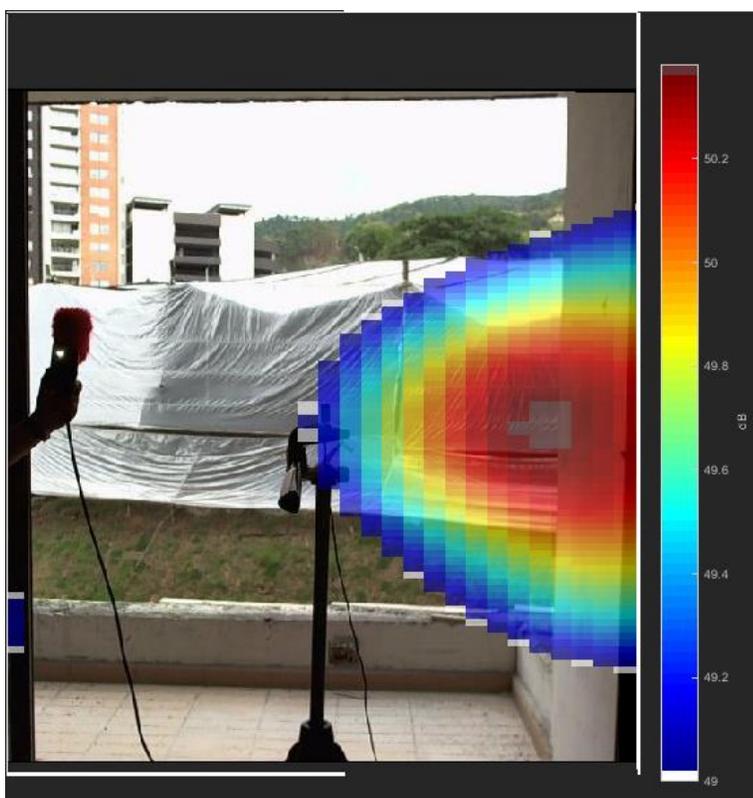


Fig. 58. Localización de la fuente de ruido alrededor de 1 kHz.

## 7. Discusión

A partir de las mediciones de reconocimiento del vector de intensidad realizadas en espacio cerrado, se puede observar que los ángulos en azimut hallados tienen una tendencia hacia la pared cercana a la fuente, tanto para fuente electroacústica como fuente no electroacústica. Sin embargo, se encontraron resultados que dan una tendencia hacia la fuente como es el caso del punto de receptor 2 para la fuente no electroacústica (Figura 29).

De los ángulos en elevación hallados, para la fuente electroacústica estos tienen tendencia hacia los  $20^\circ$ , que, a pesar de no ser el ángulo calculado para dicha fuente, puede ser un buen indicador de la ubicación de esta, como se observa en las figuras 23 y 25. Para el caso de la fuente no electroacústica, para el punto de receptor 1 los ángulos hallados tienen una tendencia hacia los  $45^\circ$  en las tres frecuencias analizadas, como se muestra en la figura 28, y para el punto de receptor 2 esta tendencia se mantiene alrededor de los 2000 Hz, como se muestra en la figura 30; esta tendencia puede indicar la influencia de reflexiones generadas en el techo. A lo anterior también se puede sumar el factor de la colocación de la fuente no electroacústica sobre una mesa, o cual también puede influir en dicha tendencia.

Continuando con las mediciones de reconocimiento del vector de intensidad acústica realizadas en un espacio abierto, los ángulos hallados en el eje azimutal tienen tendencia cercana a la ubicación de la fuente, como se observa en las Figuras 32 y 34, especialmente para la fuente electroacústica alrededor de la frecuencia de 500 Hz, caso que es similar a lo que sucede para la fuente no electroacústica.

En elevación se observa que, especialmente para la fuente no electroacústica, los vectores de intensidad tienen tendencia hacia el suelo, lo que puede significar la afectación de los resultados por reflexiones sobre esta superficie, como se observa en las Figuras 35, 38 y 40.

De las mediciones de localización de fuentes sonoras a partir de la técnica de formación de haz, se pudo observar, de todas las mediciones realizadas, que los resultados obtenidos en mayores frecuencias presentan mayor resolución espacial que los resultados obtenidos en menores frecuencias.

En las Figuras 48, 49, 51 y 52, correspondientes a las mediciones realizadas en espacio abierto, se puede observar un lóbulo de energía que se encuentra debajo de la localización de la fuente. Este

lóbulo puede ser atribuido a reflexiones que se generan en el espacio de medición. El lóbulo de energía que se encuentra en la parte superior de las figuras se atribuye a la ubicación de la fuente de ruido.

Para las mediciones realizadas en la obra de construcción se encontró que, en la medición realizada cerca de la planta el principal lóbulo de energía señala la bomba de cemento de color amarillo, tanto para la frecuencia de 500 Hz como la de 1000 Hz. De la medición realizada desde el apartamento cercano se muestra que el principal lóbulo de energía señala la carpa en la cual se encuentra la fuente de ruido.

La alta componente de energía en baja frecuencia que se observa en las Figuras 31, 36, 41, 44, 47, 50, 53 y 56 se atribuye a ruido inherente de la sonda usada.

## 8. Conclusiones

Se logra observar que a partir del reconocimiento del vector de intensidad acústica se puede obtener la localización de una fuente sonora a partir de obtener sus ángulos de elevación y azimutal. A pesar de que las reflexiones afectaran la caracterización de dicho vector, muchos de los resultados mostraron una ubicación de la fuente sonora evaluada en cuestión para ciertas frecuencias.

La técnica de formación de haz muestra ser una herramienta útil y práctica para hallar la localización de fuentes de ruido de manera objetiva, esto debido a que no requiere de muchos componentes y la duración de la medición es corta. Sin embargo, se deben tener en cuenta las limitaciones en frecuencia y en las características temporales de la fuente que se desee localizar.

Se encontró que el mejor espacio para realizar las mediciones es el espacio abierto. Ya que la presencia de reflexiones dificulta la localización de la fuente en espacio cerrado. Sin embargo, esto es bueno debido a que las principales fuentes de ruido se encuentran en espacio abierto, como fue el caso de las bombas de cemento en la obra de construcción evaluada.

También se logró determinar la localización de las fuentes evaluadas, independientemente que esta tuviera condiciones controladas, como la fuente electroacústica, o condiciones poco controladas, como el motor de licuadora o la fuente de ruido presente en la obra de construcción.

Se puede concluir de las técnicas de localización de fuentes evaluadas, que estas pueden ser complementarias. Ya que a partir del reconocimiento del vector de intensidad acústica se puede hallar la ubicación de una fuente sonora en cuestión a partir de caracterizar ángulos en elevación y azimut del vector de intensidad sin restricciones en frecuencia y sin conocer de antemano la ubicación de esta. Mientras la técnica de formación de haz permite visualizar a partir de holografías la ubicación de dicha fuente, evaluando un rango de frecuencia de mayor interés. Dado lo anterior se puede decir que se tiene una localización completa de la fuente de ruido.

## Referencias

- [1] D. García Escribano y E. Tijs, «Measuremen of the Acoustic Noise Map Using Acoustic Vector Sensors,» de *Inter Noise*, Osaka, 2011.
- [2] H.-E. de Bree, P. Leussink, T. Korthorst, H. Jansen, T. S. Lammerink y M. Elwenspoek, «The u-Flown: a novel device for measuring acoustic flows,» *Sensors and Actuators*, vol. 54, pp. 552-557, 1996.
- [3] H.-E. de Bree, W. Druyvesteyn, E. Berenschot y M. Elwenspoek, «Three-Dimensional Sound Intensity Measuremenst using Microflown Particle Velocity Sensors,» *IEEE*, pp. 124-129, 1999.
- [4] H.-E. de Bree, «The Microflown: An Acoustic Particle Velocity Sensor,» *Acoustics Australia*, vol. 31, nº 3, pp. 91-94, 2003.
- [5] H.-E. de Bree, C. Ostendorf y T. Basten, «An acoustic based approach to locate low frequency noise sources in 3D,» Rotterdam, 2009.
- [6] J. T. Fricke, H.-E. de bree y A. Siegel, «Source localization with acoustic vector sensor,» *IEEE*, pp. 1-6, 2009.
- [7] D. Fernández Comesaña, S. Steltenpool, G. Carrillo Pousa, H.-E. de Bree y K. R. Holland, «Scan and Paint: Theory and Practice of a Sound Field Visualization Method,» *Hindawi*, vol. 2013, nº 241958, pp. 1-11, 2013.
- [8] D. Fernández Comesaña, D. García Escribano y H.-E. de Bree, «"Virtual Phased Arrays" Nueva técnica de medida para localización de fuentes de ruido,» Évora, 2012.
- [9] D. Fernández Comesaña, J. Wind, A. Grosso y K. Holland, «Far field source localization using two transducers: A "Virtual Array" approach,» de *18th International Congress on Sound and Vibration* , Rio de Janeiro, 2011.
- [10] D. Fernández Comesaña, E. Fernández-Grande, E. Tiana-Roig y K. R. Hollan , «A novel deconvolution beamforming algorithm for cirtual phased arrays.,» de *Internoise*, Innsbruck, 2013.
- [11] F. A. Everest y K. C. Pohlmann, «Sound in the Free Field,» de *Master Handbook of Acoustics*, McGraw Hill, 2009, pp. 33-34.
- [12] H.-E. de Bree, «Intensity Verification,» de *The Microflown E-Book*, Twente, Microflown Technologies, 2009, pp. 1-2.

- [13] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens y J. V. Sanders, «The Acoustic Wave Equation and Simple Solutions,» de *Fundamental of Acoustics*, John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 125-126.
- [14] D. Fernández Comesaña, Scan-Based sound visualization methods using sound pressure and particle velocity, Southampton: University of Southampton, 2014, pp. 72-73.
- [15] H.-E. de bree , «The Microflown,» de *The Microflown E-Book*, Twente, Microflown Technologies, 2007, pp. 3-5.
- [16] Microflown Technologies, *Datasheet PU Sound Probe*, 2006.
- [17] W. Liu y S. Weiss, de *Wideband Beamforming Concepts and Techniques*, West Sussex, John Wiley & Sons, 2010, pp. 1-2.
- [18] Microflown Technologies, «Scan and Paint Manual,» 2013. [En línea]. Available: <https://goo.gl/I8T0Ra>. [Último acceso: 2016].
- [19] Microflown Technologies, «PU-regular,» 2014. [En línea]. Available: [goo.gl/SI02lq](http://goo.gl/SI02lq). [Último acceso: 2016].
- [20] Microflown Technologies, «Scout 422 Datasheet,» 2014. [En línea]. Available: <https://goo.gl/vwNEBC>. [Último acceso: 2016].
- [21] Microflown Technologies, «Scan & Paint VPA Manual,» 2014. [En línea]. Available: <https://goo.gl/ZUOPv5>. [Último acceso: 2016].
- [22] D. Fernández Coomesaña, B. Zjamsek, A. Grosso y K. Holland, «Assessing Vehicle Exterior Noise Using A Virtual Phased Array (VPA),» *SAE International*, vol. 2013, nº 1968, pp. 1-7, 2013.

## Anexos

### Respuesta al impulso del Estudio A.

Se realizó una caracterización del estudio A con el fin de determinar cómo las reflexiones del espacio afectarían los resultados de las mediciones de localización de fuentes. Esta caracterización se hizo a partir de hallar la respuesta al impulso de este lugar, tanto en estado desocupado como agregando absorción. La medición de respuesta al impulso se realizó a partir de dos métodos diferentes, barrido seno y fuente impulsiva. Tanto la ubicación de las posiciones de fuente como las de receptor se tomaron con el fin de que estas fueran las mismas para las mediciones de localización de fuentes. Dichas posiciones se muestran en la Fig. 59.

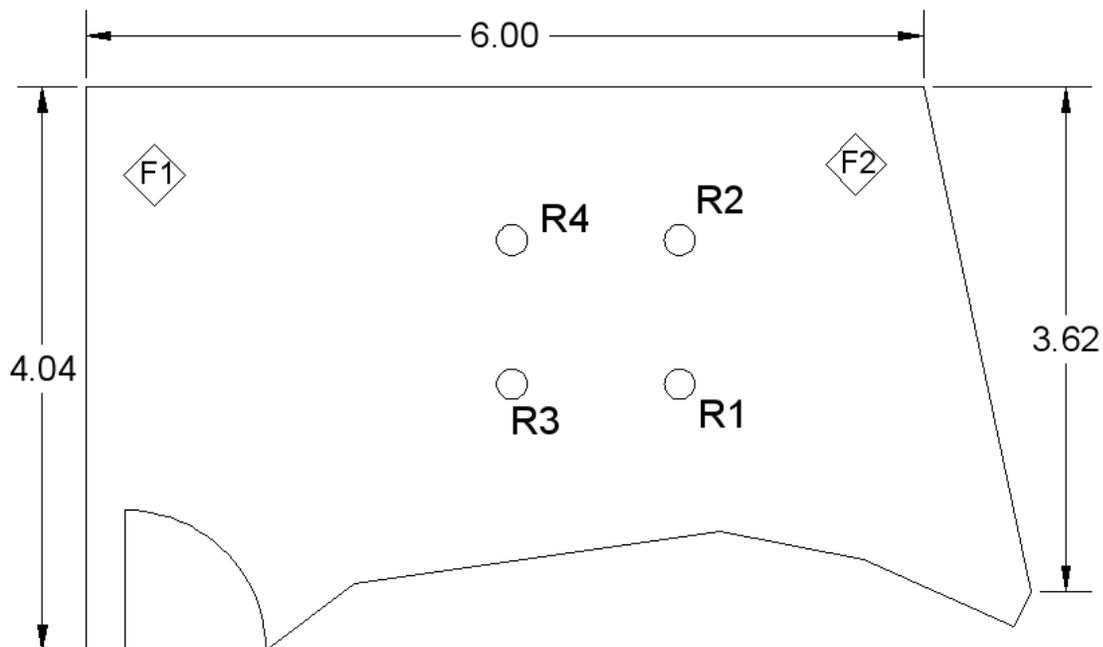


Fig 59. Vista en planta *rec room* estudio A.

En la medición de respuesta al impulso a partir del método de barrido seno la fuente sonora tomada fue una cabina JBL EON 15 con su cara frontal direccionada hacia la esquina. En las Fig. 60. y Fig. 61. se muestra el tiempo de reverberación promediado espacialmente para cada una de las posiciones de fuente, y en la Fig. 62. se muestra la reducción del tiempo de reverberación ( $RT_{mid}$ ) de la sala en estado desocupado respecto a la sala con absorción agregada.

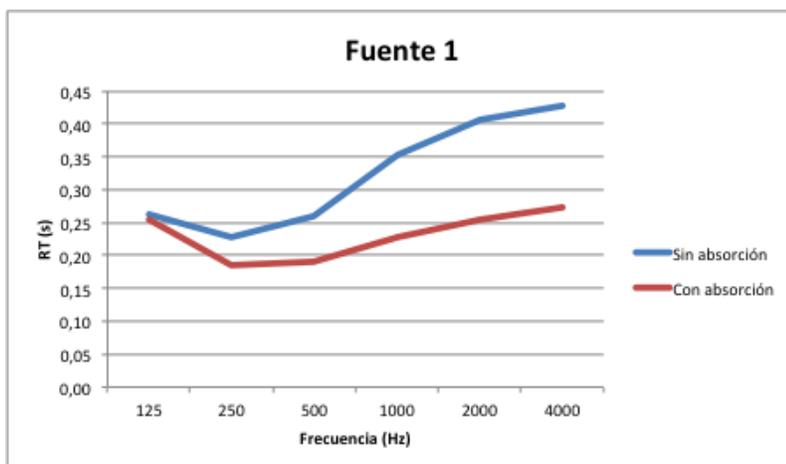


Fig. 60 Tiempo de reverberación promediado espacialmente para la posición de fuente 1.

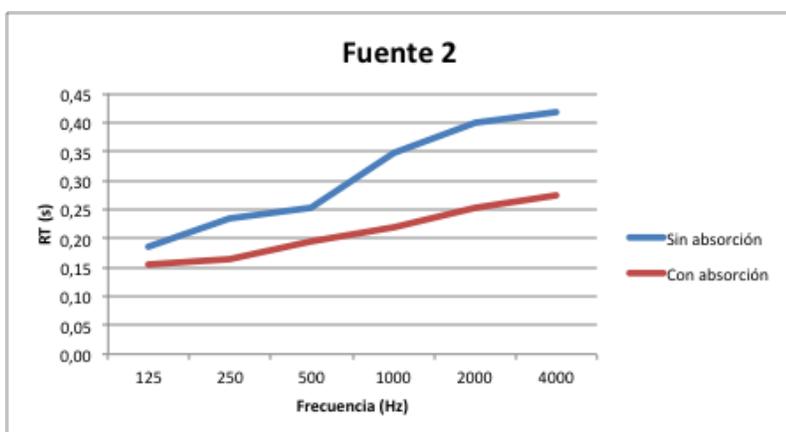
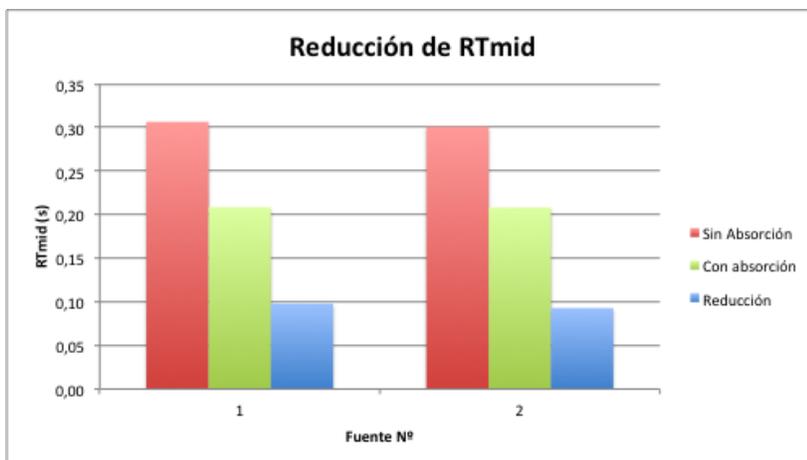
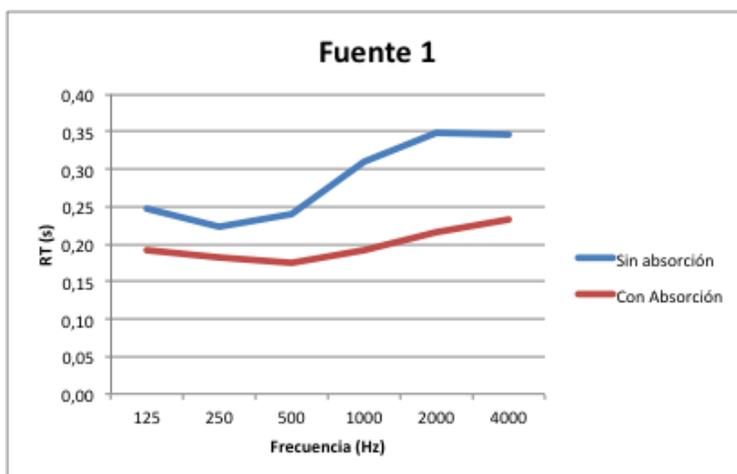


Fig. 61. Tiempo de reverberación promediado espacialmente para la posición de fuente 2.



**Fig. 62. Reducción del parámetro RTmid de la sala vacía respecto a la sala con absorción.**

La medición de respuesta al impulso a partir de fuente impulsiva la fuente fueron globos, los cuales se procuró inflar en una proporción similar. Estos globos fueron estallados en la posición de fuente. En las Fig. 63. y Fig. 64. se muestra el tiempo de reverberación promediado espacialmente para las posiciones de fuente 1 y 2, y en la Fig. 65. se muestra la reducción del parámetro RTmid de la sala vacía respecto a la sala con absorción agregada.



**Fig. 63. Tiempo de reverberación promediado espacialmente para la posición de fuente 1.**

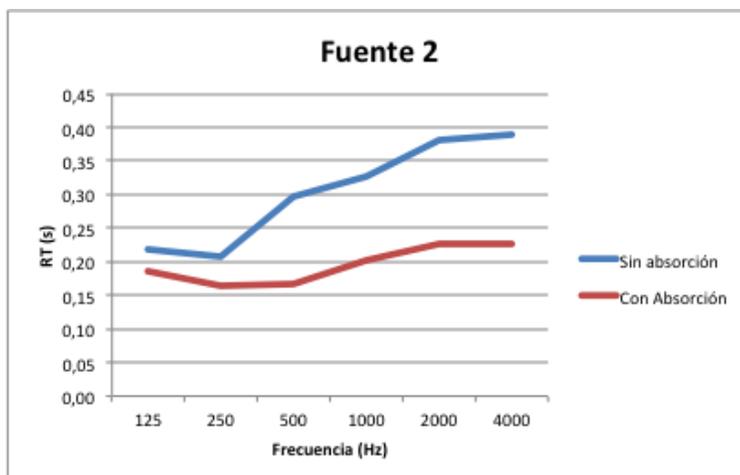


Fig. 64. Tiempo de reverberación promediado espacialmente para la posición de fuente 2.

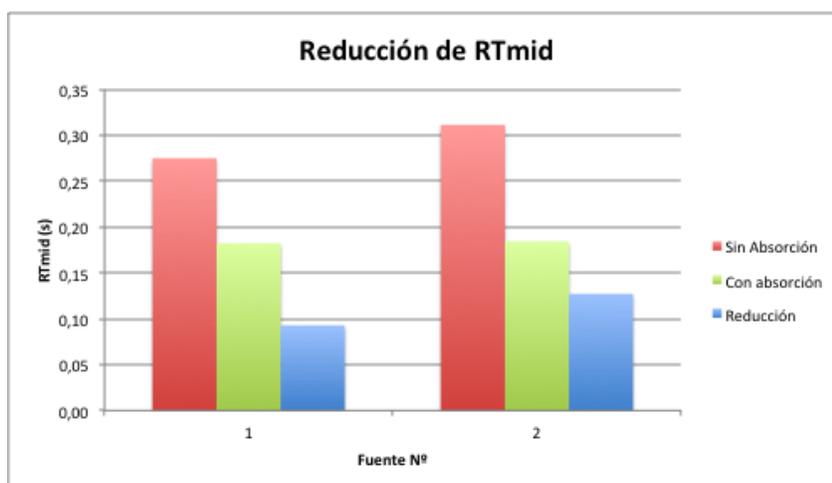


Fig. 65. Reducción del parámetro RTmid de la sala vacía respecto a la sala con absorción.

## Calibración de la sonda P-U

 **Microflown Technologies**  
Charting sound fields

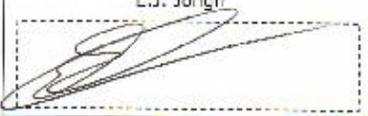
## Calibration Report

**Probe:** PR-900970

Calibrated with G.R.A.S Type 40AQ microphone & G.R.A.S Type 26CA preamplifier  
Sensitivity = 52.1mV/Pa at a temperature of: 21°C

Checks performed:	
<input checked="" type="checkbox"/>	Audio test
<input checked="" type="checkbox"/>	Mechanical check
<input checked="" type="checkbox"/>	Full calibration
<input checked="" type="checkbox"/>	Calibration Validation
<input checked="" type="checkbox"/>	Final check

**Calibrator**  
E.J. Jongh



**Supervisor**  
L. Garcia



**Report Number:** 900970

**Calibration Date:** 06-01-15

**Calibration Due:** 06-01-17

Microflown Technologies, PO Box 2250, 6802 CE Arnhem, The Netherlands  
 W: www.microflown.com E: cs@microflown.com T: +31 880 010 011 F: +31 880 010 010

Microflow Technologies

## Sound Pressure Sensor

900970

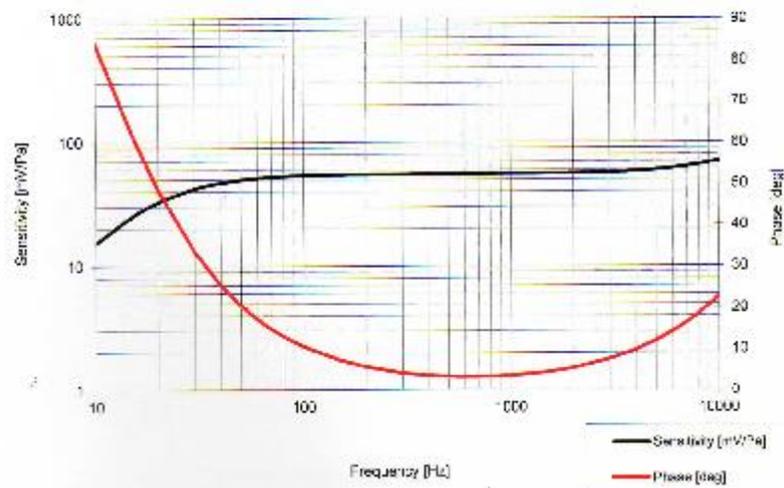
PR-509970

06 January 2015

### Parameters sound pressure equations

Sensitivity		
$S_p @ 1kHz =$	55.5	[mV/Pa]
Sensitivity corner frequencies		
$f_{c1p} =$	12	[Hz]
$f_{c2p} =$	71	[Hz]
$f_{c3p} =$	12410	[Hz]
Phase corner frequencies		
$C1p =$	9	[Hz]
$C2p =$	9	[Hz]
$C3p =$	24252	[Hz]

Sound pressure model



Microflow Technologies, PO Box 2250, 6802 CE Arnhem, The Netherlands  
 W: [www.microflow.com](http://www.microflow.com) E: [cs@microflow.com](mailto:cs@microflow.com) T: +31 880 010 811 F: +31 880 010 810

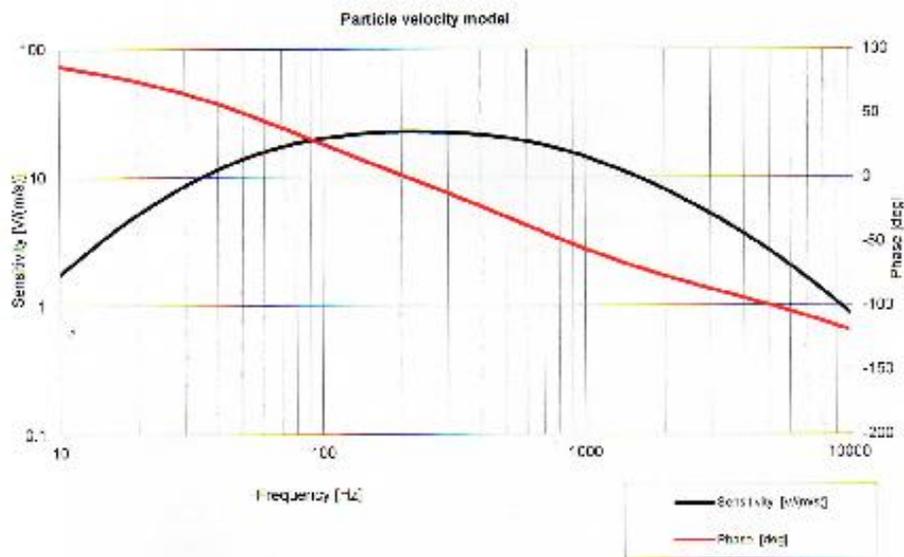
## Particle Velocity Sensor

900970

PR-900970

06 January 2015

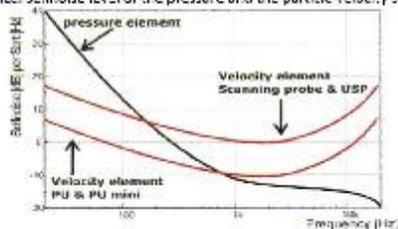
Parameters particle velocity equations		
<b>Sensitivity:</b>		
$S_u@250Hz=$	24.9	[V/(m/s)]
<b>Sensitivity corner frequencies</b>		
$f_{c1u}=$	18	[Hz]
$f_{c2u}=$	727	[Hz]
$f_{c3u}=$	5709	[Hz]
$f_{c4u}=$	68	[Hz]
<b>Phase corner frequencies</b>		
$C_{1u}=$	1	[Hz]
$C_{2u}=$	671	[Hz]
$C_{3u}=$	15329	[Hz]
$C_{4u}=$	68	[Hz]



## Additional information

### Selfnoise

Typical selfnoise level of the pressure and the particle velocity sensor:



## List of Formulas

### Sound Pressure Model

The model describing the sensitivity of the sound pressure sensor:

$$S_p [\text{mV} / \text{Pa}] = S_p @ 250 \text{ Hz} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2}}$$

The phase of the sound pressure sensor is described by:

$$\varphi_p [\text{deg}] = \arctan\left(\frac{C_{1p}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{C_{2p}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{3p}}\right)$$

### Particle Velocity Model

The model describing the sensitivity of the particle velocity sensor:

$$S_v [\text{V} / (\text{m/s})] = \frac{S_v @ 250 \text{ Hz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{20}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{30}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{40}}{f}\right)^2}}$$

The phase of the particle velocity sensor is described by:

$$\varphi_v [\text{deg}] = \arctan\left(\frac{C_{1v}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{2v}}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{3v}}\right) + \arctan\left(\frac{C_{4v}}{f}\right)$$

To change the sensitivity from V/(m/s) to mV/Pa\* (divide the V/(m/s) value by (343\*1.2)/1000):

For this probe:

$$24.8 \text{ V/(m/s)} = 60.5 \text{ mV/Pa*}$$

Should questions arise don't hesitate to contact Customer Service at:

cs@microflow.com