

**ANEXO N°45
INFORME
FINAL**



Serie Proyectos de Investigación e Innovación

Superintendencia de Seguridad Social
Santiago - Chile

INFORME FINAL

Implementación de metodología Beamforming para la identificación de fuentes de ruido en ambientes industriales acústicamente complejos (307-2023)

Autor: Juan Rodrigo Chávez Miranda, Rodrigo Andrés Astudillo Farlora
2024

Este trabajo fue seleccionado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación e Innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades Profesionales 2023 de la Superintendencia de Seguridad Social (Chile), y fue financiado por Asociación Chilena de Seguridad con recursos del Seguro Social de la Ley N°16.744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.





SUPERINTENDENCIA DE SEGURIDAD SOCIAL

SUPERINTENDENCE OF SOCIAL SECURITY

La serie Proyectos de Investigación e Innovación corresponde a una línea de publicaciones de la Superintendencia de Seguridad Social, que tiene por objetivo divulgar los trabajos de investigación e innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades del Trabajo financiados por los recursos del Seguro Social de la Ley 16.744.

Los trabajos aquí publicados son los informes finales y están disponibles para su conocimiento y uso. Los contenidos, análisis y conclusiones expresados son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente la opinión de la Superintendencia de Seguridad Social.

Si requiere de mayor información, sobre el estudio o proyecto escriba a: investigaciones@suseso.cl.

Si desea conocer otras publicaciones, artículos de investigación y proyectos de la Superintendencia de Seguridad Social, visite nuestro sitio web: www.suseso.cl

The Research and Innovation Projects series corresponds to a line of publications of the Superintendencia of Social Security, which aims to disseminate the research and innovation work in the Prevention of Occupational Accidents and Illnesses financed by the resources of Law Insurance 16,744.

The papers published here are the final reports and are available for your knowledge and use. The content, analysis and conclusions are solely the responsibility of the author (s), and do not necessarily reflect the opinion of the Superintendencia of Social Security.

For further information, please write to: investigaciones@suseso.cl.

For other publications, research papers and projects of the Superintendencia of Social Security, please visit our website: www.suseso.cl.

Superintendencia de Seguridad
Social Huérfanos 1376
Santiago, Chile.



ÍNDICE

1.	RESUMEN EJECUTIVO	5
2.	PALABRAS CLAVES.....	5
3.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS	6
3.1.	Screening.....	6
3.2.	Holografías acústicas.....	7
3.3.	Mapas de Intensidad Sonora	8
3.4.	Beamforming	9
4.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA, DESAFÍO DE INNOVACIÓN Y OBJETIVOS	11
4.1.	Problema	11
4.2.	Desafío	11
4.3.	Preguntas de investigación	11
4.4.	Objetivo general.....	12
4.5.	Objetivos específicos	12
5.	REVISIÓN DE LA LITERATURA Y MARCO TEÓRICO	13
5.1.	Principio de funcionamiento	13
5.2.	Arreglos y sistemas de medición.....	16
5.3.	Procesamiento de la información	18
5.4.	Aplicaciones de la Cámara Acústica	25
6.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	38
6.1.	Criterios básicos y proceso de selección de equipamiento	38
6.2.	Selección de Centros de Trabajo	39
6.3.	Mediciones en Terreno	39
6.4.	Análisis de las Mediciones	41
7.	RESULTADOS.....	45
7.1.	De la elección Cámara Acústica	45
7.2.	De las Mediciones en Terreno	46
7.3.	Muestra 1: Fabricación de botellas de vidrio	46
7.4.	Muestra 2: Recicladora de acero	47
7.5.	Muestra 3: Fabricación de envases de cartón.....	48
7.6.	Muestra 4: Metalúrgica.....	49
7.7.	Muestra 5: Elaboración de productos de fibrocemento	51
7.8.	Muestra 6: Embotelladora	51
7.9.	Muestra 7: Fábrica de muebles.....	53
7.10.	Muestra 8: Fabricación de tubos de PVC	54

7.11.	Muestra 9: Elaboración de productos lácteos.....	55
7.12.	Muestra 10: Industria alimentaria	56
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
8.1.	De cómo se comportó la cámara	57
8.2.	De las mediciones en terreno.....	57
9.	RECOMENDACIONES PARA SISTEMA DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	60
10.	CONCLUSIONES.....	61
11.	CONSIDERACIONES.....	63
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXO A: GUÍA METODOLÓGICA PARA EL USO DE LA CÁMARA ACÚSTICA MIKADO DE GFAI TECH CON TECNOLOGÍA BEAMFORMING EN ENTORNOS INDUSTRIALES.		
13.	INTRODUCCIÓN.....	70
13.1.	Descripción del equipo.....	70
13.2.	Propósito de la guía	70
13.3.	Alcance	70
14.	OBJETIVOS	70
14.1.	Objetivo General	70
14.2.	Objetivos específicos	70
15.	DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO	71
15.1.	Componentes principales.....	71
15.2.	Descripción de las partes de la cámara acústica	72
15.3.	Especificaciones técnicas	74
16.	PROCEDIMIENTO DE USO.....	75
16.1.	Transporte y preparación del equipamiento	76
16.2.	Montaje del equipamiento	76
16.3.	Configuración del software y grabación de eventos	77
16.4.	Configuración del Entorno de Trabajo.....	80
16.5.	Captura de Datos.....	81
17.	ANÁLISIS Y REPORTE	81
17.1.	Guardar Datos	81
18.	FINALIZACIÓN	81
18.1.	Apagado del Equipo.....	81
18.2.	Desconexión y Almacenamiento	82
18.3.	Mantenimiento	82
19.	ANÁLISIS POSTERIOR	82
20.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS GUÍA METODOLÓGICA	87

1. RESUMEN EJECUTIVO

El Protocolo de Exposición Ocupacional a Ruido (PREXOR), del Ministerio de Salud, a través de la Guía Preventiva para los Trabajadores Expuestos a Ruido del Instituto de Salud Pública de Chile, establece que, al determinar las medidas de control y/o considerar cambio en las ya existentes, se debe tomar en cuenta la reducción de la exposición a ruido de acuerdo a una jerarquía que, en primer lugar, considera la eliminación, sustitución o controles de ingeniería de la(s) fuente(s) generadora(s) de ruido. No obstante, en ambientes acústicos complejos, con múltiples fuentes de ruido y campos sonoros difusos, los especialistas en higiene industrial de los OAL tienen dificultades para identificar el origen dominante de la(s) fuente(s) de ruido con la precisión necesaria. Existe una técnica para la localización de fuentes de ruido, denominada Beamforming, que ha entregado buenos resultados y ha sido utilizada, principalmente, en el campo de la acústica submarina y medioambiental, teniendo un potencial desarrollo en el ámbito industrial. Esta técnica complementa la metodología tradicional (medición de Niveles de Presión Sonora con Sonómetro) con la que actualmente trabajan los OAL. La técnica consiste en un sencillo proceso de medición de una sola toma, muy útil para elaborar mapas de presión sonora relativa y contribuciones de fuentes individuales a la intensidad sonora. En Chile existen proveedores del equipamiento necesario, pero se necesitaba generar evidencia respecto a su aplicabilidad y resultados para respaldar la recomendación técnica.

2. PALABRAS CLAVES

Ruido, Cámara, Acústica, Beamforming, Salud, Ocupacional, Higiene, Industrial, Ambiental, Hipoacusia, Laboral, Identificación, Fuente, Prexor, Mediciones.

3. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En el marco del Protocolo de Exposición Ocupacional a Ruido (PREXOR), actualmente los Organismos Administradores de la Ley N° 16744, más adelante OAL, deben efectuar evaluaciones de ruido en las empresas afiliadas en tiempos definidos. Parte de la asesoría ofrecida a las empresas, considera la prescripción de medidas de control, para lo cual es fundamental la identificación de las principales fuentes de ruido, cuestión que no es trivial cuando los escenarios de exposición son acústicamente “complejos” y solo se dispone de mediciones de nivel de presión sonora con Sonómetros.

En dichas condiciones, para realizar una correcta localización, es necesario medir el aporte de cada una de las fuentes sonoras por separado, lo que implicaría tener que detener maquinarias o actividades colindantes, para poder cuantificar el aporte de cada una de ellas. Lo anterior, en algunas ocasiones es difícil de concretar, ya que implicaría la interrupción de los procesos productivos de la empresa y aumentaría el tiempo para realizar un correcto levantamiento de la información.

La detección correcta de las principales fuentes de ruido es esencial para poder tomar una correcta decisión por parte de la empresa respecto a una eventual medida de control sobre las fuentes. Si esto no se realiza adecuadamente, la empresa podría utilizar recursos en un control de ingeniería que puede ser erróneo para la protección de la salud de los trabajadores.

Por todo lo anterior, se hace muy necesario contar con una metodología que permita detectar la ubicación de las principales fuentes de ruido de manera rápida y precisa sin tener que interferir en la operación de la empresa.

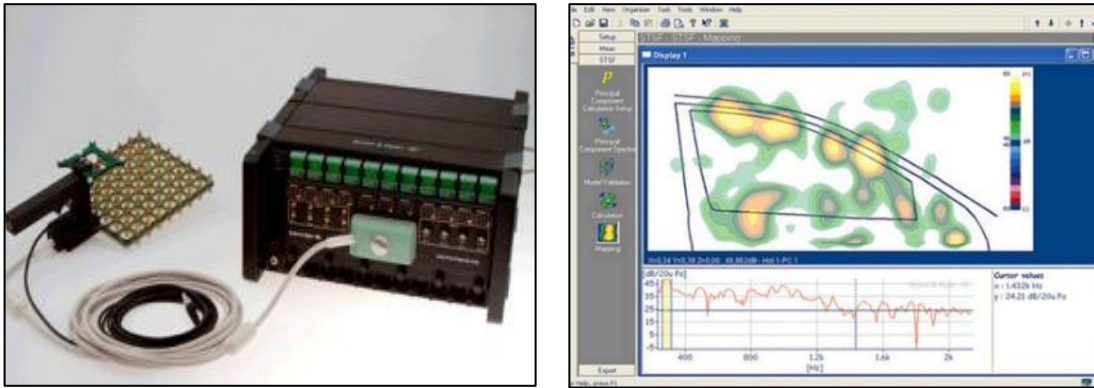
Hoy en día existen distintas técnicas utilizadas para la caracterización y localización de fuentes sonoras, tales como el Screening con Sonómetros, Holografía Acústica con arreglos de micrófonos, Mapas de Intensidad Sonora con sonda de intensidad sonora y Beamforming con cámaras acústicas, entre otras, siendo esta última, la que más se ha desarrollado. Sin embargo, no existe evidencia a nivel nacional de su utilidad en la identificación de fuentes de ruido a nivel industrial.

A continuación, y a modo de antecedente, se presenta una breve descripción de las distintas técnicas señaladas anteriormente. Estos sistemas de localización tienen una amplia gama de aplicaciones, donde cada una cuenta con fortalezas y limitaciones dependiendo de su uso.

3.1. Screening

Corresponde a la técnica más utilizada, básicamente por el bajo costo de su implementación. Las mediciones de nivel de presión sonora son llevadas a cabo con un Sonómetro sobre una cuadrícula previamente establecida, ya sea al aire libre o al interior del local que alberga la actividad a evaluar, mediciones que posteriormente son mostradas en un plano de planta de la instalación. Su principal desventaja radica en que, en ambientes complejos y difusos, con un gran número de equipos que operan simultáneamente, el Sonómetro capta (y no discrimina) tanto la energía sonora generada por todas las fuentes de la actividad, como las reflexiones provenientes de las diferentes superficies del edificio.

Figura 2: Arreglo de micrófonos para Holografías acústicas.



Existen algoritmos holográficos que permiten mejorar la resolución sobre holografía acústica de campo cercano (NAH) y posibilitan un mapeo exacto de objetos con un arreglo más pequeño de micrófono que no cubre la medición completa del objeto en una sola vez. También permite matrices que no sean rectangulares, lo cual da mayor flexibilidad, permitiendo el uso de arreglos combinados que posibilite capacidades de beamforming para frecuencias más altas y fuentes en movimiento.

3.3. Mapas de Intensidad Sonora

La intensidad sonora, en cualquier punto de un campo sonoro, representa el flujo de energía sonora en una dirección específica a través de un área de unidad normal a esta dirección en el punto considerado. La intensidad sonora es una cantidad vectorial que tiene magnitud y dirección, al contrario de la presión y potencia sonora que son cantidades escalares que solo tienen magnitud. Aunque fluctuante en el tiempo, lo que se mide es el promedio temporal de la intensidad sonora ³.

Las mediciones de intensidad sonora presentan las siguientes ventajas: pueden realizarse en terreno en casi todos los ambientes; pueden realizarse sin requerir de instalaciones especiales como cámara anecoica o reverberante; las mediciones pueden llevarse a cabo en presencia de niveles de ruido de fondo moderados o altos; pueden usarse para localizar fuentes de ruido.

Hasta hace algunos años, no era posible medir intensidad sonora en forma directa. En su lugar, se debía medir la presión sonora y a partir de esta cantidad estimar la intensidad sonora. Debido a que dichas cantidades se encuentran relacionadas en forma conocida sólo para ciertas condiciones especiales (campo libre, campo difuso, ondas planas), se hacía necesario construir instalaciones (laboratorios) de alto costo y sofisticación. Como ejemplo se pueden citar las cámaras anecoicas, difusores incorporados en las cámaras reverberantes y locales especiales para pruebas al aire libre.

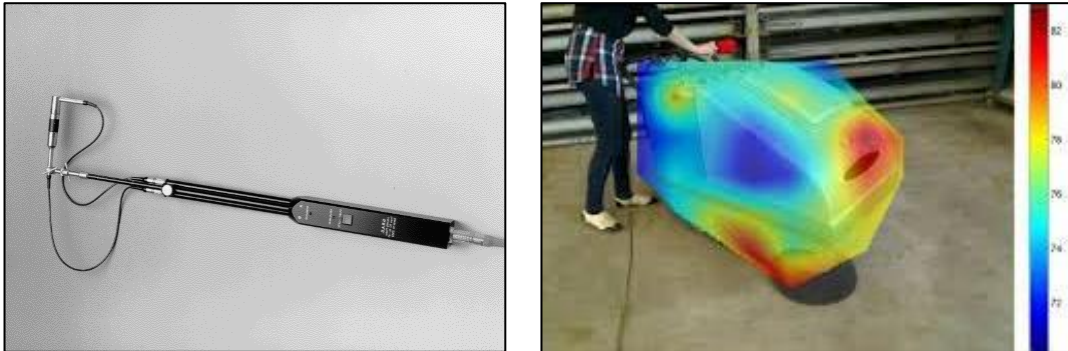
Sin embargo, no era posible aplicar las normativas para la medición de potencia sonora en varios tipos de máquinas y procesos industriales, debido a que eran muy grandes para ser ubicados en una sala de pruebas, por no funcionar en ambientes de bajo nivel de ruido o anecoicos, o por formar parte integral de otros sistemas más complejos y no poder ser operados en forma aislada.

En la actualidad, se realizan mediciones en casi todas las máquinas y procesos industriales, o de un vehículo, en sus ambientes operacionales, cuando sus intensidades externas generadas por la propia fuente y las otras fuentes presentes, no varíen mucho durante el período de medición.

³ Samir, N.Y. Gerges; Arenas, J. Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones. NR Editora, 2004.

Una Sonda de Intensidad Sonora es una combinación de dos o más micrófonos cuya salida alimenta un instrumento denominado analizador de intensidad sonora que procesa la salida eléctrica de los micrófonos, obteniéndose la intensidad sonora a lo largo del eje de la sonda ⁴.

Figura 3: Sonda de Intensidad Sonora.



Los mapas de intensidad sonora son una de las múltiples técnicas de identificación del ruido. Se trata de una herramienta versátil que mide la magnitud y dirección de la energía en un campo sonoro y tiene diversas aplicaciones, como la determinación de la potencia sonora, la absorción y la transmisión del sonido. Permite determinar rápidamente la dirección del sonido y los "puntos críticos" de ruido con independencia del ruido de fondo. Proporciona un feedback visual y aurál durante las mediciones y resultados de interés para las fuentes sonoras presentes.

Los mapas de ruido con contornos de colores constituyen una documentación intuitiva, con la que resulta muy sencillo comunicar los resultados a otras personas. Por otro lado, la opción de intensidad sonora selectiva permite profundizar en la identificación de las causas raíz y los mecanismos de radiación implicados.

3.4. Beamforming

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

El término "beamforming" es un anglicismo, el cual resulta de la unión de las voces inglesas "beam" (rayo, haz, lóbulo) y "forming" (forma, formación). Este término es empleado en ingeniería de comunicaciones, acústica y procesado de la señal para designar la transmisión y recepción direccional de señales, siendo también conocido como "método de antena microfónica", "telescopio acústico" o "cámara acústica" ⁵.

El beamforming se trata de un sencillo proceso de medición de una sola toma, muy útil para elaborar mapas de presión sonora relativa y contribuciones de fuentes individuales a la intensidad sonora. Es una técnica en la que los diferentes sensores de una matriz o array (micrófonos) registran la señal de una fuente acústica, la cual (debido a la distancia que hay entre ellos) resulta desfasada en cada micrófono. A través de una combinación de operaciones matemáticas y retardos de las señales registradas es capaz de indicar el origen de dicho sonido. Además de aplicaciones acústicas, esta técnica tiene interés en diferentes campos como en las telecomunicaciones, sismología, biomedicina, etc.

La idea fundamental en la que se basa la técnica es el empleo de patrones directivos en sistemas receptores, el cual asegura la recepción de señales provenientes de

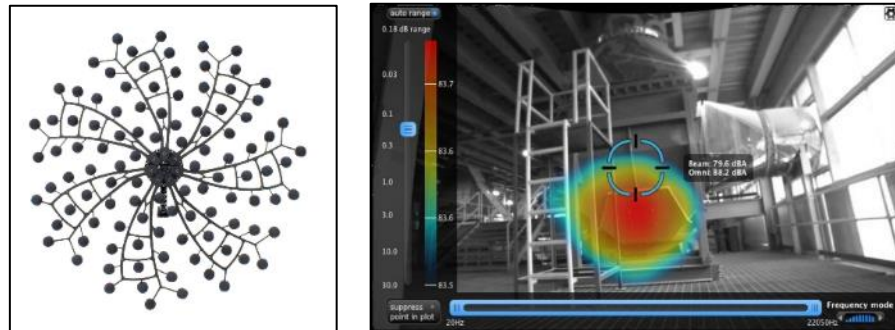
⁴ Harris, C. Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido. Mc Graw Hill, 1998.

⁵ Machis, J. (2016). Beamforming, Localización de Fuentes Sonoras Mediante Arrays de Micrófonos. Universidad Politécnica de Valencia, España.

una ubicación dada, atenuando el resto de las señales (que a la vista del receptor no constituyen más que interferencias indeseadas). Por ello, se puede afirmar que el método entra dentro de la categoría de filtrado espacial (acompañada de otras técnicas, como filtrado temporal y frecuencial) ⁵.

La cámara acústica consiste en una matriz de micrófonos, distribuidos en una estructura de sujeción, con una cámara óptica de alta resolución en el centro. Este instrumento de medición es especialmente eficiente en el campo de las frecuencias medias y altas. Las señales de los micrófonos son transferidas a un sistema de adquisición de datos y a un computador en el que se utilizan diferentes software y procedimientos para la localización de las fuentes sonoras.

Figura 4: Cámara Acústica y técnica de Beamforming.



Por ejemplo, la cámara acústica marca Bionic modelo M-112, consiste en un arreglo que se compone por 5 brazos distribuidos uniformemente cada 72° desde su centro, en una longitud de 180 centímetros se distribuyen 6 micrófonos, conformando en total un arreglo de 30 micrófonos omnidireccionales. En el centro se posiciona una cámara de video donde a cuyas imágenes se les superpone el mapa acústico con los niveles de potencia sonora. Este arreglo alcanza un diámetro de 3,5 metros, por lo cual se desempeña de manera aceptable entre las frecuencias de 100 Hz y 5000 Hz según el fabricante. Esto concuerda con la longitud de onda a 100 Hz que alcanza los 3,45 metros aproximadamente, siendo este tipo de arreglo con mejor desempeño en bajas frecuencias ⁶.

⁶ Calcumil, A., Suárez, E. (2020). Caracterización del Ruido Emitido por Vehículos con Cámara Acústica Mediante la Técnica de Beamforming. Congreso Internacional de Acústica y Audio Profesional INGEACUS. Valdivia, Chile.

4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA, DESAFÍO DE INNOVACIÓN Y OBJETIVOS

En función de la prevención de la hipoacusia de origen laboral, los OAL entregan cobertura a todas sus empresas afiliadas que requieran asesoría en función de esta materia, la cual, en tiempos acotados, comprende la evaluación de la exposición ocupacional a ruido de los trabajadores y la prescripción de medidas de control. La determinación de la evaluación de la exposición ocupacional de los trabajadores está bien definida, existiendo referencias nacionales respecto a las distintas metodologías de cómo desarrollarla; no obstante, para la prescripción de medidas de control de tipo ingenieril de la(s) fuente(s) generadora(s) de ruido, no existe a nivel nacional un procedimiento, guía o recomendación para el paso previo y fundamental, correspondiente a la identificación de las principales fuentes de ruido, desarrollándose, por medio de un consenso espontáneo de los Especialistas en Higiene Industrial de los distintos OAL, a través de mediciones de nivel de presión sonora (NPS) con sonómetro.

4.1. Problema

En algunos ambientes industriales, donde las fuentes sonoras son puntuales y distantes, la identificación de fuentes se puede desarrollar sin problemas con la medición de NPS con sonómetro; no obstante, en un número importante de escenarios de exposición, estimados en al menos un 40%, en los que se encuentra habitualmente la industria manufacturera, presenta ambientes acústicos complejos, con múltiples fuentes de ruido en una misma máquina o proceso, o múltiples fuentes independientes al interior de recintos, que generan niveles de presión sonora que no tienen relación con la fuente que se desea medir o identificar, obteniendo información poco precisa. Esto causa que los Especialistas en Higiene Industrial de los OAL no puedan o tengan problemas para identificar el origen dominante de la(s) fuente(s) de ruido con la rigurosidad necesaria, lo que conlleva a que se prescriban medidas inexactas y que la empresa utilice recursos en un control de ingeniería que puede ser erróneo para protección de la salud de los trabajadores.

Una forma de corregir esta situación es detener partes de maquinarias, procesos o actividades colindantes, para efectuar mediciones específicas y así cuantificar de manera precisa el aporte de ruido de cada una de ellas. Lo anterior, es difícil de concretar, ya que implica la detención de los procesos productivos de la empresa y/o se dispone de un tiempo acotado para que el Especialista en Higiene Industrial pueda realizar el levantamiento de la información.

4.2. Desafío

Por lo anterior, el desafío de este proyecto es desarrollar una metodología que permita detectar la ubicación de las principales fuentes de ruido de manera rápida y precisa, sin tener que interferir la operación de la empresa. Actualmente, Beamforming es la metodología más utilizada a nivel mundial, tanto para el ámbito industrial, como para el medio ambiental; no obstante, a nivel país no existe evidencia de su utilidad para optimizar los actuales procedimientos de identificación de fuentes de ruido en el ámbito ocupacional.

4.3. Preguntas de investigación

- a. ¿Cuáles son las ventajas o desventajas de Beamforming para el ámbito ocupacional?
- b. ¿Es Beamforming la metodología apropiada para la identificación de fuentes de ruido en ambientes industriales complejos?

4.4. Objetivo general

Desarrollar una metodología, mediante la técnica Beamforming, para la identificación precisa de fuentes de ruido en ambientes industriales complejos.

4.5. Objetivos específicos

- a. Estudiar los conceptos teóricos que establecen los principios de la técnica Beamforming, estudios recientes a nivel mundial y eventuales aplicaciones en la industria.
- b. Definir proveedor nacional para el arrendamiento de la tecnología requerida, en función de su disponibilidad, características de funcionamiento y capacidad de análisis de datos, junto con las competencias para su utilización.
- c. Desarrollar pruebas en terreno aplicando la técnica seleccionada.
- d. Elaborar una guía metodológica para el uso de la tecnología seleccionada.

5. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y MARCO TEÓRICO

La cámara acústica es un instrumento de medición que está conformada por una serie de micrófonos con una geometría determinada en conjunto con una cámara digital. Ambos elementos permiten ver en tiempo real las emisiones de ruido in situ, permitiendo localizar inmediatamente el lugar exacto de donde proviene el sonido más predominante.

Figura 5: Cámara Acústica Bionic modelo M-112.



Con el tiempo, sumado al avance de la tecnología, se han podido mejorar aspectos tanto de software como hardware, aumentando las áreas de aplicación y optimizando el proceso de medición. En este sentido múltiples empresas han desarrollado distintos prototipos de la cámara acústica, entre ellas podemos mencionar Acoustic Camera Gfai tech GmbH, Bruel&Kjaer, CAE systems, Norsonic, Bionic, entre otras. Algunos usos de la cámara acústica son en planta industrial, parques eólicos, industria automotriz, trenes, entre otros.

5.1. Principio de funcionamiento

Existen diferentes técnicas para localizar el sonido de una fuente, siendo las más utilizadas el beamforming, la intensimetría y la holografía. La cámara acústica utiliza la técnica del beamforming y por lo mismo solo se profundizará en este método. La palabra beamforming se originó de los sistemas activos de localización (como el SONAR) y del hecho de cambiar la forma del lóbulo principal del patrón de directividad (o sensibilidad). Actualmente, este concepto está relacionado especialmente con sistemas de localización ⁷. Con la técnica de beamforming se puede trabajar en el dominio de la frecuencia o del tiempo. Ambos dominios tienen ventajas y desventajas que son determinantes al momento de analizar una fuente. El dominio frecuencial disminuye el tiempo de procesamiento a través de la Transformada de Fourier. Por otro lado, el dominio del tiempo tiene la particularidad de estudiar señales con un espectro en frecuencias amplio, como es el caso de las señales impulsivas. En la siguiente tabla se compara el dominio frecuencial y temporal para estudiar casos determinados ⁸.

⁷ Heilmann, G. Döbler, D. (2008) Improving the Time/Spatial Resolution Capabilities of Beamforming in the Time Domain using Zero-padding. Inter-Noise 2008; 26-29 October, Shanghai, China.

⁸ Jaeckel, O., Gunnar, H. (2006). Transient noise source localization. Euronoise 2006; 30 May – 1 June, Tampere, Finland.

Tabla 1: Comparación de los usos de la cámara acústica según dominio ⁸.

Tipo de señal	Dominio	
	Frecuencia	Tiempo
Periódicas, sinusoidales, banda estrecha, componentes tonales	Ineficiente	Ineficiente
Ruido banda estrecha	Poco eficiente	Poco eficiente
Ruido de banda ancha	Muy eficiente	Muy eficiente
Pulsos, transitorios	Muy eficiente	Poco eficiente

A través de los años, la técnica del beamforming se ha ido adaptando acorde a los desafíos de localización que se presentan. Sin embargo, el algoritmo más utilizado en el dominio temporal del beamforming corresponde al Delay and Sum (DAS). La idea básica del algoritmo DAS es similar a la utilizada por nuestro oído humano, ya que se registran y evalúan las diferencias de tiempo que se producen desde las fuentes sonoras hacia los receptores. Siguiendo la analogía anterior, en el caso del ser humano los receptores corresponderían a los oídos y en la cámara acústica los receptores serían el conjunto de micrófonos ⁹. Aplicado a la cámara acústica, se puede describir este proceso en los siguientes cuatro pasos ¹⁰:

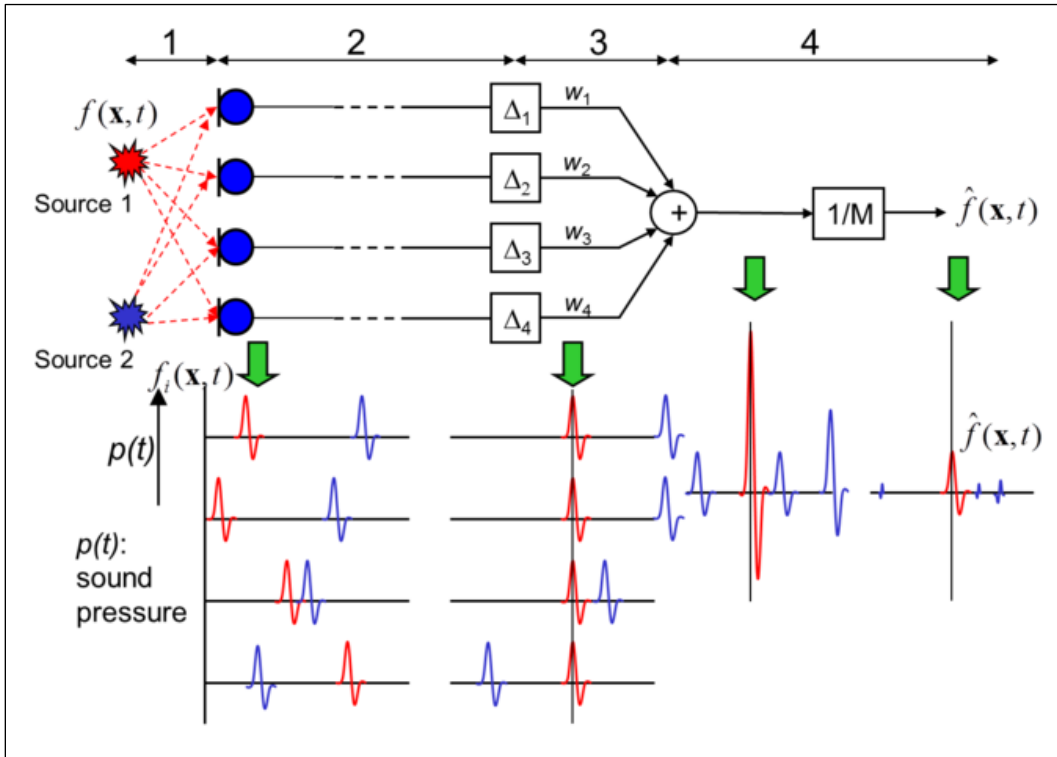
- a. La señal o señales son recibidas por los micrófonos del arreglo de la cámara acústica.
- b. Estas señales son similares en forma de onda, pero tienen diferente fase las cuales son proporcionales a la distancia recorrida por cada una. Se calcula el retardo de la señal de cada micrófono utilizando la distancia recorrida (entre la fuente y la cámara acústica) y la velocidad de propagación del sonido.
- c. La señal de cada micrófono es desplazada en función de los retardos calculados previamente en el paso 2, de tal manera de dejar en fase la señal en estudio.
- d. Se suma y normaliza todas las señales de todos los micrófonos del arreglo, resultando una señal de salida de igual tamaño que la señal de entrada captadas por cada micrófono.

En la siguiente figura se muestra gráficamente los pasos del algoritmo.

⁹ Alloza, P., Vornhein, B. (2018). Visualización Sonora en 3D. XI Congreso Iberoamericano de Acústica 2018; 24-26 Octubre, Cádiz, España.

¹⁰ Alloza, P., Bock, M. (2018). Aplicaciones de localización de fuentes de ruido en acústica de edificios. XI Congreso Iberoamericano de Acústica 2018; 24-26 Octubre, Cádiz, España.

Figura 6: Gráfico del algoritmo DAS ¹⁰.



Los datos de los micrófonos se usan para calcular el nivel de presión sonora en una posición concreta a través de la siguiente ecuación ¹¹:

$$p(x, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i(t - \Delta_i) \quad (1)$$

Donde p corresponde al nivel de presión sonora para un tiempo t determinado en una posición x del plano de referencia y M es el número de micrófonos del array. Para describir el funcionamiento del algoritmo Delay and Sum, uno de los algoritmos más utilizados en beamforming, en el dominio temporal de una forma sencilla, dividimos el procesado de la señal en 4 pasos, como se muestra en el diagrama en bloque mostrado en la Figura anterior.

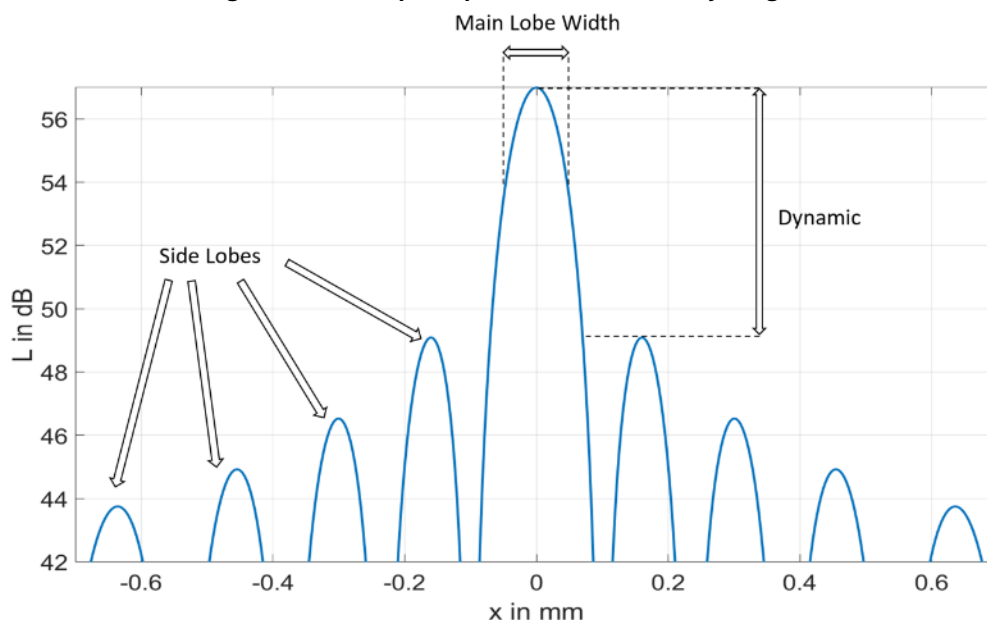
El principio de funcionamiento en el dominio frecuencial es similar, traduciendo los retardos temporales en desplazamientos de fase.

Existen dos propiedades importantes que determinan la calidad de un resultado de beamforming, que son el ancho del lóbulo principal y el rango dinámico ¹². El lóbulo principal corresponde a la señal sonora de mayor magnitud, es decir, el lugar de origen del ruido. Este lóbulo no decrece de manera continua a través de la distancia, sino que decrece en forma de patrón que posee máximos y mínimos, los cuáles son llamados lóbulos laterales. De esta forma, la información correcta entregada a través de la técnica del beamforming en cuanto a localización y nivel de presión sonora de la fuente de ruido estudiada, corresponde sólo a la del lóbulo principal. En la siguiente figura se muestra una representación gráfica de ambos tipos de lóbulos.

¹¹ Kerscher, M., Vonrhein, B., Heilmann, G., Barré, S. Weigel, P. (2016). Measurement and Visualization of Room Impulse Responses with Spherical Microphone Arrays. 29th Tonmeistertagung – VDT International Convention.

¹² Kümmritz, S., Movahed, A., Pehe, J. (2020). Development of a standard approach for wind turbine measurements with an acoustic camera for optimization purposes. Forum Acusticum 2020; 7-10 December, Lyon, France.

Figura 7: Lóbulo principal, lóbulos laterales y rango dinámico ¹².






El ancho del lóbulo principal corresponde a la distancia donde la amplitud de la señal ha caído en 3dB, mientras que el rango dinámico corresponde a la diferencia de amplitud en el lóbulo principal y el primer lóbulo lateral adyacente. Ambos aspectos están determinados netamente por el arreglo de micrófonos utilizados y el espectro de la fuente de ruido estudiada. Es por esta razón que cada modelo de cámara acústica posee especificaciones técnicas que están relacionadas con el tipo de fuente que pueden medir.

5.2. Arreglos y sistemas de medición

La cámara acústica tiene distintas formas geométricas para ubicar los micrófonos los cuales se denominan arreglos. Considerando la distancia a la fuente, morfología, rango de frecuencias y posición de la fuente se elegirá un arreglo determinado. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas de algunos arreglos de la cámara acústica de la empresa gfaitech GmbH ^{13, 14}.

Tabla 2: Especificaciones técnicas por arreglo ^{13, 14}.

Item	Arreglo		
	Ring48 AC Pro	Star48 AC Pro	Sphere48 AC Pro
Imagen			
Distancia mínima (m)	Mayor a 0,5	Mayor a 4	Mayor a 0,3
Rango de frecuencia (Hz)	164 – 20K	66 – 13K	291 – 20K
Número de micrófonos	48	48	48
Aplicaciones	Mediciones campo lejano	Mediciones exteriores	Mediciones interiores

¹³ gfaitech GmbH. (s.f.a). 2D Beamforming Microphone Arrays. Obtenido de Sitio web de gfaitech GmbH: <https://www.gfaitech.com/products/acoustic-camera/microphone-arrays/2d-beamforming-microphones>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.

¹⁴ gfaitech GmbH. (s.f.b). 3D Beamforming Microphone Arrays. Obtenido de Sitio web de gfaitech GmbH: <https://www.gfaitech.com/products/acoustic-camera/microphone-arrays/3d-beamforming-microphones>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.

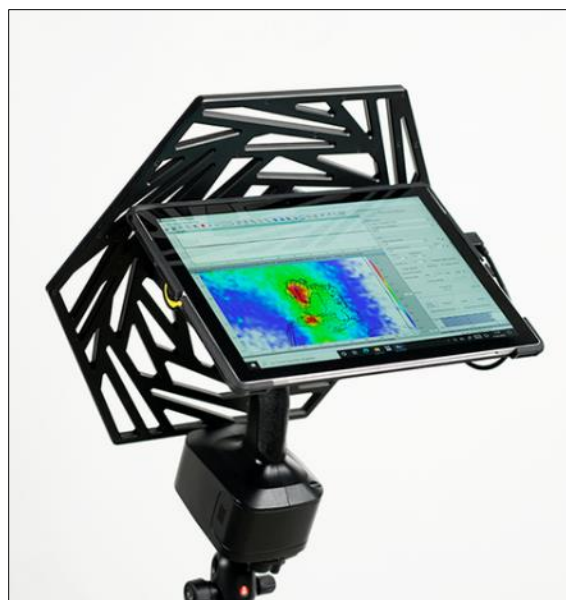
Los sistemas de medición de los arreglos presentados incluyen una interfaz, una batería externa y un computador con un software de procesamiento de los datos. En la siguiente figura se puede observar un esquema típico del sistema completo de medición.

Figura 8: Sistema de medición con cámara acústica, interfaz y computador ¹⁵.



En el año 2018, gfai tech GmbH lanzó la cámara acústica “todo en uno”, llamada oficialmente Mikado. Este equipo posee un sistema de medición diferente a los mencionados, ya que compacta todos los elementos descritos anteriormente en un mismo equipo, logrando un sistema de medición más práctico y ligero. Además, este equipo cuenta con una depth camera que además de entregar la foto referencial del objeto en estudio, permite obtener un modelo tridimensional a través del cálculo de profundidad por cada pixel. De esta forma, este equipo puede medir y crear un modelo tridimensional del objeto en estudio al mismo tiempo. En las siguientes imágenes se muestra la cámara acústica modelo Mikado y posteriormente se señalan los principales aspectos técnicos.

Figura 9: Cámara acústica Mikado ¹⁶.



¹⁵ Laaber GmbH (2016) The Acoustic Camera. Obtenido de Sitio web de Laaber Gesmbh: <http://www.schallmessung.com/gfai/#1482321118094-da97e547-770a>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.

¹⁶ gfai tech GmbH. (s.f.c). 3D Soundcam Mikado. Obtenido de Sitio web de gfai tech GmbH: <https://www.gfai.tech.com/products/acoustic-camera/handheld-soundcam-mikado>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.

Tabla 3: Especificaciones técnicas Mikado ¹⁶.

Item	Descripción
Máxima distancia (m)	Mayor a 0,3
Rango de frecuencia	514 – 24K
Número de micrófonos	96

5.3. Procesamiento de la información

5.3.1. Mapas Acústicos

Como se indicó, para la medición y postproceso de los datos adquiridos *in situ* es necesario el uso de un software asociado a la cámara acústica seleccionada (por ejemplo Noise Image de gfai tech GmbH). Estos programas permiten analizar diferentes parámetros tales como, espectro en frecuencias, espectrograma, niveles de presión y potencia sonora, entre otros. Se puede estudiar una señal completa o parte de ella, entregando una versatilidad conveniente para estudiar ciertos casos. En base a toda esta información, se puede obtener un mapa acústico, que corresponde a una representación visual donde se muestra el objeto en estudio y a través de una escala de colores se puede identificar la ubicación de la o las fuentes sonoras.

Los mapas acústicos se pueden presentar en dos formas distintas, utilizando una foto fija proporcionada por la misma cámara (2D) y utilizando un modelo tridimensional (3D). En la representación bidimensional se establece un plano paralelo al arreglo de micrófonos a una distancia fija llamada distancia focal. Cada pixel del plano se le asocia un Nivel de Presión Sonora (NPS), entregando como resultado una imagen coloreada que muestra la ubicación de la fuente de ruido. En la siguiente imagen se observa un esquema del cálculo del mapa de ruido y un mapa de ruido en 2D.

Figura 10a: Esquema proceso de cálculo en 2D. ¹⁰

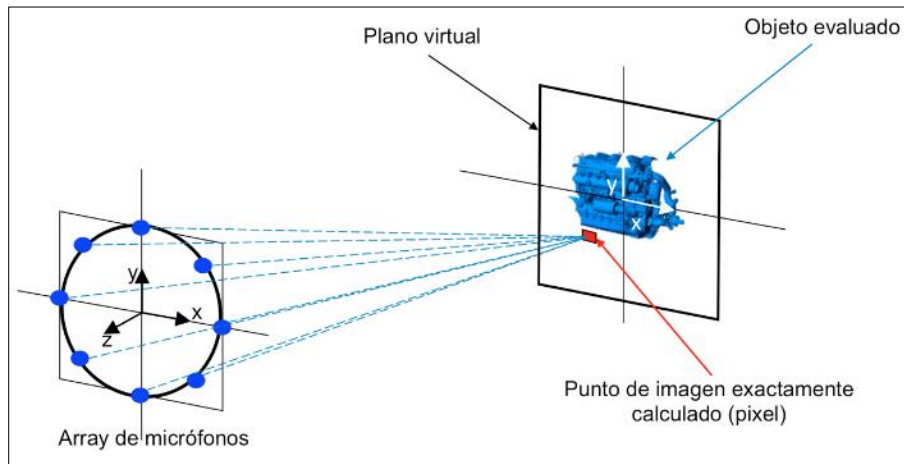
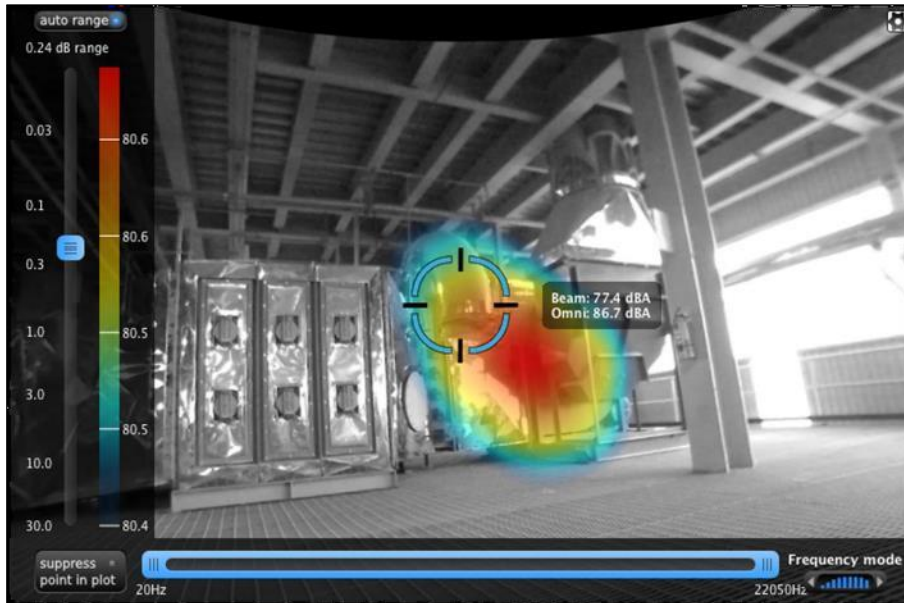
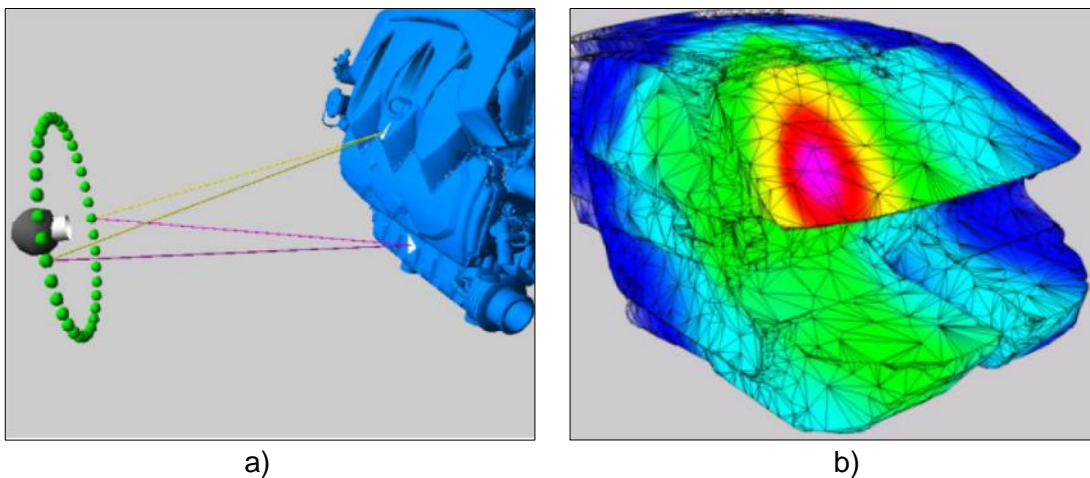


Figura 10b: Mapa acústico en 2D. ¹⁷



El mapa de ruido en tres dimensiones funciona de forma similar al modo 2D, pero sustituye la foto fija por un modelo 3D, que puede ser una malla de triángulos o una nube de puntos. El cálculo sobre el pixel se reemplaza por cada triángulo de la malla o por la nube de puntos ¹⁸.

Figura 11: a) Proceso de cálculo 3D.
b) Ejemplo de un mapa acústico tridimensional del interior de un vehículo. ¹⁸

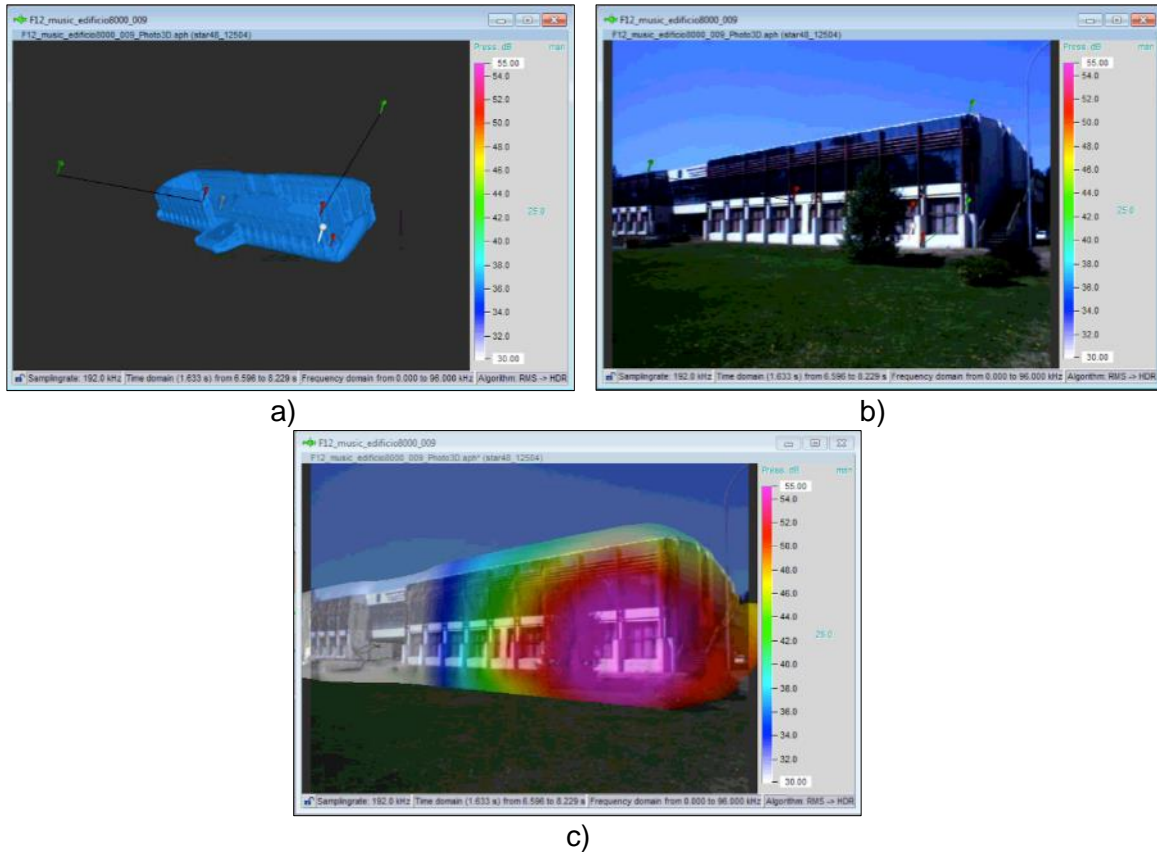


Para ocupar este modo se debe insertar el modelo sobre la fotografía y encajar el objeto dentro con la foto como se muestra en la Figura 12a y 12b. Luego de encajar el modelo se realiza el cálculo y se obtiene, de igual forma que en el modo 2D, un mapa acústico pero sustituyendo la fotografía por el modelo 3D como se puede ver en la Figura 12c.

¹⁷ Ruido Industrial (2018). Análisis de Ruido Ragasa, Nutrioli Planta de Procesamiento. Monterrey, NL México.

¹⁸ Meyer, A., Döbler, D., Hambrecht, J., Matern, M. (2011). Acoustic Mapping on three-dimensional models. CompSysTech 2011; 16-17 June 2011, Vienna, Austria.

Figura 12: Montaje del modelo sobre fotografía (a y b). Mapa acústico en modelo 3D (c).¹⁹



Es importante mencionar que los resultados obtenidos a través de los mapas acústicos están condicionados por la orientación del equipo, es decir, la cámara acústica permitirá localizar espacialmente las emisiones acústicas sólo de la cara visible del objeto en estudio. En este sentido, para analizar un objeto que cuenta con múltiples fuentes de ruido, es necesario medirlo desde varias posiciones con el fin de abarcar las emisiones acústicas en todas las direcciones¹⁹.

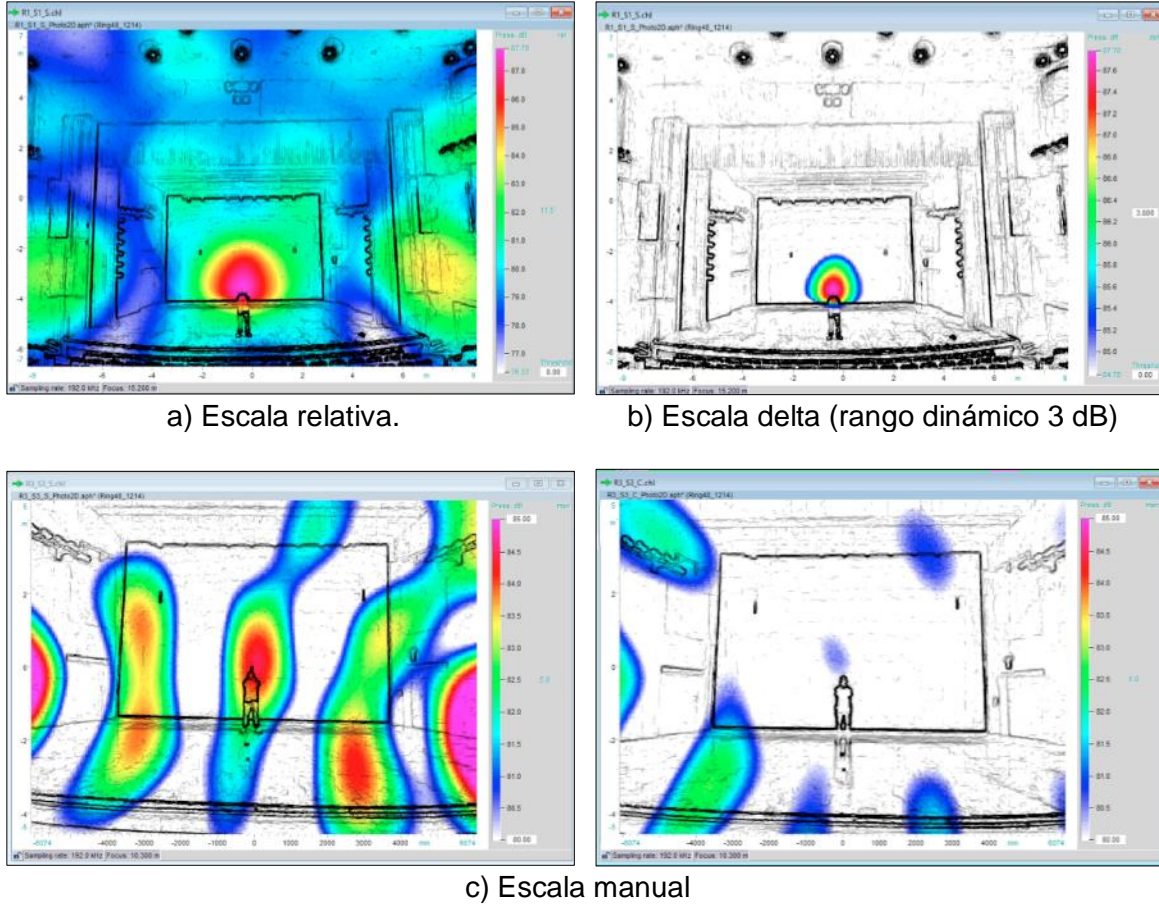
5.3.2. Escalas acústicas gráficas

Por otro lado, los softwares de medición y postproceso de datos permiten elegir la escala de colores de los mapas acústicos, lo que permite adecuarse fácilmente a cada situación que se esté analizando. Las escalas más utilizadas son las escalas relativa, manual y delta, las cuales se describen a continuación.

- Escala relativa: muestra el máximo y mínimo valor de nivel de presión sonora que existe en la medición.
- Escala delta: esta escala permite al usuario elegir el rango dinámico del mapa acústico (diferencia entre el lóbulo principal y lateral).
- Escala manual: permite al usuario ajustar el máximo y mínimo nivel de presión sonora. Esta escala permite comparar varios mapas acústicos utilizando los mismos niveles de referencia.

¹⁹ Tatiana Pereira (2022). Estudio de Emisiones de Ruido aplicando Técnicas 3D mediante Escáner Láser y Cámara Acústica. Tesis para optar al título de Magíster en Acústica y Vibraciones. Universidad Austral de Chile.

Figura 13: Mapas acústicos y sus diferentes escalas. 19



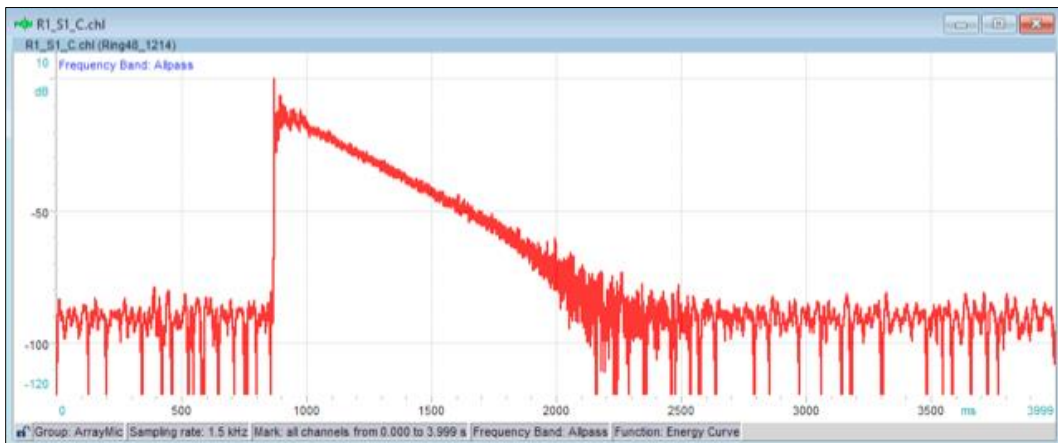
5.3.3. Módulos y herramientas de los softwares de Cámaras Acústicas

- a. Room Acoustics: Es un módulo que permite obtener parámetros acústicos tales como tiempo de reverberación (RT), tiempo de caída inicial (EDT), claridad musical (C80), definición (D) y tiempo central (CT). Además, se puede obtener la curva de decaimiento energético, como se muestran en las figuras a continuación.

Figura 14: Parámetros acústicos. 19

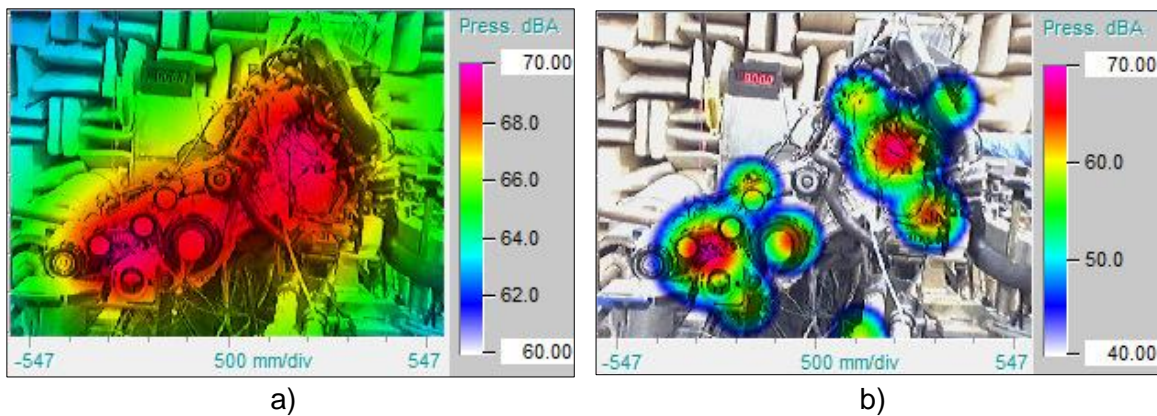
	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz
Early Decay Time	1.72	1.77	1.82	1.48	1.46	1.23	1.25	1.13	1.25	1.27	1.37	1.19	0.95	1.05	1.09	1.03	0.92	0.76
T60	1.25	1.45	1.48	1.37	1.29	1.37	1.23	1.11	1.12	1.19	1.22	1.29	1.21	1.16	1.06	0.98	0.67	0.78
Definition	69.11	65.02	52.69	51.80	36.90	40.92	53.24	37.55	41.63	39.64	41.04	28.13	34.09	36.91	50.46	54.23	60.66	65.73
C80	8.90	4.37	2.90	2.80	0.96	0.95	1.94	0.86	1.13	1.09	1.05	-1.21	0.34	0.96	2.27	2.91	4.42	5.35
C50	3.50	2.89	3.47	0.31	-0.49	-1.60	0.56	-2.21	-1.47	-1.93	-1.57	-4.07	-2.26	-1.96	3.69	0.74	1.80	2.83
C7	-6.95	-4.23	-6.57	-4.99	-8.46	-10.23	-6.19	-15.38	-5.98	-6.13	-6.69	-8.85	-12.51	-19.26	-19.08	-7.01	-5.32	-14.26
Center Time	58.91	67.02	90.52	70.80	103.35	93.30	01.82	90.60	86.22	88.97	92.60	105.58	87.39	64.91	73.03	72.63	59.01	50.67

Figura 15: Curva de decaimiento energético. 19



- b. **High Dynamic Range (HDR):** Esta herramienta consiste en un proceso iterativo que reconoce el lóbulo principal y elimina la información fuera de esta área, incrementando de esta forma el rango dinámico del mapa acústico. Posteriormente, el proceso se vuelve a realizar sin considerar el área anterior, lo que permite identificar el segundo lóbulo principal. El proceso se repite de acuerdo con la cantidad de iteraciones que indique el usuario. El resultado final del HDR es un mapa acústico que muestra las fuentes reconocidas en cada iteración. En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de aplicación de esta herramienta.

Figura 16: Mapa acústico, motor de combustión. a) antes de HDR, b) después de HDR ²⁰.

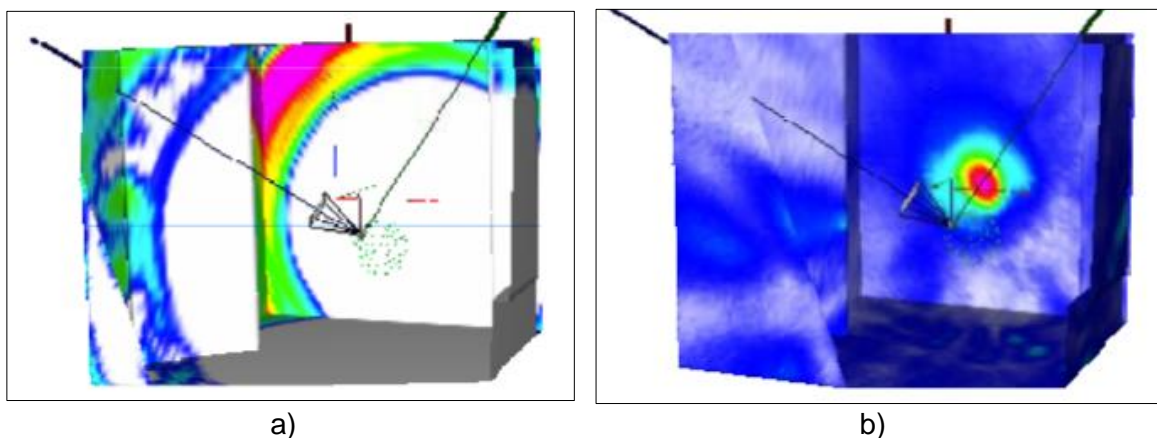


- c. **Zero Padding:** Para profundizar en esta herramienta, es importante mencionar que al utilizar el dominio temporal existe un tiempo mínimo para realizar el mapa acústico, que está definido por la siguiente ecuación ²¹.

$$Tiempo\ mínimo = \frac{\text{distancia máxima entre el punto de cálculo y el microfono del arreglo mas cercano}}{2 \times \text{velocidad del sonido}} \quad (2)$$

Si el tiempo que se ocupa es menor, los softwares de medición y postproceso de los datos amplían automáticamente el rango temporal y toma datos del tiempo adyacente al rango seleccionado, por lo tanto, los resultados entregados son erróneos.

Figura 17: a) Beamformer sin Zero Padding. b) Beamformer con Zero Padding ⁷.

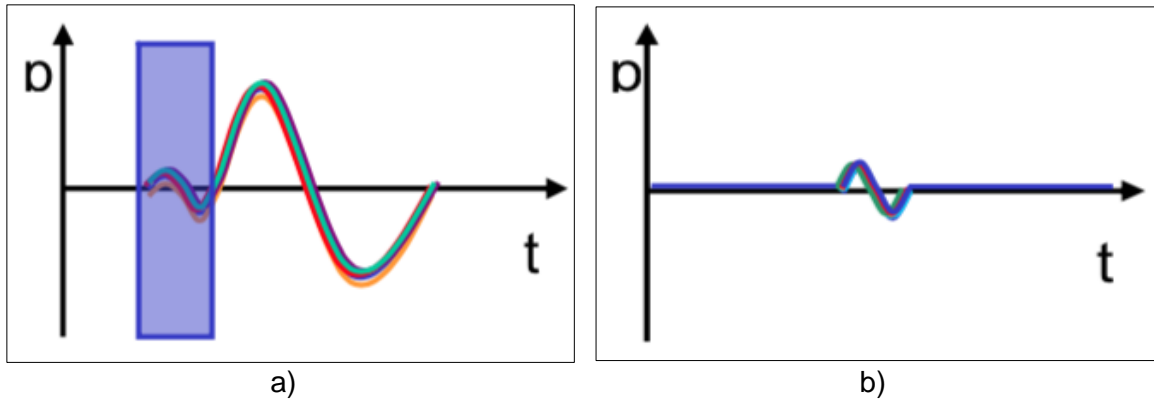


Sin embargo, esta situación se puede revertir utilizando la herramienta Zero Padding, la cual en vez de tomar datos del tiempo adyacente, establece como “cero” la información del tiempo agregado (Figura 18), de esta forma, no hay una alteración en los resultados de la señal seleccionada tal como se muestra la Figura 17b.

²⁰ Döbler, D., Schröder, R. (2012). High-Dynamic-Range-Algorithmus zur Kontrastverbesserung und exakter uellrekonstruktion in Beamforming-Systemen. DAGA 2012; 19-22 March, Darmstadt, Germany.

²¹ Gfai Acoustic Camera. (2015) Noise Image Help and Manual. Version: 06-2015. Berlin.

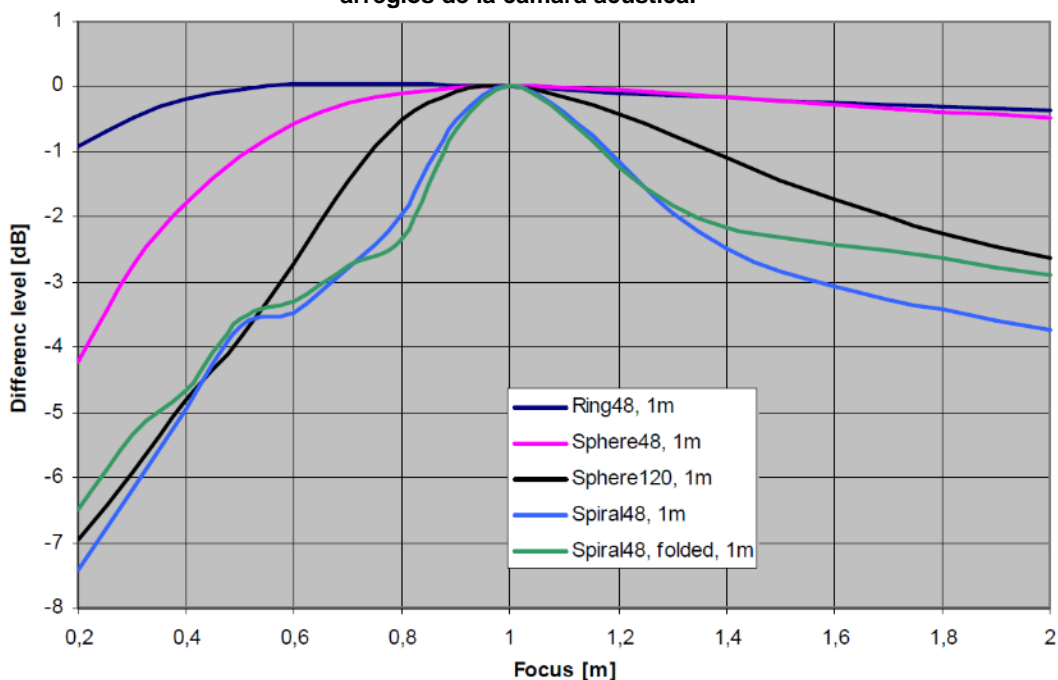
Figura 18: a) Rango temporal seleccionado, b) Zero Padding aplicado. ⁷



5.3.4. Errores en mapas acústicos

Uno de los errores que se pueden presentar al momento de calcular un mapa acústico en dos dimensiones puede ser producto de una distancia focal errónea. Dado que este parámetro es introducido por el usuario es factible que el valor no sea del todo preciso. En el año 2008, Döbler y su equipo de trabajo presentaron en el congreso Inter-Noise el trabajo llamado “Investigation of the depth of field in acoustic maps and its relation between focal distance and array design” ²², donde se realizaron mediciones de un parlante reproduciendo ruido blanco a un metro de diferentes arreglos de la cámara acústica. El objetivo del estudio era ver la variación de los niveles de presión medidos al cambiar la distancia focal.

Figura 19: Diferencia de nivel al variar la distancia focal para diferentes arreglos de la cámara acústica. ²²



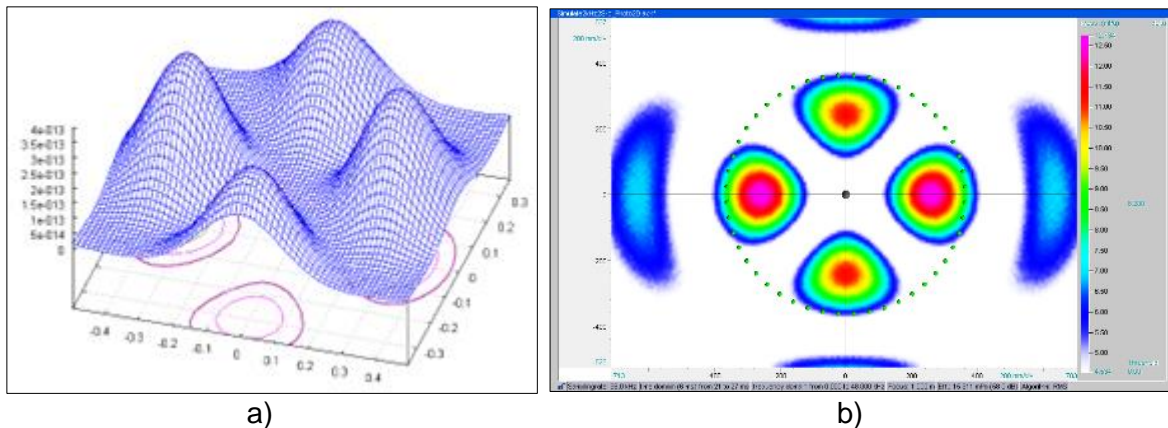
En la figura anterior se observa que existe una disminución del nivel de presión al incorporar una distancia focal incorrecta. En este sentido, el arreglo que sufre menos alteración del nivel corresponde al arreglo anillo (Ring48), mientras que los otros arreglos sufren modificaciones de hasta 7 dB. De esta forma, el arreglo Ring48 se convierte en una buena opción para mediciones en estructuras con superficies irregulares ²².

Otro error común en los mapas acústicos ocurre por la semejanza de nivel entre el lóbulo principal y los lóbulos laterales, lo que puede llegar a confundir enormemente

²² Döbler, D., Heilmann, G., Schröder, R. (2008). Investigation of the depth of field in acoustic maps and its relation between focal distance and array design. Inter-Noise 2008; 26-29 October, Shanghai, China.

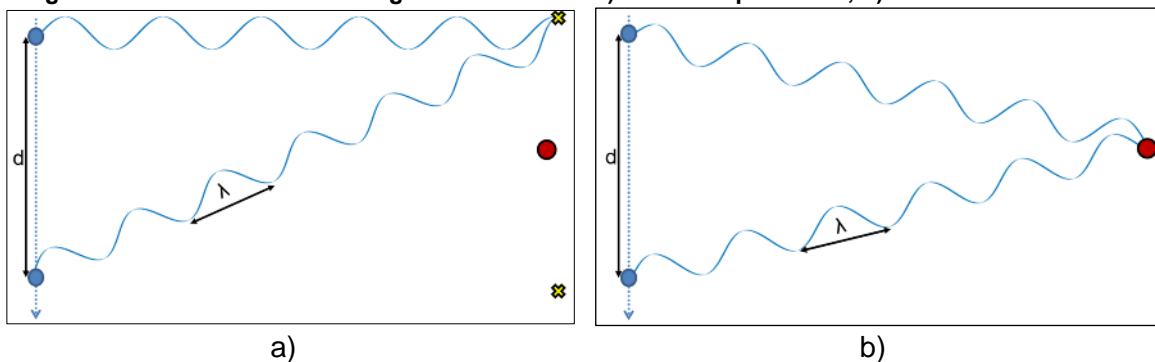
la localización de fuentes sonoras. A continuación, se presentan las imágenes relacionadas al caso de dos fuentes de 2kHz, en las cuales a 1 metro de distancia se genera la suma de los lóbulos laterales de cada fuente resultando niveles de presión sonora similares a las de los lóbulos principales ¹⁹.

Figura 20: a) Representación tridimensional de lóbulos principal y laterales, b) Mapa acústico 2D. ²³



Lo anterior está relacionado con el efecto aliasing o solapamiento, que corresponde en el caso de la técnica beamforming, cuando una señal ubicada a cierta distancia de la cámara acústica y que posee una longitud de onda menor a la distancia entre los micrófonos, no puede ser localizada correctamente ²⁴. El aliasing o solapamiento está asociado al teorema de muestreo de Nyquist-Shannon ²⁵ y define la frecuencia de corte superior de un arreglo de micrófonos. En la siguiente imagen se ilustra el efecto aliasing, usando el ejemplo de la localización de una fuente que emite una onda sonora cuya longitud de onda es menor que el doble de la distancia entre los dos micrófonos (frecuencia mayor a la de corte). La técnica del beamforming ya no puede distinguir si la fuente de la emisión de sonido se encuentra en el punto rojo o en una de las cruces amarillas ²⁴.

Figura 21: Ilustración del aliasing en dos fuentes: a) Fuente superior "x", b) Fuente central "o". ²⁴



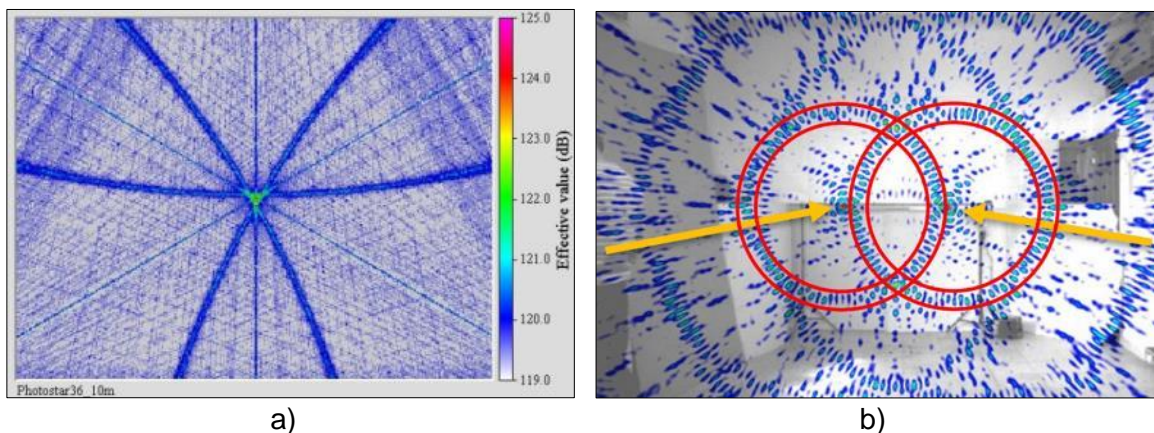
Producto del aliasing y las posiciones de los micrófonos de los arreglos, en los mapas acústicos se forma a través de los lóbulos laterales la forma del arreglo. Por otro lado, en casos extremos se generan otro tipo de lóbulos llamados Lóbulos de rejilla, cuya forma también está relacionado con la forma del arreglo utilizado. A continuación, se muestra algunos ejemplos del aliasing en mapas acústico al ocupar el arreglo en forma de estrella y anillo.

²³ Acoustic Camera Training. (2014). Chapter 02 Theoretical Background (physical principles). Versión: August-2014.

²⁴ gfaitech GmbH. (s.f.d). Microphone Array Optimal Frequency Range. Obtenido de Sitio web de gfaitech GmbH: <https://www.gfaitech.com/knowledge/faq/frequency-range-microphone-array>. Consultada el 02 de enero del 2024.

²⁵ Johnson, D.H., Dudgeo, D.E. (1993). Array Signal Processing Concepts and Techniques. New Jersey: PTR Prentice Hall.

Figura 22: Mapas acústicos con efecto aliasing: a) Arreglo estrella ²³, b) Lóbulo de rejilla arreglo Anillo. ²⁴



5.4. Aplicaciones de la Cámara Acústica


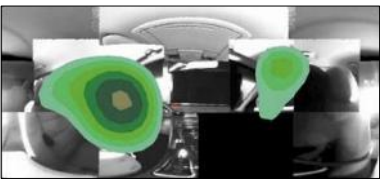
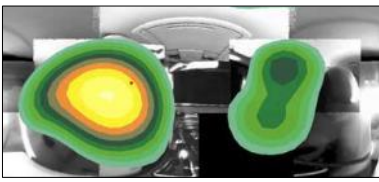


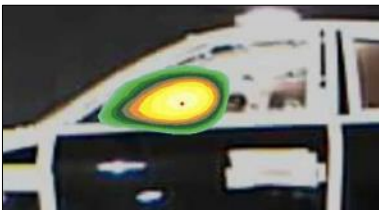
5.4.1. Mapas acústicos en dos dimensiones

a. Medios de transporte

El uso de cámara acústica se ha convertido casi en un estándar de medición en medios de transporte como autos, trenes, aviones, entre otros. Esto se debe principalmente a que la cámara acústica permite visibilizar los problemas de ruido, facilitando la localización y análisis de fuentes sonoras, y posteriormente el diseño de soluciones ⁹.

En el caso de los automóviles se han realizado estudios al interior, exterior y en movimiento de un vehículo (túneles de viento). La identificación y localización de ruido al interior de un vehículo a través de la cámara acústica, busca principalmente mejorar el confort de las personas que lo ocupan, disminuyendo en lo posible todas las fuentes de ruido que se escuchan desde el interior. En la siguiente figura se muestra dos mapas acústicos que muestran las diferencias entre ocupar dos prototipos de retrovisores y su consecuencia sonora al interior del vehículo ²⁶.

Figura 23: Mapas acústicos al interior y exterior del vehículo al cambiar el diseño del retrovisor. ²⁶

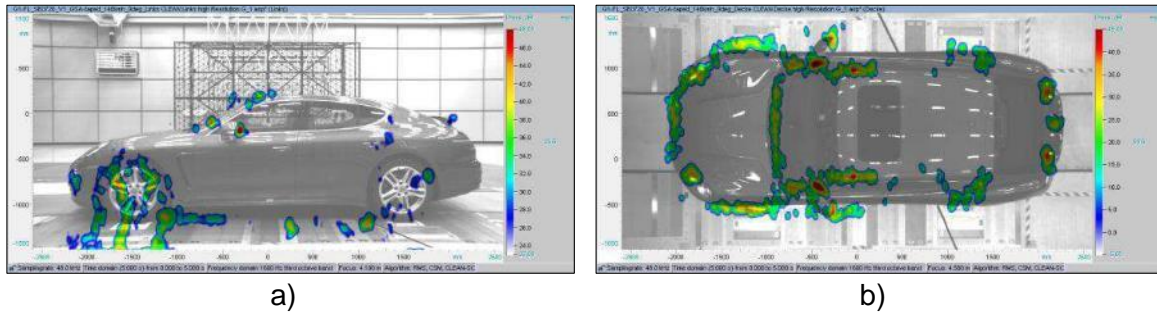
	Baseline design Left window Right window	Low intrusion design Left window Right window
		
		

Las mediciones con cámara acústica de un vehículo en movimiento son realizadas

²⁶ Ginn, K., Hald, J. (2010). Aerodynamic noise source identification in wind tunnels using acoustical array techniques. 8th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference - 'Low Carbon Vehicles' (2010); 13-14, October, Grove, United Kingdom.

generalmente en túneles de viento, el cual corresponde a un laboratorio de ensayo que permite someter al vehículo a diferentes escenarios en función de variables como velocidad, dirección, entre otros. En este sentido, es importante mencionar que a altas velocidades el ruido aerodinámico es la fuente de ruido dominante ²⁷, por lo que es importante analizar algunos aspectos de diseño como los retrovisores o tipos de neumáticos ⁹. En el año 2015 las empresas GFal e.V. y gfai tech GmbH construyeron un conjunto de arreglos de micrófonos en el túnel de viento de la empresa de automóviles Porsche ²⁸. En total fueron tres los arreglos construidos, los cuales permitían analizar las emisiones de ruido aerodinámicas desde tres vistas distintas: superior, del conductor y acompañante.

Figura 24: Mapas acústicos, mediciones con Cámara Acústica en túnel de viento. a) vista lateral, b) vista superior. ²⁸



De las figuras anteriores, es posible observar que el ruido aerodinámico se concentra principalmente en los espejos retrovisores y en las ruedas.

En el caso de los trenes se han realizado mediciones internas y externas, ambas mientras el tren está en movimiento. Para mediciones internas los resultados arrojaron que dentro del vagón existía una fuga de ruido generado por los frenos del tren como se muestra en la siguiente figura ²⁹.

Figura 25: Medición con Cámara Acústica al interior de un tren. ²⁹



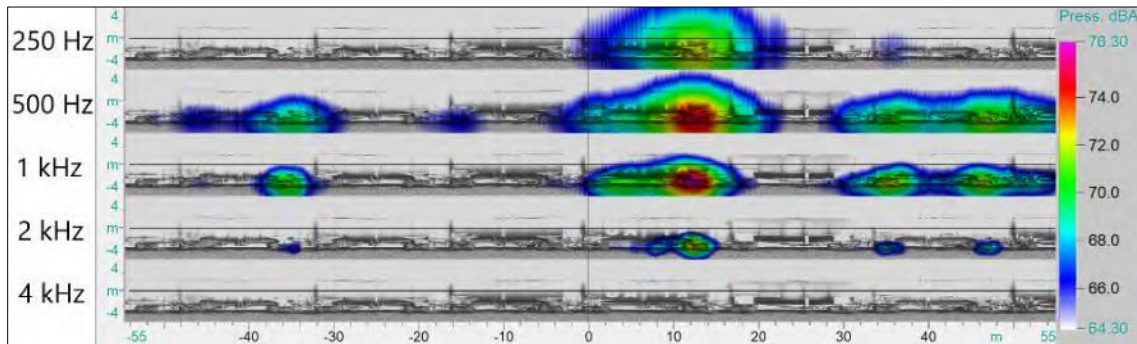
²⁷ Brüel & Kjær. Wind tunnel testing for cars. Obtenido de Sitio web de Brüel & Kjær: <https://www.bksv.com/en/knowledge/applications/noise-sourceidentification/automotive-wind-tunnel-testing>. Consultada el 4 de enero del 2024.

²⁸ Döbler, D., Ocker, J., Puhle, C. (2016). On 3D-Beamforming in the wind tunnel. Berlin Beamforming Conference 2016; 29 February-01 March, Berlin, Germany.

²⁹ Acoustic Camera. Application note. Pass-by and Interior Measurements. Obtenido de Sitio web de Acoustic Camera: <https://www.acousticcamera.com/fileadmin/acoustic-camera/applications/Acoustic-Camera-Application-Train-Passby02.pdf>. Consultada el 5 de enero de 2024.

Por otro lado, Kümmitz y Movahed ³⁰ en el año 2020 realizaron mediciones exteriores del paso de un tren en la vía principal entre Hannover y Minden, Alemania. Se realizaron un total de 157 mediciones, lo que permitió analizar en profundidad diferentes aspectos del ruido de trenes, tales como relación entre el ruido de paso y velocidad, emisión de onda de flexión de los rieles, ruido emitido por llantas planas, análisis de fuentes sonoras por frecuencia, entre otros. En la siguiente imagen se muestran 6 mapas acústicos para diferentes bandas de octava con el mismo rango dinámico.

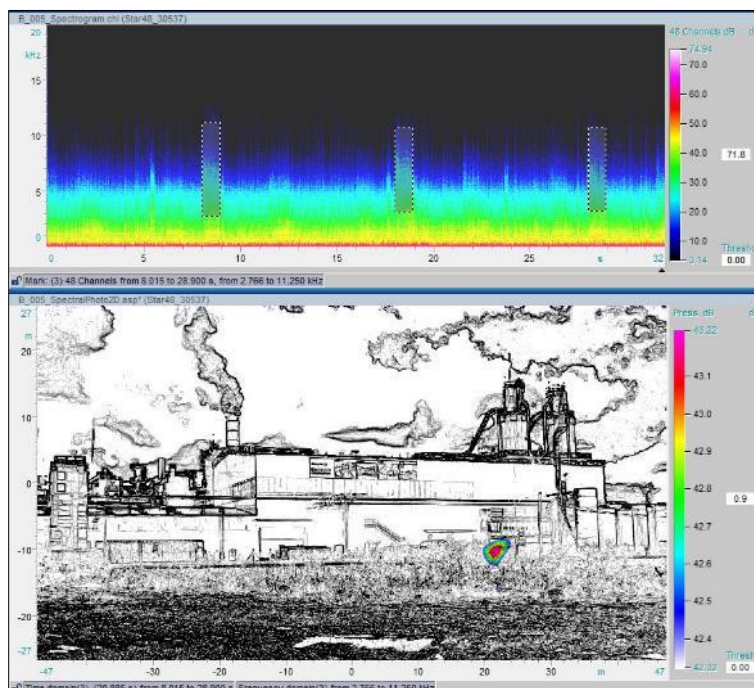
Figura 26: Mapa acústico del paso de un tren para diferentes frecuencias. ³⁰



b. Ruido Industrial

En general el ruido asociado a industrias posee diferentes fuentes de ruido como compresores de aire, ventiladores, chimeneas, tuberías o grandes refrigeradores industriales, entre otras ³¹. En este sentido, Alloza y Vonrhein en el año 2019 realizaron mediciones con cámara acústica en una industria ubicada cerca de una calle con alto flujo vehicular lo que afectaba directamente las condiciones de ruido de fondo del sector y no permitía escuchar claramente las fuentes de ruido proveniente de la industria. Sin embargo, la cámara acústica permite profundizar el análisis a través de un espectrograma, obteniendo mapas de ruido con sólo información de ruido de la industria. De esta forma se lograron observar fuentes de ruido como compresor de aire, chimenea y extractor de aire de la chimenea.

Figura 27: Mapa de ruido compresor de aire de la industria. ³¹

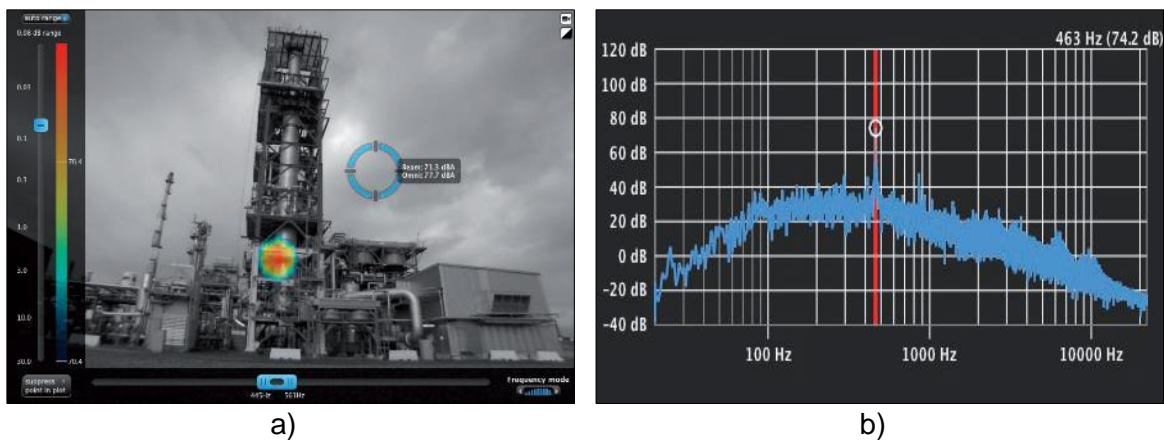


³⁰ Kümmitz, S., Movahed, A. (2020) Visualisation of train noise with acoustic cameras. 27th International Congress on Sound and Vibration; 12-16 July, Prage, Czech Republic.

³¹ Alloza, P., Vonrhein, B. (2019). Noise source localization in industrial facilities. Inter-Noise 2019; 16-19 June, Madrid, Spain.

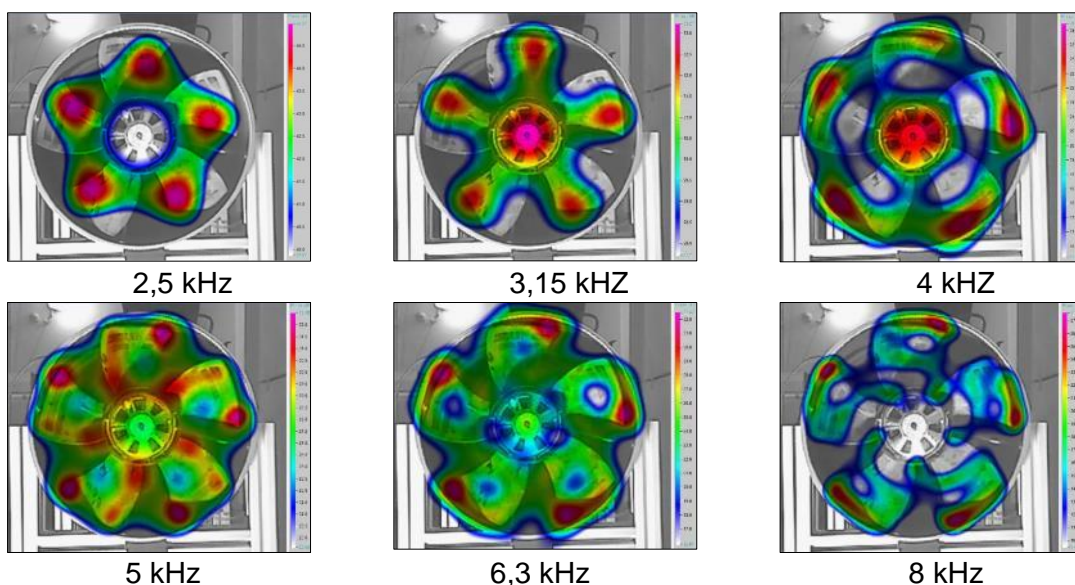
Otro ejemplo de aplicación de la cámara acústica en la industria es el caso estudio de la empresa Norsonic, realizado en una planta de producción de gas licuado en el año 2014 ³². Dentro de la planta de producción de gas se genera un ruido tonal de baja frecuencia, que provoca quejas de los vecinos aledaños a la industria. Además del ruido tonal, la industria posee múltiples fuentes de ruido, incluida la operación de carga y descarga de embarcaciones marítimas. Todos estos factores, complican la ubicación de la fuente de ruido tonal y la solución al problema. A través de mediciones con sonómetro, no se pudo determinar si el ruido tonal emitido procedía de toda la tubería o en una parte específica de ella. En cambio, las mediciones con cámara acústica lograron detectar con éxito los lugares donde se generaba el sonido tonal, además de identificar la frecuencia del tono. Al reconocer el origen del ruido tonal, se optimiza la medida de control de ruido únicamente en el lugar en conflicto y no toda la extensión de la tubería, disminuyendo considerablemente los costos asociados a la solución.

Figura 28: Ruido tonal. a) Mapa acústico, b) Espectro de frecuencia. ³²



Por otro lado, se han utilizado otros tipos de algoritmos para identificar casos específicos de fuentes de ruido. Por ejemplo el algoritmo llamado Rotational Beamforming en objetos que giran en torno a un eje, con el fin de identificar las principales fuentes de ruido que se producen cuando el objeto está en movimiento ³³. En las siguientes imágenes se muestran algunos de los resultados del estudio, correspondiente a mapas acústicos por banda de octava donde se identifica el lugar exacto de máxima emisión acústica.

Figura 29: Mediciones con cámara acústica de un ventilador en movimiento filtrado por bandas de tercio de octava. ³³



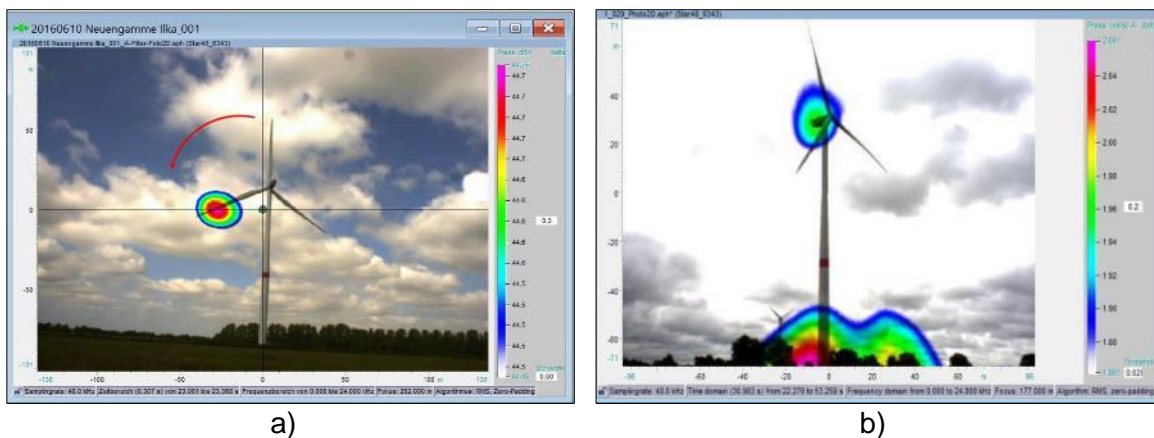
³² Grythe, J., Norsonic AS. (2014). Norsonic Acoustic Camera. Identifying low-frequency tonal noise in windy and noisy conditions.

³³ Kerscher, M., Heilmann, G., Puhle, C., Krause, R., Friebe, C. (2017). Sound source Localization on a fast rotating fan using rotational beamforming. Inter-Noise 2017; 27-30 August, Hong Kong, China.

c. Parques Eólicos

Estas instalaciones tienen la particularidad de que suelen estar ubicados en campos donde viven personas que pueden ser perturbadas por las emisiones de ruido de los aerogeneradores que conforman el parque eólico. En este sentido, se ha utilizado la cámara acústica para crear una base de datos de sonidos de aerogeneradores que se utilizarán en simulaciones de realidad virtual (auralización) de parques eólicos, con el objetivo de mostrarles a los residentes información concreta sobre cómo se escuchará el parque eólico proyectado, otorgándoles objetividad y aumentando la aceptación de la implementación del proyecto eólico ³⁴. El uso de la cámara acústica fue clave, ya que era necesario llevar a cabo grabaciones selectivas de las turbinas eólicas que no sean perturbadas por el ruido ambiental, las que se obtienen mediante el uso de sistemas de matriz como la cámara acústica. Además de la auralización, los autores plantean que la base de datos también se puede utilizar como referencia para la monitorización del estado de los aerogeneradores, a través de la comparación de grabaciones del aerogenerador y el sonido de referencia (base de datos), se pueden diagnosticar los problemas mecánicos de las turbinas, permitiendo a los operadores de parques eólicos optimizar su planificación de servicios y predicción de daños.

Figura 30: Mapas acústicos en aerogeneradores. a) Pala, b) Góndola y transformador. ³⁴

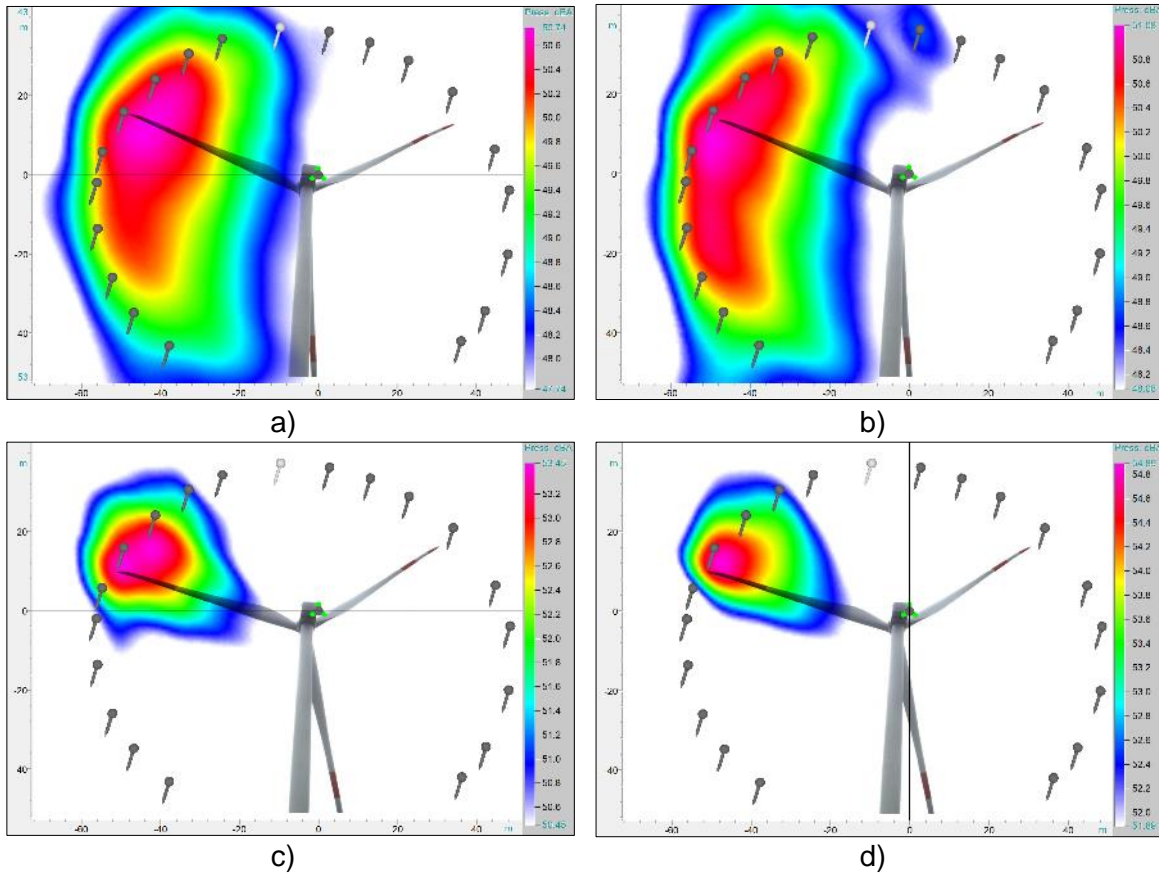


Uno de los últimos estudios realizados con cámara acústica en parque eólicos, tuvo como objetivo estandarizar el proceso de medición con este equipo. Para lograrlo, se realizaron diferentes mediciones en varios aerogeneradores variando la distancia, orientación y arreglo de la cámara acústica. Además, se midieron en dos aerogeneradores diferentes, uno con dientes serrados y otro sin ellos. Algunos de los resultados del estudio fueron: el tiempo de medición óptimo para encontrar la fuente sonora más predominante corresponde al giro de una de las palas; el ruido generado por el movimiento hacia abajo de la pala es significativamente mayor que por el movimiento hacia arriba; las palas con dientes serrados son mucho más silenciosa que las palas sin ellos, sobre todo bajo los 250 Hz; una cámara acústica con un diseño de matriz espiral y una gran apertura conduce a mejores resultados, entre otros ³⁵.

³⁴ Kerscher, M., Vonrhein, B., Ueberle, F., Rokita, D. (2016). How Acoustic Camera Measurements can help to increase the Acceptance of Wind Turbines. Wind Europe 2016; 27-29 September, Hamburg, Germany.

³⁵ Kümmritz, S., Movahed, A., Pehe, J. (2020). Development of a standard approach for wind turbine measurements with an acoustic camera for optimization purposes. Forum Acusticum 2020; 7-10 December, Lyon, France.

Figura 31: Mapas acústicos en el dominio del tiempo para diferentes tiempos de integración. a) 1 ciclo, b) 1/3 de ciclo, c) 1/12 ciclo, d) 1/36 ciclo. ³⁵

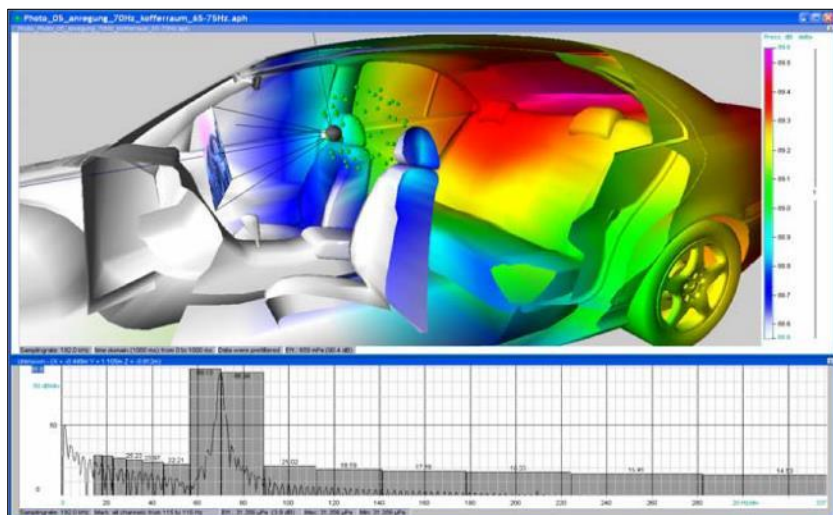


5.4.2. Mapas acústicos en tres dimensiones.

a. Industria automotriz

Los investigadores Gunnar Heilmann, Andy Meter y Dork Döbler presentaron en el año 2008 un trabajo llamado “Beamforming in the Time-domain using 3D-microphone arrays” ³⁶ en la Conferencia de Beamforming de Berlín. En su trabajo desarrollan varios experimentos prácticos que demuestran la capacidad y confiabilidad del análisis tridimensional. Unos de los experimentos abordados corresponden a mediciones en el interior de un vehículo para dos casos diferentes. El primer caso corresponde a la medición de un parlante subwoofer al interior del vehículo, el cual presenta un ruido tonal cercano a los 70 Hz.

Figura 32: Mapa acústico. Medición de parlante subwoofer al interior de un vehículo. ³⁶

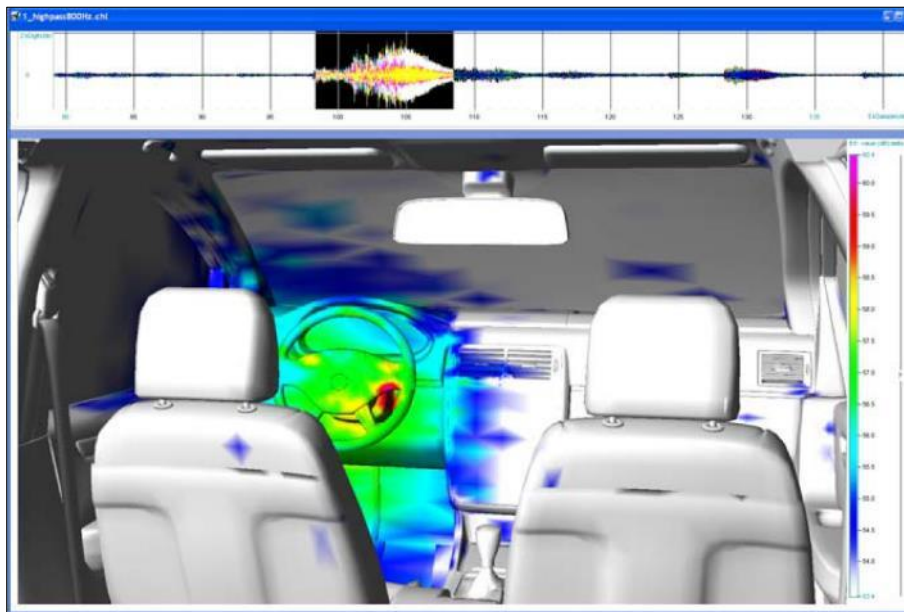


³⁶ Heilmann, G., Meyer, A., Böck, M., Döbler D. (2008). Beamforming in the Time-domain using 3D-microphone arrays. Berlin Beamforming Conference 2008; 19-20 February, Berlin, Germany.

A pesar de la dificultad que podría presentar la cámara acústica para analizar fuentes de ruido en bajas frecuencias, el equipo es capaz de identificar la ubicación de la fuente sonora, aunque sea con bajo rango dinámico.

El otro caso que se presenta en el trabajo corresponde a un ruido transiente y con ancho de banda amplio producto del “golpeteo” de las llaves del vehículo. Este tipo de ruido es mucho más fácil de detectar en comparación con las frecuencias bajas.

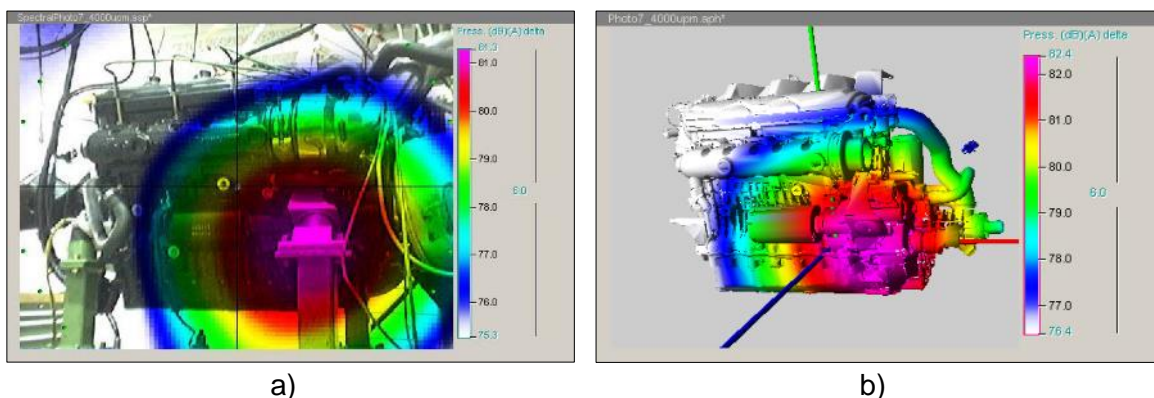
Figura 33: Mapa acústico. Medición de llaves al interior de un vehículo. ³⁶



De la figura anterior se observa claramente la ubicación del máximo con un rango dinámico mucho más amplio que el mapa acústico del subwoofer.

Por último, en el mismo trabajo, se plantea un error común en los cálculos de mapas de ruido en 3D. Este error ocurre cuando la fuente de ruido no está incluida en el modelo 3D, lo que da paso a tres situaciones diferentes; la fuente se proyecta erróneamente en el modelo (en la superficie donde está ubicada); se proyectan únicamente sus lóbulos laterales; o no se proyecta en absoluto.

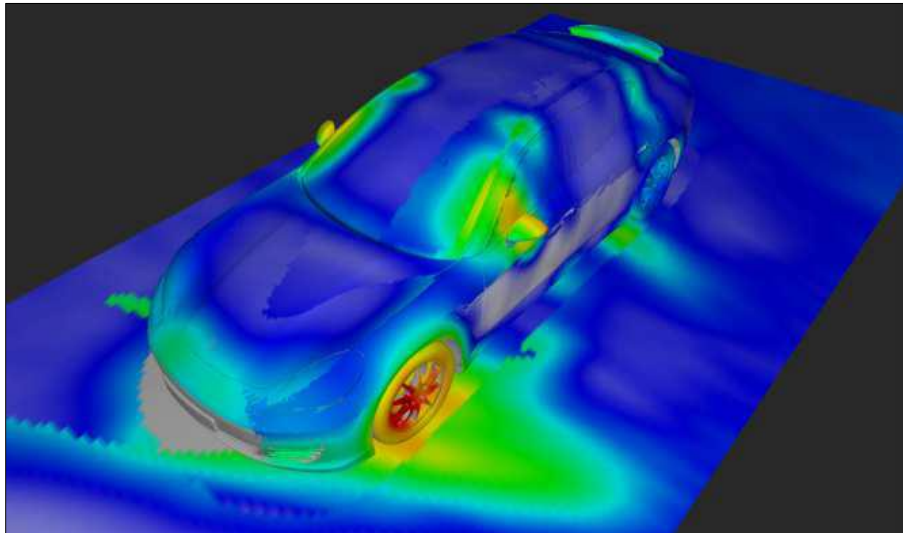
Figura 34: a) Mapa acústico 2D de una fuente de sonido causada por un montaje no fijo, b) Mapa acústico 3D la misma medición, pero mapeada en un modelo 3D. ³⁶



Otra aplicación en donde utilizaron la visualización del mapa acústico en tres dimensiones es en el trabajo realizado por Döbler et al. ²⁸, presentado también en la Conferencia de Beamforming de Berlín, pero en el año 2016. Los autores plantean que los mapas acústicos en tres dimensiones ofrecen una mayor exactitud en cuanto a la localización y determinación del nivel de presión en las fuentes sonoras que se generan en un auto en movimiento. Esto debido principalmente a los problemas que puede generar elegir una distancia focal incorrecta. En este sentido, en el estudio se establecen tres errores que genera una distancia focal incorrecta

los cuales son: variación en el nivel de presión sonora, desviación de la ubicación de la fuente y disminución del rango dinámico. Es importante mencionar que estos errores son específicos para el caso de un auto en movimiento, donde el enfoque es principalmente en las frecuencias entre 1k a 10kHz. Estos contratiempos son la motivación para reemplazar el uso del mapa acústico convencional hacia el tridimensional.

Figura 35: Mapa acústico 3D normalizado, 2 kHz. ²⁸



b. Industria de la madera

En el año 2016 los investigadores chilenos José Luis Barros y Alfredo Aguilera presentaron, en el marco del desarrollo del X Congreso FIA en Buenos Aires, un trabajo denominado “Estudio experimental de la relación entre sonido radiado y condiciones de maquinado de una máquina cepilladora de madera basado en mediciones con cámara acústica” ³⁷, donde lleva a cabo una primera comparación entre diferentes condiciones de maquinado y las imágenes correspondientes a la radiación sonora obtenidas mediante una cámara acústica.

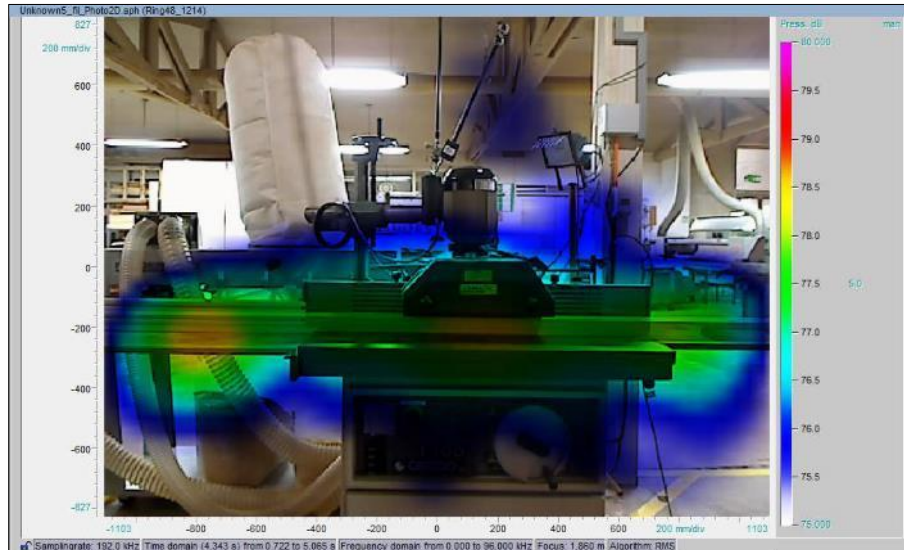
Para ello se utilizó una máquina de cepillado en cuyo eje se montaron cabezales de 6 cuchillos, permitiendo el control continuo de la velocidad de rotación mediante un variador de frecuencias. Este equipo incluye un carro de avance automático controlado por variador de frecuencias propio, lo cual permite un control de velocidades de forma precisa e independiente.

Considerando los resultados de estudios anteriores, las señales acústicas registradas son procesadas mediante un filtro pasa altos con frecuencia de corte de 1000 Hz, lo cual permite reducir el efecto de fuentes de ruido externas (sistema de aspiración de virutas, sistema de arrastre, sistema de rotación del cabezal) no relacionadas directamente con el proceso de cepillado.

Para este primer estudio experimental con cámara acústica se utilizaron cuatro condiciones de maquinado distintas, variándose entre dos valores de velocidad de rotación de las cuchillas de corte (4700 y 6000 RPM) y dos valores de la velocidad de avance del carro de arrastre (20 y 30 m/min).

³⁷ Barros, J.L., Aguilera, A. (2016). Estudio experimental de la relación entre sonido radiado y condiciones de maquinado de una máquina cepilladora de madera basado en mediciones con cámara acústica. X Congreso FIA. Buenos Aires, Argentina.

Figura 36: Imagen de radiación sonora obtenida mediante cámara acústica (condiciones de maquinado: velocidad de rotación de 4700 RPM, velocidad de arrastre de 20 m/min).³⁷

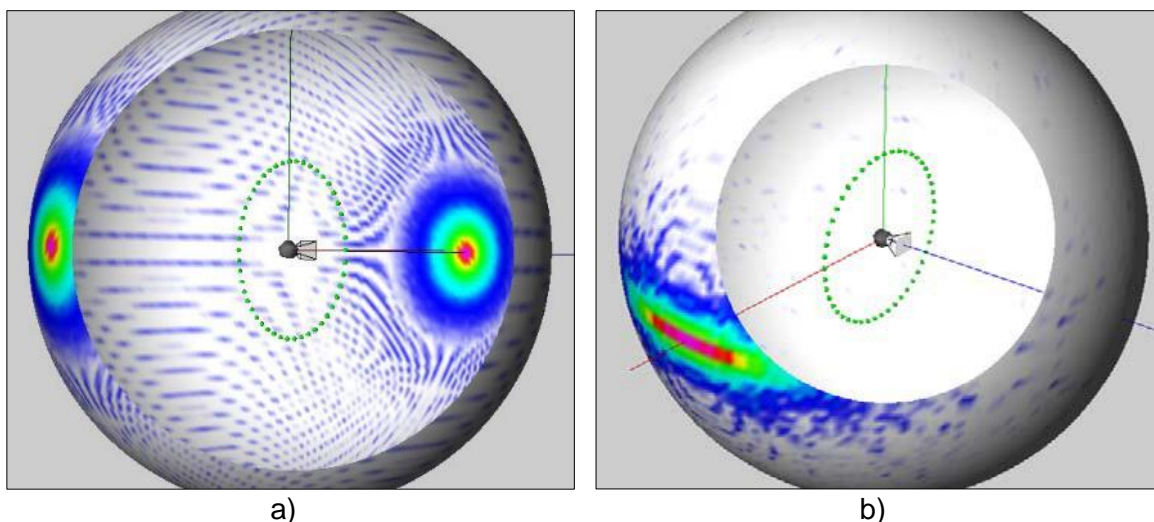


Este primer estudio experimental ha permitido establecer la factibilidad de relacionar las imágenes obtenidas mediante cámara acústica con las condiciones de maquinado para una máquina cepilladora de madera. Es posible considerar como una línea de desarrollo e investigación a seguir, el monitoreo de condiciones de maquinado en base a arreglos de micrófonos, lo cual podría presentar ventajas respecto a los procedimientos desarrollados hasta ahora utilizando micrófonos comunes, dado que es posible instalar los sensores a mayor distancia de la máquina evitando interferir con la cadena productiva y reduciendo el efecto del ruido proveniente de otras fuentes.

c. Acústica de salas

Otro de los experimentos realizados por Heilmann et al. (2008) corresponde a la simulación de una sala esférica con fuentes de ruido en su interior (ruido blanco de 0 a 20 kHz). La primera prueba se realizó con el arreglo anillo y se ubicó la fuente de ruido al frente de ella y luego al costado derecho.

**Figura 37: Mapa acústico en 3D de una fuente de sonido.
a) Frente a la cámara acústica, b) En el lado derecho de la cámara acústica.³⁶**



En el primer caso (Figura 36a) se observa que se proyectaron dos fuentes de ruido en vez de una, ambas ubicadas a la misma distancia del arreglo, formando un espejo entre la fuente real y la creada. Esto se debe a la ambigüedad que presenta un arreglo plano en este espacio, ya que siempre puede existir dos puntos que en la superficie del modelo esférico que tienen la misma distancia a todos los

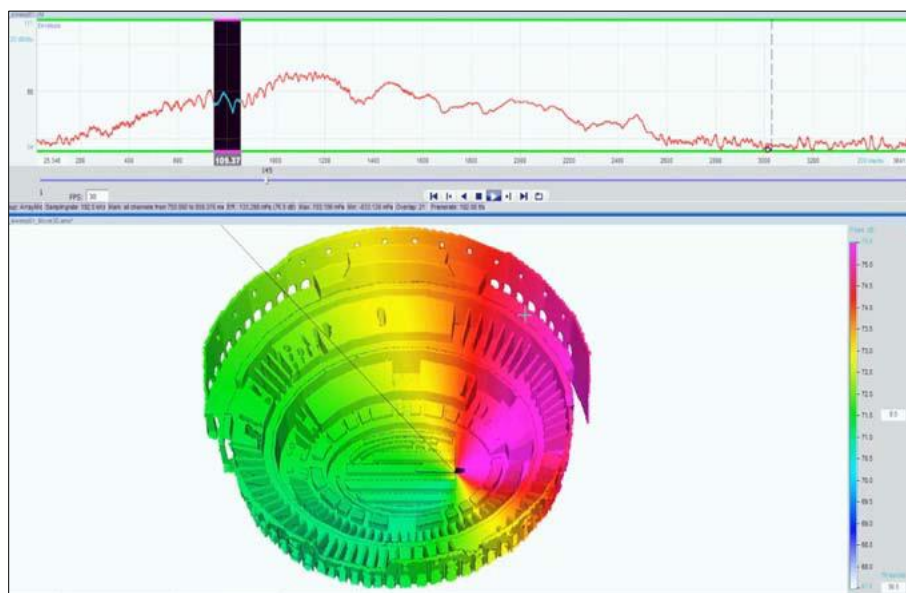
micrófonos. En el segundo caso (Figura 36b) la fuente de ruido es ubicada al costado derecho de la cámara, también se genera un efecto de espejo con respecto al arreglo. Sin embargo, dado que la fuente está justo en el límite, resulta un mapa acústico confuso, no logrando determinar con exactitud el origen de la fuente de ruido. Frente a estos resultados, los autores determinan que la cámara acústica con un arreglo de micrófonos plano no puede realizar un mapa acústico en tridimensional sin distorsiones, por lo cual es fundamental contar con un arreglo esférico para realizar este tipo de estudios.

En el año 2014, Mojtaba Navvab ³⁸ y su equipo de trabajo realizaron una serie de mediciones con cámara acústica en diferentes edificios patrimoniales e históricos, como el Coliseo Romano, Teatro Taormina, Villa Adriana, entre otros. Este artículo describe un enfoque diferente para medir la contribución del sonido reflejado en la evaluación acústica de edificios históricos, con el objetivo de visualizar este fenómeno para la validación de su uso en simulaciones mediante softwares de acústica de salas. Los resultados obtenidos del estudio serán de utilidad para escoger adecuadamente los materiales de reconstrucción sin afectar los parámetros acústicos de la sala. Además, el registro de audio podrá ser ocupado para la auralización del lugar con fines patrimoniales. En la Figura 38 se muestra el mapa acústico tridimensional del Coliseo Romano, en donde se muestra el sonido reflejado al ocupar una señal sweep.

Figura 38: Mediciones con Cámara Acústica en Coliseo Romano. ³⁸



Figura 39: Mapa Acústico del Coliseo Romano. ³⁸



³⁸ Navvab, M., Bisegna, F., Heimann, G., Böck, M. (2014b). Capturing historical buildings space sound signature using beamforming. Berlin Beamforming Conference 2014; 19-20 February, Berlin, Germany.

d. Evaluación ambiental

El ruido ambiental se reconoce internacionalmente como la contaminación más común, los mayores problemas se generan en zonas donde existe una incompatibilidad de los usos de suelo o en zonas donde conviven actividades de distinta característica, como una alta presencia de actividad industrial junto a una zona residencial, tal como el caso de la ciudad de Coronel, Chile.

Teniendo presente el escenario ambiental en el que se encuentra inserta la comuna de Coronel, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) de Chile contrató la realización del estudio “Evaluación de los Niveles de Ruido en Coronel” centrado en los aspectos concernientes a la calidad acústica de Coronel, sus principales emisores y su caracterización.

Para generar mapas de ruido industrial es posible utilizar instrumentación avanzada (cámara acústica) con el fin de determinar los niveles de potencia adecuados a las fuentes virtuales que representarían cada planta o actividad industrial ³⁹. De esta manera se puede generar un mapa que permita tener mayor claridad en el aporte de estas fuentes en los niveles de ruido existentes en el entorno.

La determinación de potencia acústica para complejos industriales multifuentes presenta habitualmente diversas complicaciones, dependiendo por ejemplo del emplazamiento de la industria, de la existencia o no de otras fuentes relevantes, de la posibilidad de medir a distancias adecuadas, etc. Dada las dimensiones del problema no es posible aplicar métodos de medición habituales para fuentes individuales, como por ejemplo los incorporados en las normas ISO 3744 e ISO 3746. Una opción que se plantea habitualmente es la utilización del método establecido por la norma ISO 8297, sin embargo, tiene la limitante de que las dimensiones horizontales de la planta sean considerablemente mayores a las dimensiones verticales, radiación aproximadamente uniforme en el plano horizontal y efecto despreciable de otras fuentes ajenas a la planta a analizar. Es razonable entonces considerar la utilización de una cámara acústica de nivel avanzado para el monitoreo y localización de fuentes de ruido de plantas industriales.

El procedimiento utilizado consiste en tomar registros del sonido emitido en varios puntos en torno a una planta industrial, generando diferentes imágenes de distribución sonora, que permiten obtener directamente el espectro característico de las fuentes predominantes y la potencia acústica asociada. Estas fuentes predominantes serán utilizadas como fuentes virtuales puntuales para modelar la emisión sonora de la planta en su totalidad. La técnica basada en cámara acústica se utilizó en los casos más críticos, ya sea por tratarse de plantas de gran tamaño con diversidad de fuentes y grandes alturas, o por fuentes que están claramente identificadas pero que debido a la influencia de fuentes externas (ejemplo: Autopista) resulta muy difícil de caracterizar utilizando solamente un sonómetro. En estos últimos casos se saca provecho del elevado grado de direccionalidad que se puede lograr con una cámara acústica.

Para realizar el modelamiento del ruido y generar el correspondiente mapa de ruido industrial, se incorporaron en el software de modelamiento CadnaA de Datakustik los valores de potencia acústica establecidos a partir de las mediciones en terreno y se utilizó el modelo de propagación establecido en la norma ISO 9613.

En la campaña de mediciones se obtuvieron más de 100 registros con cámara acústica, los que fueron debidamente analizados con el objetivo de generar datos de calidad para la etapa de modelamiento y servir como información relevante en el

³⁹ Barros, J.L., Álvarez, J.P. (2016). Medición, modelamiento y análisis de ruido industrial en la ciudad de Coronel (Chile) – Ventajas de usos de una cámara acústica para localización de fuentes. X Congreso FIA. Buenos Aires, Argentina.

análisis de medidas de control.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de imágenes generadas a partir de los datos obtenidos en los puntos de medición para el caso de una central de generación termoeléctrica.

Figura 40: Identificación de fuentes predominantes para determinar potencia acústica asociada. Central Bocamina, Coronel. ³⁹



Como se puede apreciar, existen concentraciones de energía que permiten establecer la ubicación de fuentes predominantes que posteriormente fueron utilizadas para el modelamiento acústico. Además de las fuentes virtuales para representar las plantas termoeléctricas, es posible establecer sus espectros de potencia sonora.

En definitiva, la utilización de una cámara acústica presenta claras ventajas en el proceso de obtención de datos para generar mapas de ruido industrial. Mediante un procedimiento rápido y sencillo es posible establecer fuentes predominantes y sus características espectrales, independiente de la complejidad de la planta y de la altura a las que se ubican las fuentes. Este último aspecto es de suma importancia, resolviendo el problema de medir fuentes de muy difícil acceso desde una gran distancia.

Además de la ventaja para asignar los niveles de potencia para efectos de modelamiento, la información generada por la cámara acústica es de gran utilidad en el análisis de posibles medidas de control tendientes a reducir el impacto de las emisiones de ruido hacia la comunidad.

e. Otras aplicaciones

En el año 2020, Vonrhein ⁴⁰ y su equipo de trabajo presentaron un nuevo método para visualizar la directividad del sonido utilizando la cámara acústica Mikado. Como se mencionó anteriormente, este equipo es de carácter portátil, por lo cual puede medir mientras está en movimiento, registrando las señales acústicas en todas sus direcciones. Además, la Mikado tiene incluido una depth camera la que permite generar el modelo 3D al mismo tiempo del registro de señales acústicas. Con estas dos características de los equipos, en conjunto con el algoritmo dynamic beamforming creado especialmente para este equipo, es posible identificar la fuente de ruido del objeto y conocer su directividad, tal cual se muestra en las figuras.

⁴⁰ Vonrhein, B., Kerscher, M., Heilmann, G., Döbler, D., Meyer, A. (2020). Introduction to a new 3-dimensional method to visualize sound directivity based on a moving microphone array and beamforming. Inter-Noise 2020; 23-26 August, Seúl, South Korea.

Figura 41: Mapa acústico aspiradora (3150 Hz), indicando a través de flechas la directividad. ⁴⁰

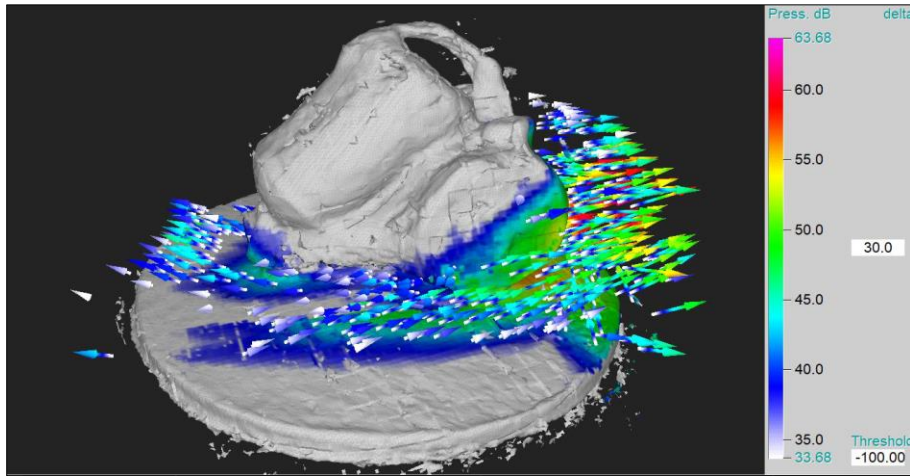
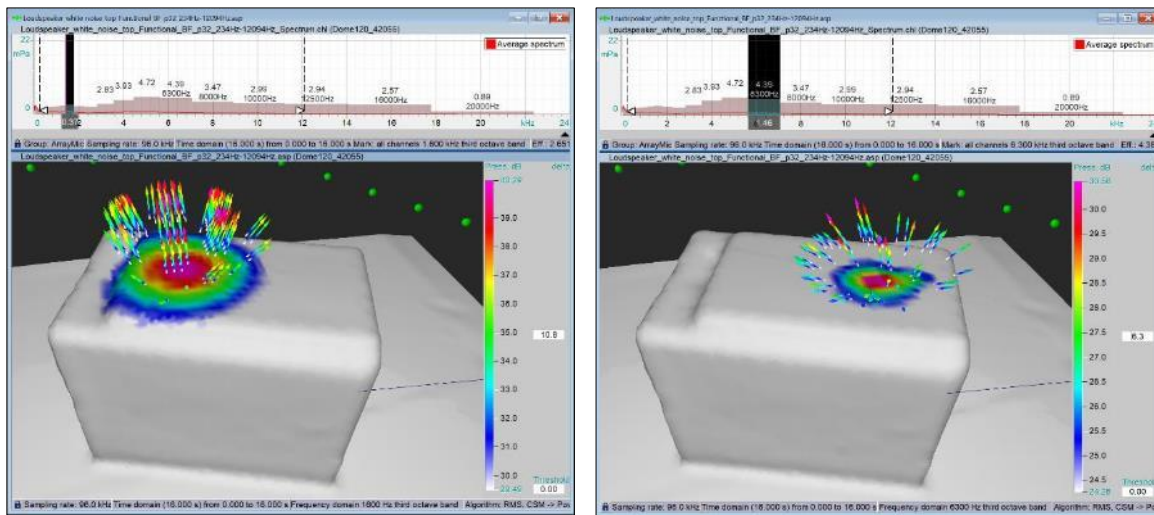


Figura 42: Mapa acústico parlante: a) 1600 Hz, b) 6300 Hz. ⁴⁰

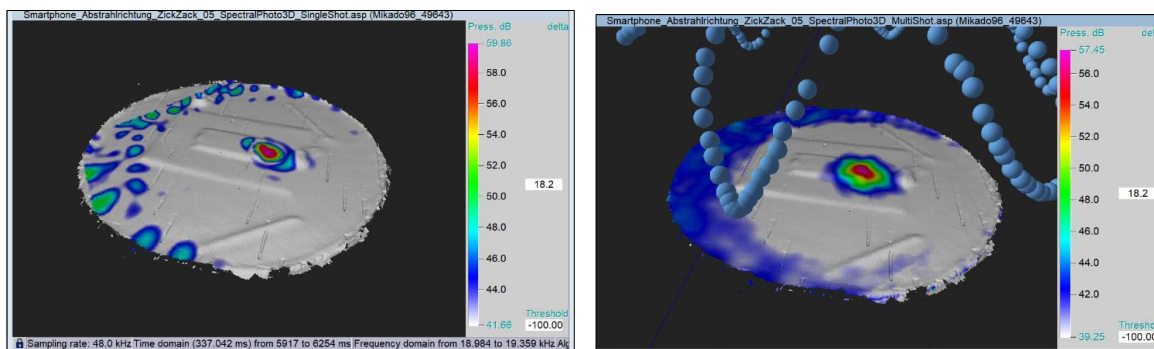


a)

b)

El algoritmo dynamic beamforming no solo presenta una ventaja en los mapas acústicos tridimensionales, sino que también aumenta la calidad del mapa acústico 2D al eliminar los lóbulos laterales que se producen en una medición fija. En las siguientes imágenes se muestra un ejemplo de eliminación de los lóbulos laterales al realizar una medición en movimiento.

Figura 43: Mapa acústico celular sobre mesa. a) Medición fija, b) Medición en movimiento. ⁴⁰



a)

b)

6. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

6.1. Criterios básicos y proceso de selección de equipamiento

La elección adecuada del dispositivo de medición es de vital importancia para una correcta toma de datos. Dado que la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS) atiende una extensa cartera empresas de los más variados rubros de la producción, el equipo a utilizar debe cumplir con los siguientes criterios básicos:

- Versatilidad. El equipo deberá contener todos los elementos que permitan entregar la mayor cantidad de información relevante a partir de mediciones de corta duración en terreno.
- Transportabilidad. El dispositivo seleccionado debe ser liviano y fácil de transportar, idealmente en una sola maleta.
- Tamaño. El despliegue del arreglo de micrófonos no debe ser de grandes dimensiones, ya que se requiere su uso en espacios reducidos durante la medición en terreno.
- Operación. Debe estar diseñada para ser utilizada por un (1) operador.
- Robustez. La materialidad y arquitectura del equipo debe garantizar su uso intensivo en ambientes de trabajo extremos.
- Herramientas. El sistema de medición debe contar los softwares necesarios para el correcto análisis de datos.
- Respuesta en frecuencia de los mapas acústicos. Dado el tamaño del arreglo de micrófonos requerido, el equipo debe garantizar mediciones que, a lo menos, abarque desde los 500 Hz a los 20 KHz del espectro audible.
- Rango de niveles de mapas acústicos. El sistema de medición debe a lo menos presentar un rango de niveles de 10 dB a 110 dB.
- Resolución de la cámara de video. El equipo debe contar con una cámara de alta resolución, a lo menos de 1.900 x 1.000 píxeles, formato Full HD.
- Captura de imágenes 3D. Para garantizar imágenes tridimensionales, se requiere que el sistema cuente con un dispositivo Intel® RealSense™ Depth Camera D435.
- Autonomía de batería. La cámara acústica debe tener la capacidad de trabajo autónomo, sin la necesidad de depender de una toma de corriente, de a lo menos 2 horas continuas.
- Condiciones ambientales. El equipamiento debe ser capaz de operar en condiciones de temperatura de 0 °C a 35 °C y una humedad relativa del aire de a lo menos un 75%.
- Soporte. Contar con un representante y/o servicio técnico autorizado en el país.

6.2. Selección de Centros de Trabajo

Para el presente estudio se consideraron 10 centros de trabajo ubicados en la Región Metropolitana. Para su selección, se consideraron empresas de distintos rubros y se efectuó consulta a los Especialistas en Higiene Industrial, respecto a aquellas empresas en donde, en su evaluación de exposición ocupacional a ruido, presentaron dificultad para identificar las fuentes de ruido, y en donde existía el apoyo para realizar las respectivas mediciones.

Tabla 4: Centros de trabajo seleccionados.

Centro de Trabajo	Rubro
Muestra 1	Fabricación de botellas de vidrio
Muestra 2	Recicladora de acero
Muestra 3	Fabricación de envases de cartón
Muestra 4	Metalúrgica
Muestra 5	Elaboración de productos de fibrocemento
Muestra 6	Embotelladora
Muestra 7	Fabricación de muebles
Muestra 8	Fabricación de tubos de PVC
Muestra 9	Elaboración de productos lácteos
Muestra 10	Industria alimentaria

6.3. Mediciones en Terreno

Efectuada la selección de la cámara acústica, de manera previa a la campaña de mediciones, se efectuó reunión con el equipo de Especialistas en Higiene Industrial de ACHS asociados a cada uno centros de trabajo seleccionados, oportunidad en que se presentó el equipo humano a cargo del desarrollo de las mediciones y el sistema de medición que se utilizará, sus características técnicas y el trabajo a realizar en terreno.

Para cada centro de trabajo seleccionado e individualizado en Tabla 4, se proyectó una jornada de medición, totalizando 10 jornadas de trabajo, para cada una de las cuales, participó un equipo humano conformado por 3 personas:

- Ingeniero de la empresa propietaria de la cámara acústica seleccionada, encargado de operar el equipo de medición y software.
- Ingeniero de la empresa Compañía Electroacústica Sudamericana Limitada (entidad ejecutora del Proyecto N° 307/2023).
- Especialista en Higiene Industrial de la ACHS que había efectuado la respectiva evaluación de exposición ocupacional a ruido.

Además de las personas señaladas, durante toda la jornada de medición, acompañó un representante del área de Salud y Seguridad Ocupacional del centro de trabajo respectivo.

En cada una de las máquinas, equipos o procesos que interesaba medir, se procedió, en primer lugar, a analizar las posibilidades en terreno que otorguen mayor seguridad tanto al operador como al equipamiento de medición. Luego se posicionó el atril con el equipo de medición a una distancia conveniente de la fuente sonora a analizar, orientando la Cámara Acústica en dirección al foco emisor. Se abrió el programa NoiseImage dispuesto en el escritorio de la Tablet y se seleccionó una de las funciones de operación de la Cámara Acústica (modos temporal,

frecuencial o espectrograma). Con el botón REC, disponible en la barra de herramientas, se desplegó la pestaña “Recorder Control” para ajustar el canal de micrófonos a utilizar y su frecuencia de Sampleo. Se registró, en la pestaña, la distancia al foco emisor, la temperatura ambiental y el tiempo de grabación del evento sonoro. Inmediatamente, al desplegarse la pestaña “Recording”, se procedió a hacer click en el botón “Triggeer” y se espera que finalice de grabar, quedando el registro almacenado en la memoria de la Tablet.

El instrumental utilizado en terreno es mostrado en las siguientes tablas.

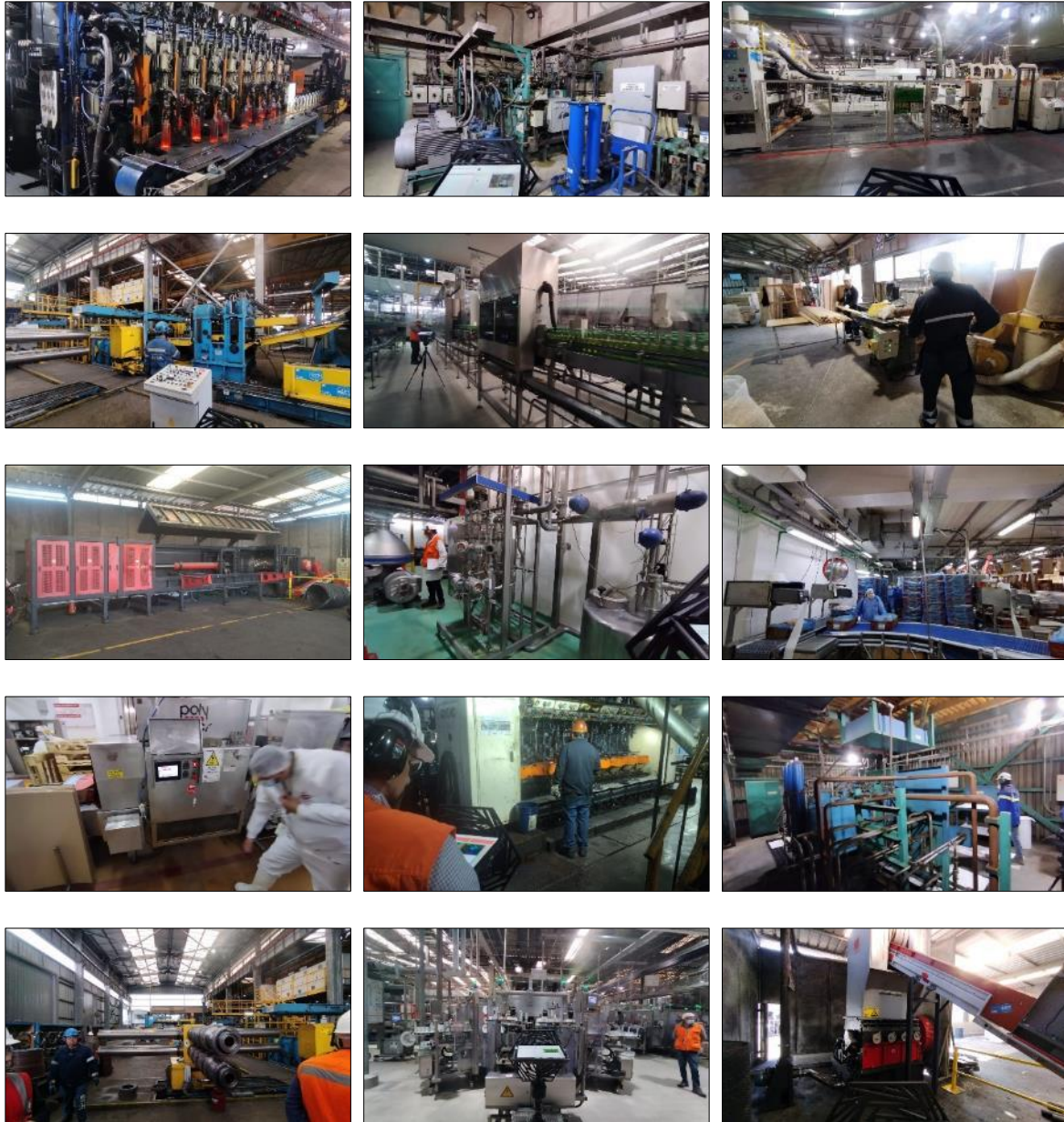
Tabla 5: Instrumental de terreno.

Instrumental	Marca	Modelo	N° de serie	Características
Cámara acústica portátil	gfai tech GmbH	Mikado 96_4	55842	Cámara acústica portátil de 96 micrófonos, adquire incorporado, mapeo acústico mediante técnica de beamforming, frecuencias recomendadas de mapeo entre 514 Hz y 24 kHz.
Surface	Microsoft	Surface Pro 6_1796_i7	15577392153	Computador portátil tipo tablet con procesador intel i7, 16 GB de RAM, SSD 1 TB para utilizar en conjunto con software controlador de cámara acústica NoiselImage Mobile.
Sistema de adquire de datos	gfai tech GmbH	mdcRec_72 1B	23966	Adquire de datos multicanal que permite grabar a altas tasas de muestreo.
Distanciómetr o Láser	Lase Distance Meter	CP-40S	---	Rango de medición de 0,2 a 40m, con precisión de +-2mm.
Trípode	---	---	---	---

Tabla 6: Software de análisis y postproceso.

Software	Versión	Descripción
NoiselImage Mobile	4.13	Versión de NoiselImage optimizada para mediciones en terreno con cámara acústica portátil.
NoiselImage Pro	4.13	Adquisición y procesamiento de señales y datos provenientes de cámara acústica. Realización de mapeo acústico basado en “beamforming” para identificación y análisis de fuentes sonoras. Algoritmos avanzados de análisis y procesamiento de señales

Figura 44: Expediente fotográfico, jornadas de medición con Cámara Acústica 2024.



6.4. Análisis de las Mediciones

Una vez finalizada cada jornada de medición, se procedió a descargar los archivos guardados en la tablet, los que, para cada punto de medición, contienen en particular información de audio, video y datos del evento sonoro.

Mediante el software NoiseImage Mobile, se procedió al análisis de los datos, el que se puede llevar a cabo en el modo temporal, frecuencial o espectrograma, según la complejidad del caso. Cuando un foco emisor es predominante, el modo temporal permite una caracterización inmediata de la fuente sonora; sin embargo, cuando el campo sonoro es difuso o existen múltiples focos sonoros de similar energía, puede ser necesario utilizar los modos frecuenciales y/o espectrograma en el análisis.

Al procesar los datos adquiridos con la Cámara Acústica mediante el software NoiseImage Mobile, se pudieron observar, de acuerdo con una escala de colores indicada en cada imagen acústica, los componentes y/o las máquinas más ruidosas de los sectores registrados. Cuando la procedencia del ruido es confusa, se pudo discriminar las fuentes presentes por medio de algoritmos avanzados, como “High dynamic range” o “clean SC”. Además, este proceso permitió obtener el espectro de frecuencias, líneas espectrales (FFT) y en bandas de tercio de octava, correspondientes a las fuentes que se pudieron identificar en cada imagen. Tener

la información espectral, permite conocer el comportamiento sonoro de las fuentes de mayor nivel de forma muy detallada. Por ejemplo, permite saber si existen peaks específicos resonando a ciertas frecuencias, si hay presencia de armónicos, ruidos con múltiples componentes frecuenciales, etc.

En las siguientes figuras se muestran los tres modos disponibles para el análisis de la información obtenida en terreno

Figura 45: Función modo temporal, Cámara Acústica Mikado.

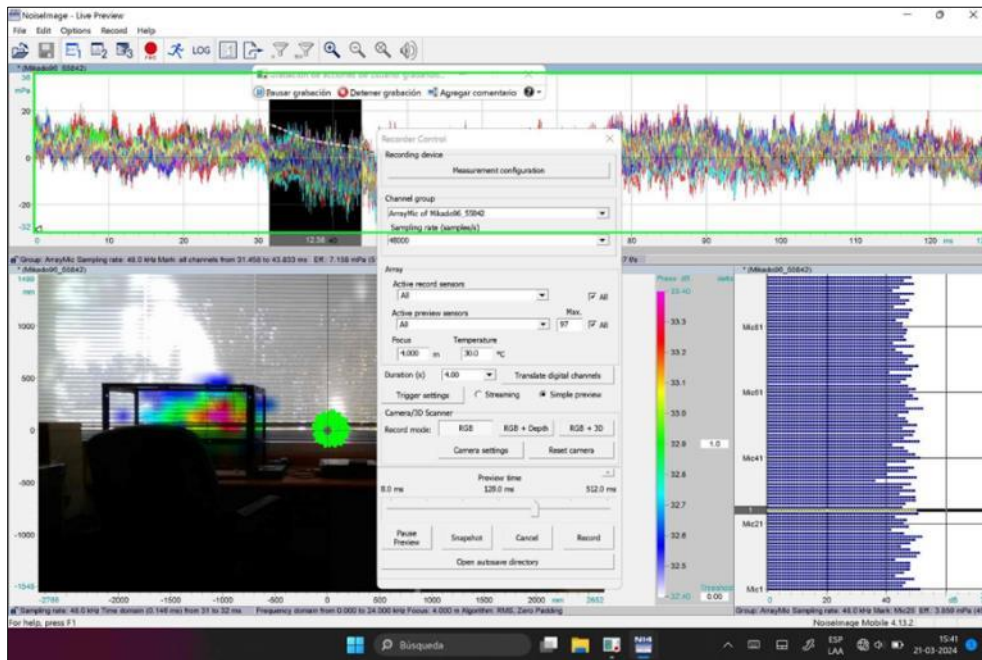


Figura 46: Función modo frecuencial, Cámara Acústica Mikado.

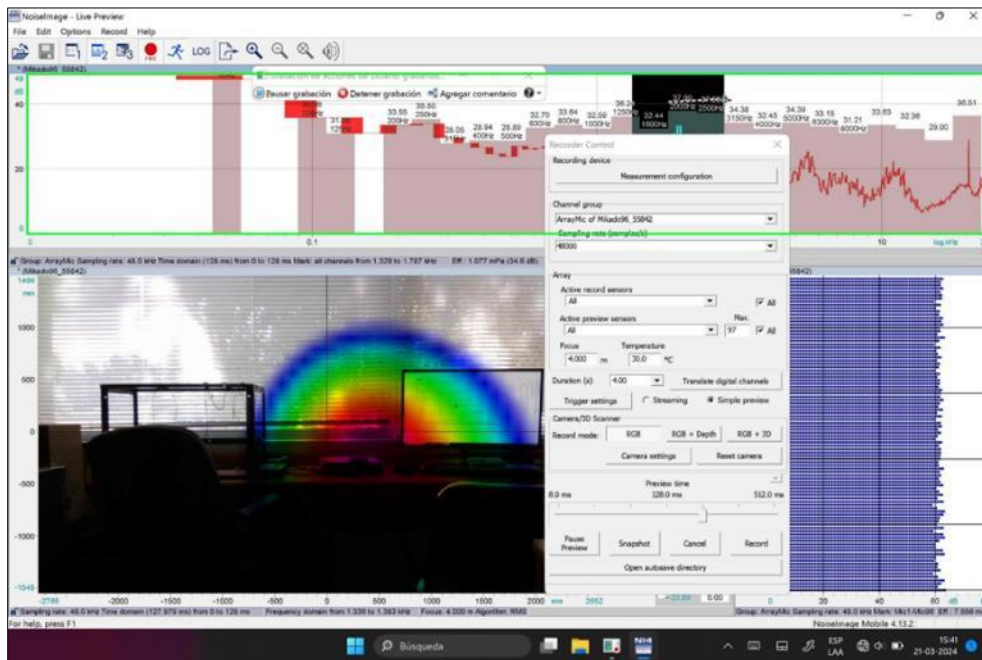
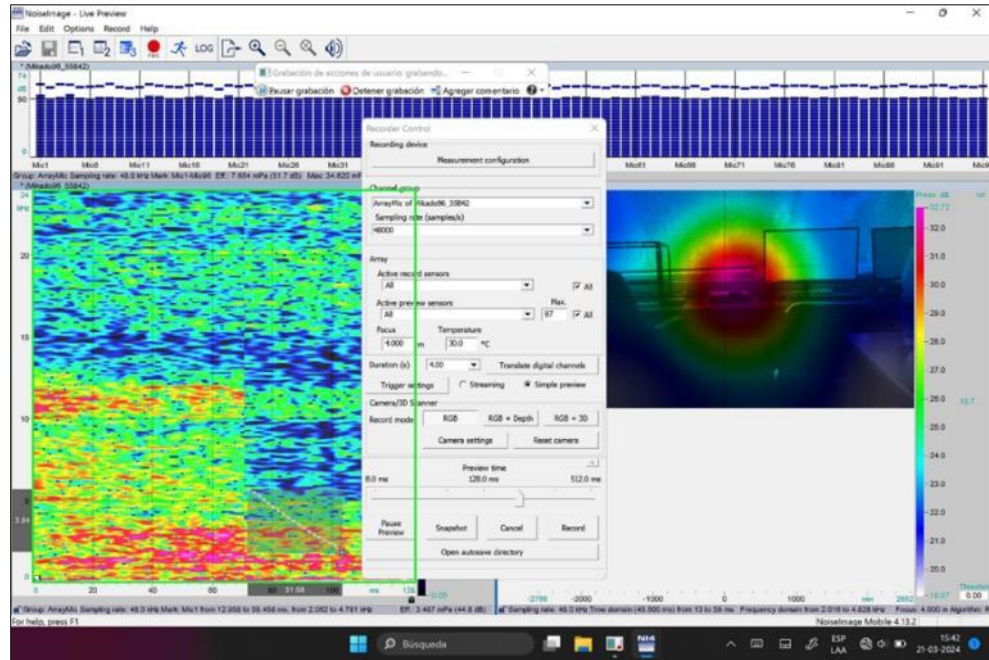
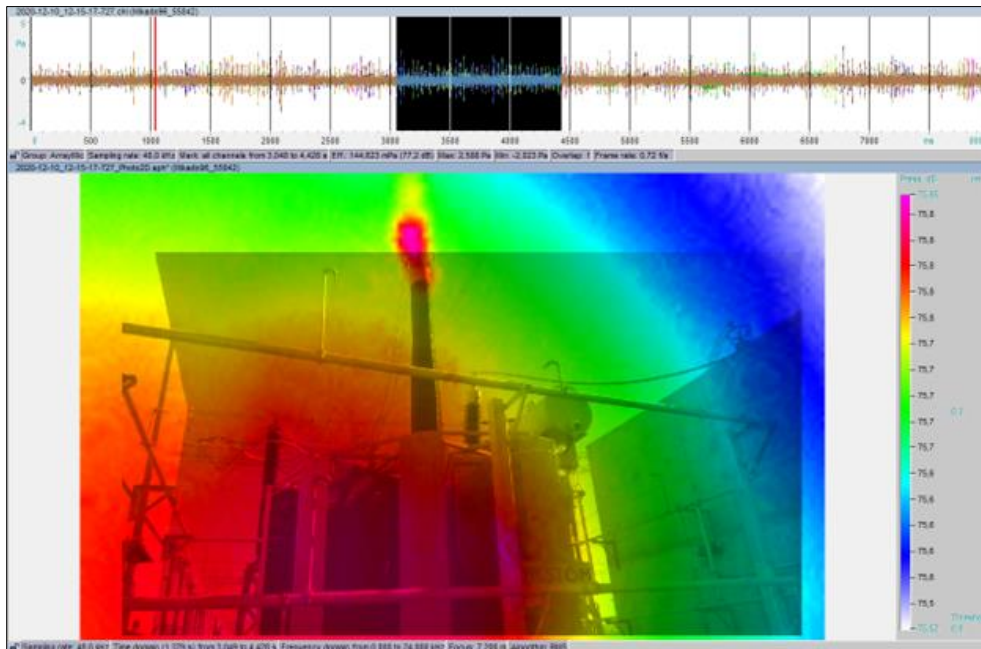


Figura 47: Función modo espectrograma, Cámara Acústica Mikado.



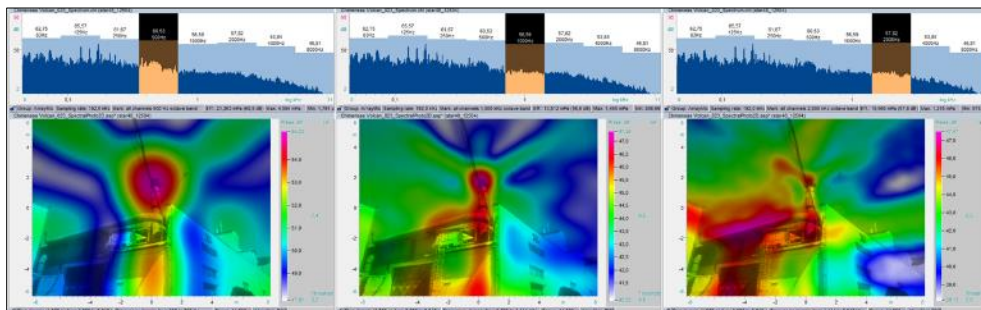
- Localización de fuentes en dominio del tiempo: El principal objetivo de la cámara acústica es permitir una localización efectiva de fuentes sonoras.

Figura 48: Localización de fuentes en dominio del tiempo.



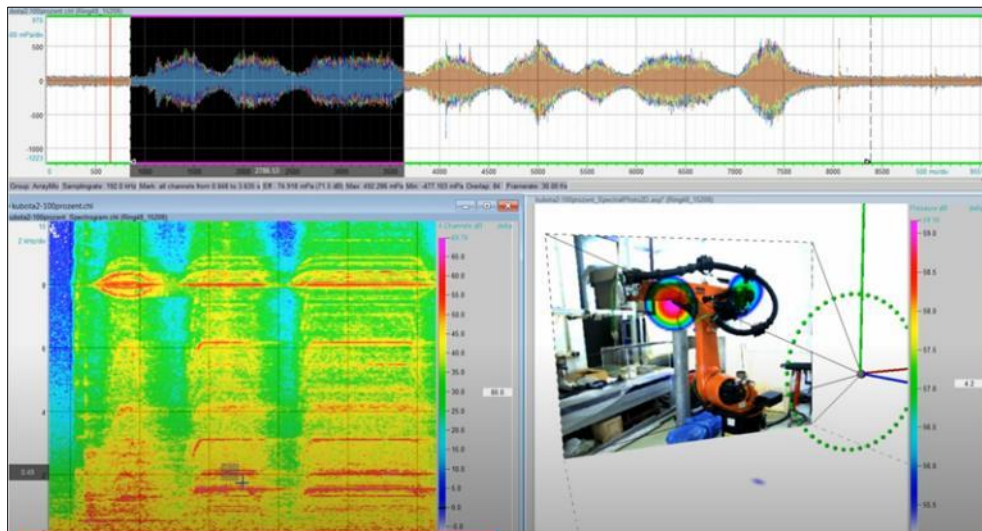
- Localización de fuentes en dominio de la frecuencia: Gracias a los diversos algoritmos, se permite realizar localización sonora por bandas de frecuencias, o incluso selecciones en el rango de frecuencia.

Figura 49: Localización de fuentes en dominio de la frecuencia.



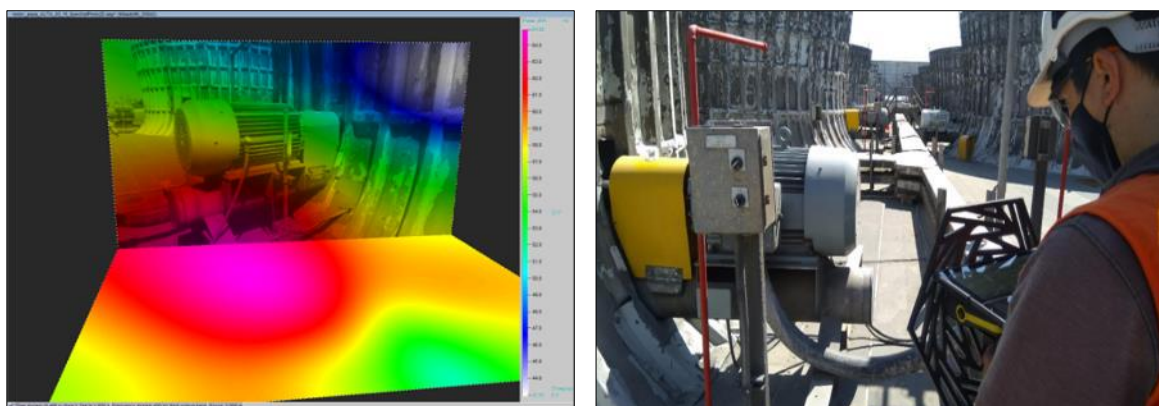
- Localización de fuentes con espectrograma: El espectrograma permite realizar selección en tiempo y frecuencia, lo cual conviene para observar eventos sonoros.

Figura 50: Localización de fuentes con espectrograma.



- Captura de profundidad de campo: Con la cámara RealSense se puede capturar la distancia focal (visualización de profundidad solo en Noiseimage Pro).

Figura 51: Captura de profundidad de campo.



7. RESULTADOS

7.1. De la elección Cámara Acústica

Al analizar la oferta disponible de cámaras acústicas en el mercado nacional se encuentran dos modelos disponibles, una marca SOUNDCAM desarrollada por CAE Software und Systems GmbH (perteneciente a la empresa dBA Ingeniería), la otra marca MIKADO desarrollada por gfai tech GmbH (perteneciente a la empresa iidav), cuyas características técnicas satisfacen los criterios básicos indicados anteriormente. Sus datos técnicos son mostradas en la siguiente Tabla.

Tabla 7: Especificaciones técnicas de las cámaras acústicas Mikado y SoundCam.

Parámetro	iidav –MIKADO ⁴¹	dBA – SOUNDCAM ⁴²
Dimensiones	45 x 35 x 15 cm	34 x 34 x 9,5 cm
Peso	3.4 kg incluyendo batería y pantalla	3.4 kg incluyendo batería y pantalla
Tamaño Pantalla	Microsoft Surface Desde 10"	7 "
Resolución Pantalla	Desde 1920 x 1280 Px	800 x 480 Px
Video cámara	Intel® RealSense™ Depth Camera D435	Digital
Resolución Cámara	1920 x 1080 (Full HD)	640 X 480 Px
Imágenes 3D	Sí	No
Micrófonos	96 MEMS	64 MEMS
Respuesta de frecuencia	10 Hz – 24 kHz	10 Hz – 24 kHz
	100 Hz – 5 kHz (< 0.5 dB)	No indicadas en EETT
	100 Hz – 11 kHz (< 3 dB)	No indicadas en EETT
Frecuencia de Muestreo	48 kS/s	48 kS/s
Máximo Nivel de Presión Sonora	121 dB at 10 % THD	120 dB
Nivel de Ruido base	30 dB(A)	No indicadas en EETT
Sensibilidad (1 kHz, 94 dB SPL)	-26 dBFS	No indicadas en EETT
Distancias recomendadas	> 0.3 m (beamforming)	No indicadas en EETT
	< 0.15 m (holografía acústica)	No indicadas en EETT
Rango de Niveles Mapas Acústicos	9 dB – 120 dB	33 dB -120 dB
Rango de frecuencias Mapas Acústicos	514 Hz – 24 kHz (beamforming)	Desde 800 Hz (beamforming)
	30 Hz – 2 kHz con campo cercano (Holografía acústica)	No indicadas en EETT
Rango Dinámico	15 dB – 27 dB, hasta 50 dB con algoritmos avanzados	No indicadas en EETT
Condiciones ambientales de operación	0 °C – 35 °C, hasta 80 % RH (operación manual)	-20 °C – 50 °C
	-10 °C – 45 °C, hasta 80 % RH (operación escritorio)	-30 °C – 60 °C
Autonomía de batería	3 horas	3,5 horas

⁴¹ gfai tech GmbH. Soundcam Mikado. Handheld Acoustic Camera for Troubleshooting Noise and Vibration Problems. Data Técnica.

⁴² CAE Software und Systems GmbH. Soundcam, product data. Data Técnica.

7.2. De las Mediciones en Terreno

Una vez realizadas las mediciones con Cámara Acústica en cada uno de los centros de trabajo seleccionados y recibido el informe técnico elaborado por la empresa iidav, se procedió a llevar a cabo reuniones de discusión de los resultados con cada uno de los Especialistas en Higiene Industrial de la ACHS encargados de atender a dichas empresas.

El objetivo de estas reuniones fue analizar los resultados obtenidos con la Cámara Acústica, revisar que cada informe técnico se ajuste en contenido y forma a lo efectivamente levantado en terreno, determinar cuál de los casos expuestos entrega información relevante para una gestión eficiente del trabajo desarrollado por los Especialistas en Higiene Industrial, validar las recomendaciones dadas por ACHS respecto del control de ruido, si corresponde, y la exposición sonora sobre los trabajadores, conocer qué tan relevante puede llegar a ser el uso de una Cámara Acústica como herramienta de medición y análisis del ruido; en suma llevar a cabo un análisis cualitativo de la herramienta utilizada para el reconocimiento de focos emisores de energía sonora.

A continuación se muestran los casos más relevantes y/o críticos en cada una de las empresas evaluadas. Las imágenes de mapeo acústico, cuyo principal objetivo es mostrar cómo se distribuye la energía en el ancho de banda, han sido exportados directamente del software NoiseImage Mobile.

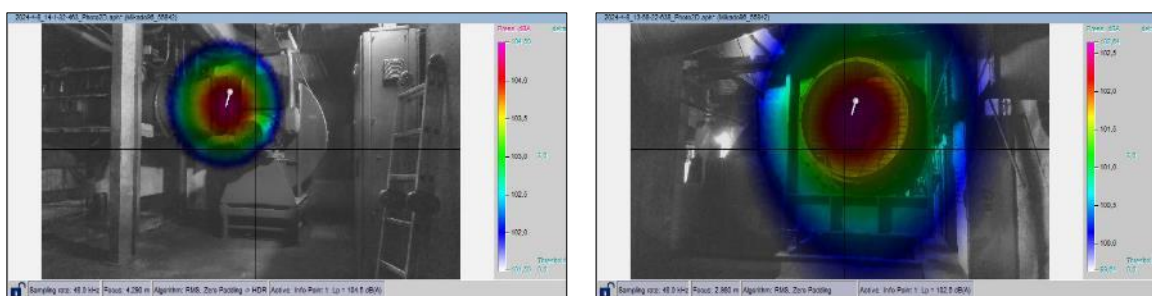
7.3. Muestra 1: Fabricación de botellas de vidrio

Las zonas medidas al interior de la planta fueron Piso -1 correspondiente a Ventiladores Centrífcugos, Piso 1 correspondiente a Máquinas Conformadoras de Botellas y Piso 2, correspondiente a Horno.

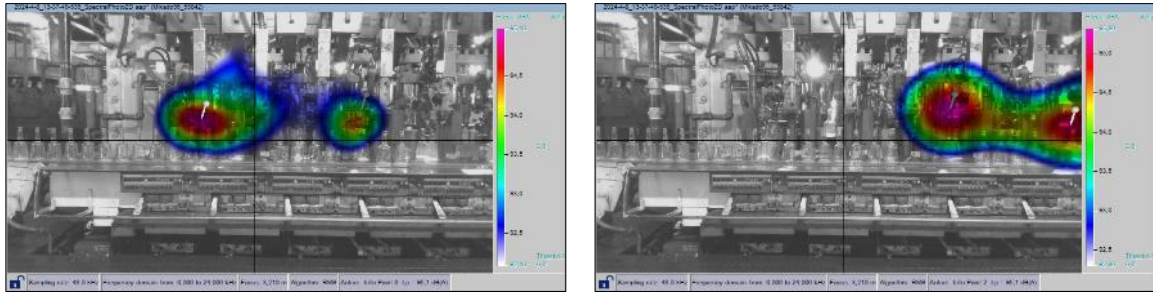
Figura 52: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 1.



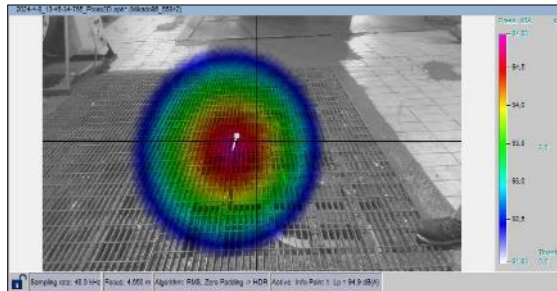
Figura 53: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) Extractores centrífugos. Nivel -1.



b) Despiche de aire máquina IS 13. Nivel 1.



c) Rejilla que comunica ubicada en Nivel 1, sobre extractores centrífugos ubicados en Nivel -1.

a) A través de las imágenes, el Especialista en Higiene Industrial pudo confirmar que el ingreso de aire es una importante fuente de ruido y, que otra fuente, no identificada con sonómetro (en la evaluación de exposición a ruido), corresponde al ruido generado por el aire en el cambio de sección del ducto de transporte.

b) Mediante las imágenes, el Especialista en Higiene Industrial pudo confirmar como las principales fuentes; las descargas de aire y el ruido mecánico de las máquinas conformadoras de las botellas.

c) Se visualiza como una fuente secundaria, no identificada por el Especialista en Higiene Industrial, la transmisión sonora a través de la rejilla del ruido producido en Nivel -1 por los sistemas de inyección de aire.

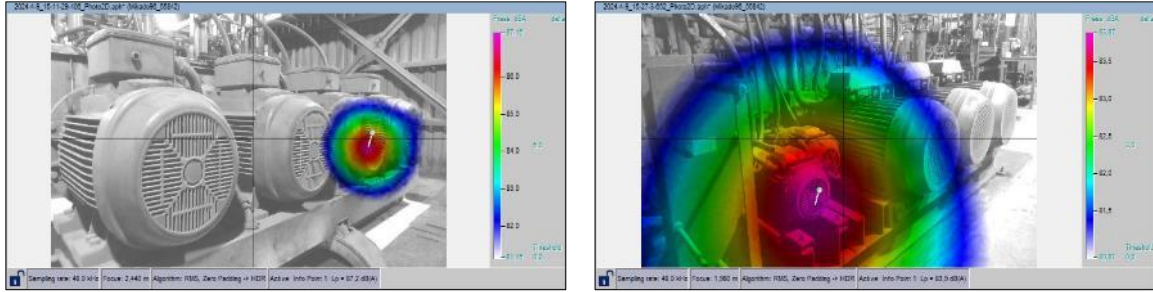
7.4. Muestra 2: Recicladora de acero

Las zonas medidas en la planta fueron el interior de la sala hidráulica principal, el sector bomba al interior de sala hidráulica y las fuentes vector bomba. En la siguiente figura se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

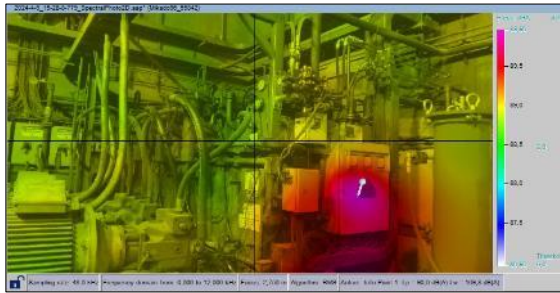
Figura 54: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 2.



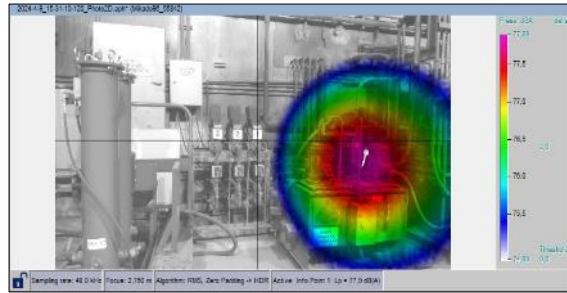
Figura 55: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



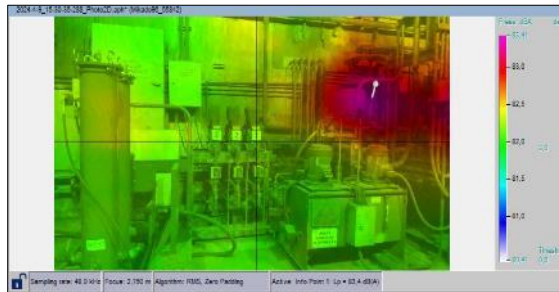
a) Motores Sala Hidráulica.



b) Gabinete Sala de Bombas Hidráulicas.



c) Unidad de Potencia Sala de Bombas Hidráulicas



d) Despiche de aire en tubería, Sala de Bombas Hidráulicas.

a) A través de las imágenes, el Especialista en Higiene Industrial pudo identificar claramente los motores que más aportan al campo sonoro existente en la Sala Hidráulica, situación que no había podido verificar con sonómetro en evaluación anterior.

b) y c) Mediante las imágenes, se puede confirmar las sospechas, de los equipos que generan los mayores niveles de ruido en Sala de Bombas Hidráulicas; por un lado un gabinete eléctrico y una Unidad de Potencia.

d) En la misma Sala de Bombas Hidráulicas, también se pudo identificar descarga de aire comprimido, que no es permanente, pero que contribuye de manera importante al campo sonoro al interior de este recinto.

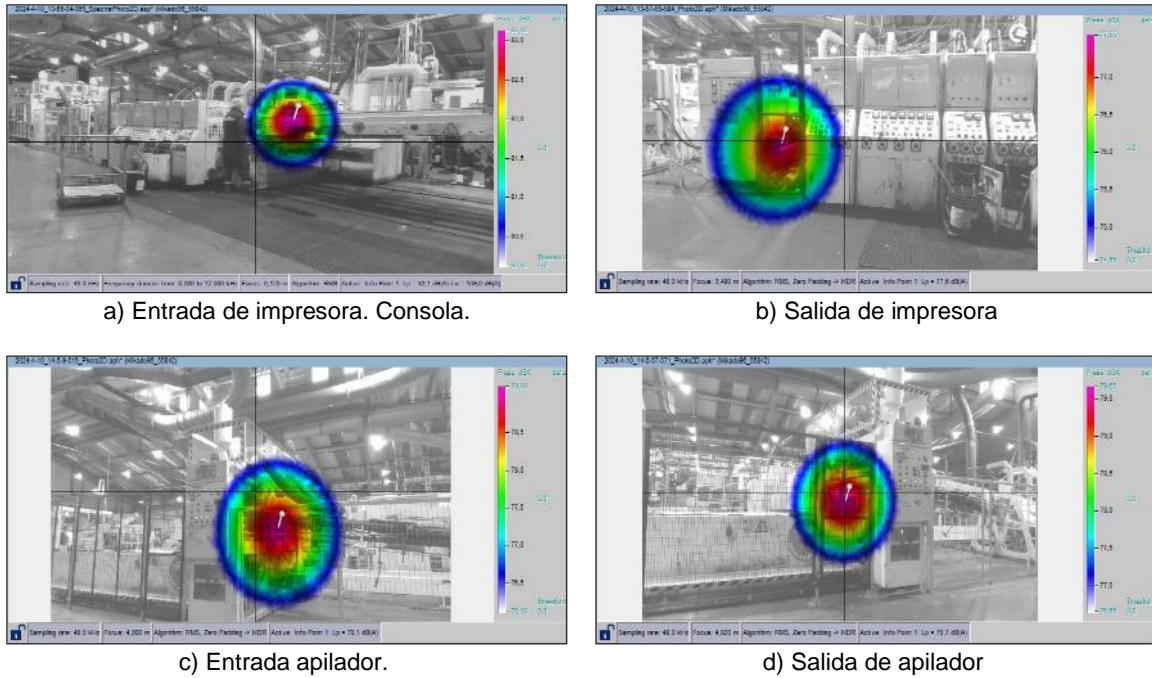
7.5. Muestra 3: Fabricación de envases de cartón

Las zonas medidas al interior de la planta fueron Estación de Bloqueo – Conversión BS - TCY. En la siguiente figura se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

Figura 56: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 3.



Figura 57: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) Esta imagen sirve para ratificar la importancia de controlar la descarga de aire a la entrada a la impresora, la cual, si bien había sido identificada por el Especialista en Higiene Industrial anteriormente, la empresa todavía no había implementado el control de esta fuente de ruido.

b) Esta imagen muestra el ruido generado por las correas a la salida del troquelador con las cajas (para eliminar recortes efectuados), fuentes identificadas anteriormente por el Especialista en Higiene Industrial, pero que ayudan en la gestión con la empresa para mostrar de manera visual la importancia de controlar dicha fuente.

c y d) Estas imágenes sirvieron para identificar de manera precisa las fuentes en esta etapa, ya que el Especialista en Higiene Industrial estimaba que el ruido provenía de los motores centrífugos, no obstante, al observar las imágenes se identificó que estas correspondían al flujo de aire que generan los ventiladores centrífugos para apilar las cajas que se van acumulando. El origen de los focos emisores de ruido no habían sido posible identificarlos de manera correcta, dado que existe una reja de seguridad que no permite un mayor acercamiento para su medición con el método tradicional (sonómetro).

7.6. Muestra 4: Metalúrgica

Las zonas medidas al interior de la planta correspondieron a Dimensionadora/Rebobinadora de 2–3 mm (Línea 1) y Dimensionadora/Rebobinadora de 0,75 mm (Línea 2). En las siguientes figuras se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

Figura 58: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 4.

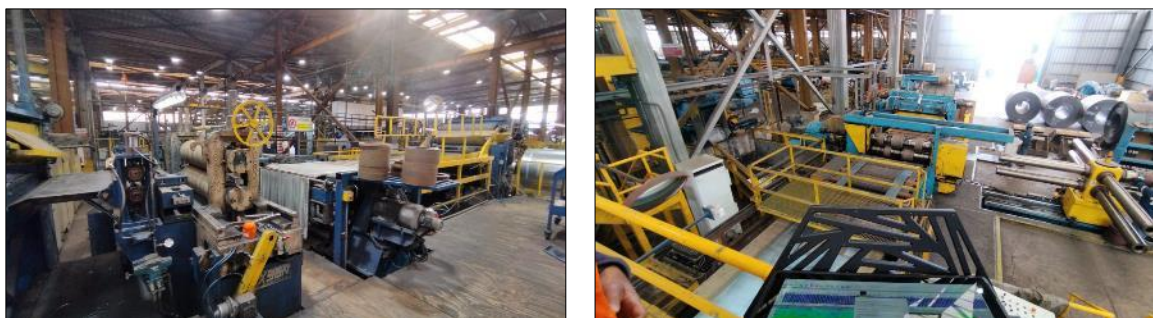
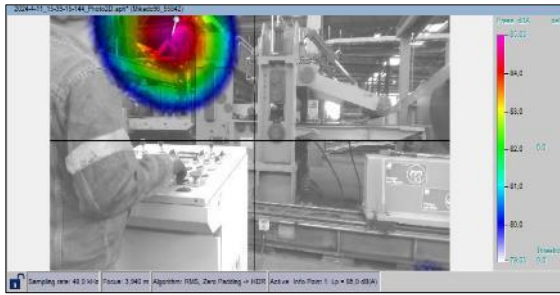
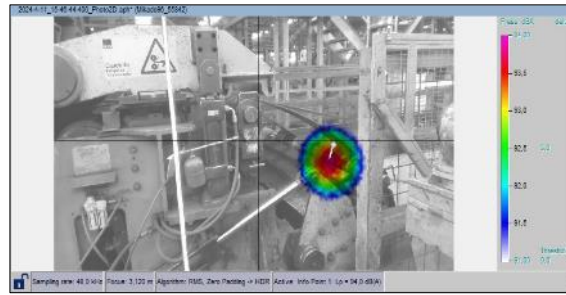


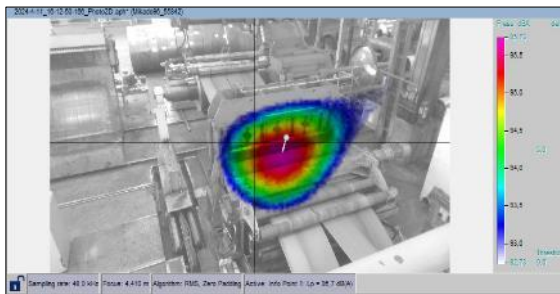
Figura 59: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



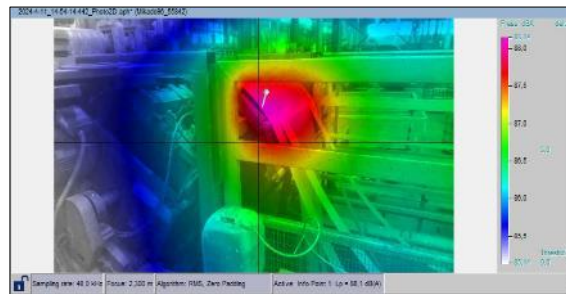
a) Motor. Sistema hidráulico de L1.



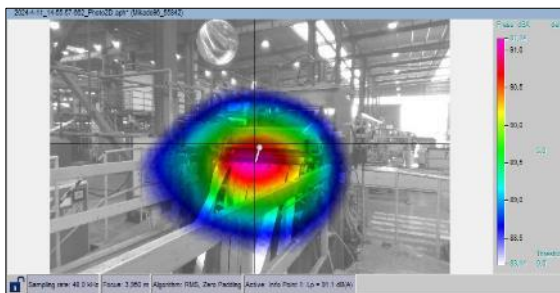
b) Rodillos/Cuchillas dimensionadoras de L1.



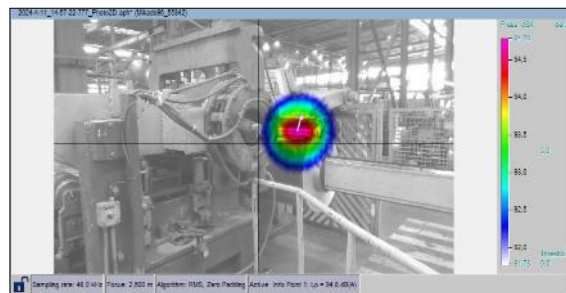
c) Rodillos del cuerpo tensor L1.



d) Rodillos del cuerpo tensor L1.



e) Rodillos del cuerpo tensor L2.



f) Mandril enrollador de flejes dimensionados L2.

a) Si bien el Especialista en Higiene Industrial ACHS, sabía que en esa zona existe un alto nivel de ruido, la imagen obtenida sirve para identificar de manera precisa la fuente de mayor nivel y con ello puede prescribir eficientemente su control.

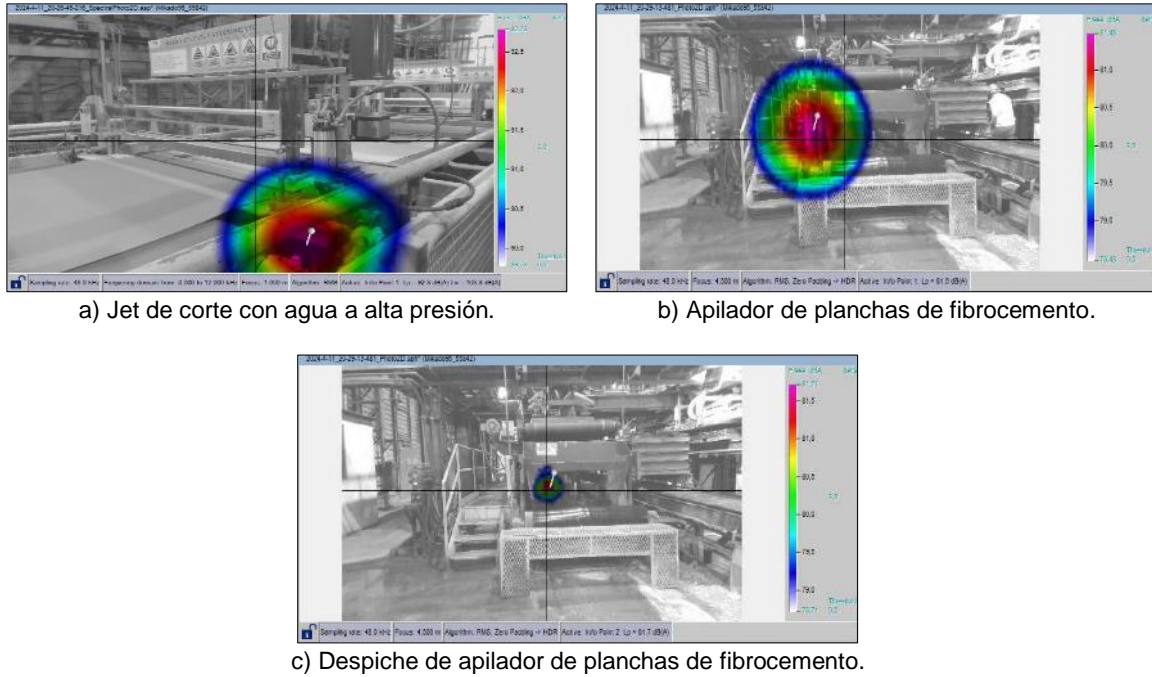
b), c) y d) Estas imágenes sirven para identificar/ratificar con evidencia objetiva, que el foco de ruido en esta zona está asociado a los rodillos de dimensionado, lo que no se pudo lograr mediante sonómetro, y con esto prescribir eficientemente las medidas de control en su gestión con la empresa.

e) y f) Las imágenes sirven para identificar/ratificar con evidencia objetiva lo mismo que en b), c) y d), pero en línea de menor escala.

7.7. Muestra 5: Elaboración de productos de fibrocemento

Las zonas medidas al interior de la planta fueron las correspondientes a la línea de producción de fibrocemento. No se permitió sacar fotografías al interior de la planta.

Figura 60: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) Esta imagen le sirve al Especialista en Higiene Industrial para ratificar y visualizar que es el Jet de Corte de las planchas de fibrocemento, la principal fuente de ruido del proceso, y así poder efectuar una mejor gestión con la empresa respecto al control de ruido.

b) y c) Estas imágenes ayudan al Especialista en Higiene Industrial a identificar de manera precisa la principal fuente de ruido en esta máquina, correspondiente a descargas de aire comprimido, las que son difíciles de medir mediante el método tradicional (sonómetro), ya que, producto de los riesgos de accidente por atrapamiento y el constante movimiento del material, no es factible que un Especialista en Higiene Industrial de la ACHS se acerque a la máquina para su identificación.

7.8. Muestra 6: Embotelladora

En la siguiente figura se presentan algunas imágenes referenciales de las zonas evaluadas.

Figura 61: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 6.

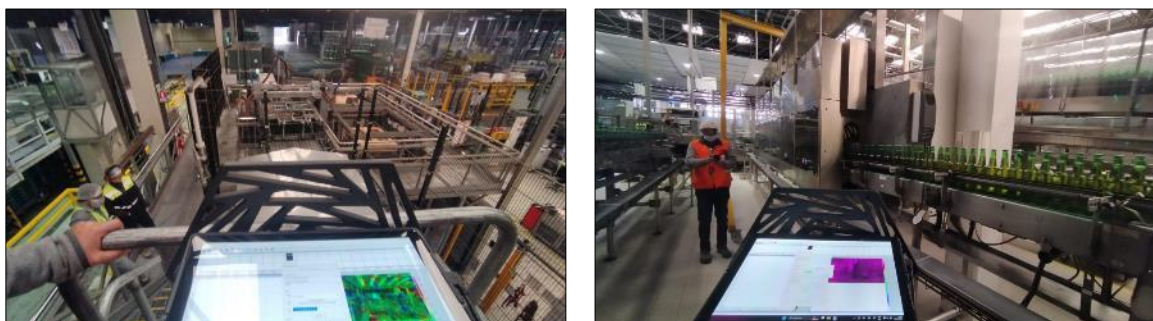
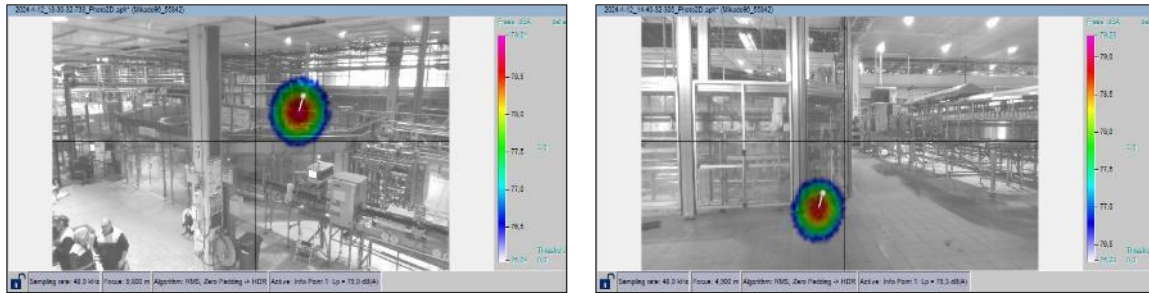
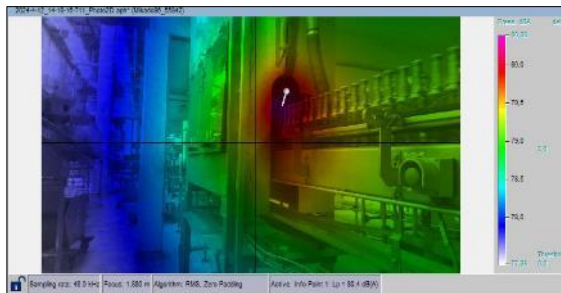


Figura 62: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.

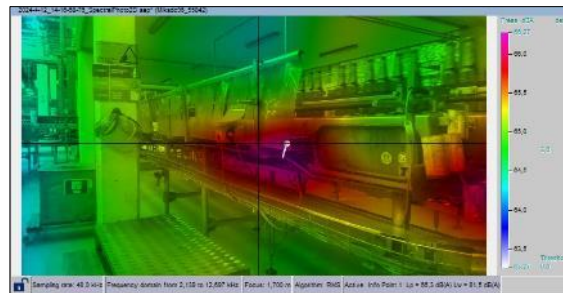


a) Fuga por arriba de cierre perimetral en área de envasado.

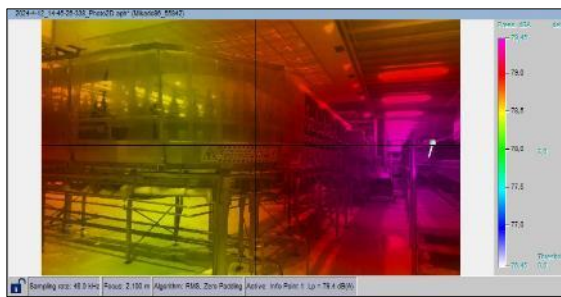
b) Fuga por debajo de cierre perimetral en área de envasado.



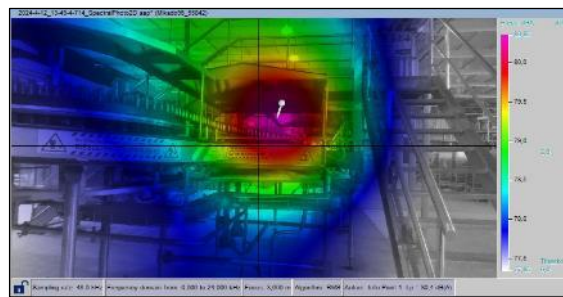
c) Fuga por salida en línea de secado.



d) Fuga por la línea de envasado.



e) Aporte de línea lateral.



f) Fuga costados de línea de envasado.

a) El Especialista en Higiene Industrial había identificado que la zona “lavado-llenado-tapado”, presentaba altos niveles de ruido, no obstante, la imagen sirve en su gestión para el control de ruido y, además especifica que, los niveles más altos ruido, se generan en solo una parte del proceso, pudiendo prescribir medidas más específicas.

b) Con esta imagen, el Especialista en Higiene Industrial logró identificar propagaciones que no había podido detectar, siendo de gran apoyo en la gestión con la empresa para evidenciar/mejorar la hermeticidad que deben de tener elementos como estas pantallas.

c) Esta imagen es de utilidad para el Especialista en Higiene Industrial, para gestionar con la empresa la reducción del área libre en los encerramientos o semi encerramientos, situación difícil de cuantificar con sonómetro.

d) Esta imagen le sirva al Especialista en Higiene Industrial para evidenciar que donde existen lamas se produce menos ruido, apoyando la prescripción de mejorar los encerramientos, con la idea de hacer túneles acústicos, situación que, por restricciones de acceso por riesgo de accidente laboral por explosión de botellas, el Especialista en Higiene Industrial no tuvo la oportunidad de intentar cuantificar mediante sonómetro

e) Esta imagen ayuda a identificar y a visualizar el aporte de líneas contiguas a la que se está evaluando, situación que con el sonómetro es difícil de identificar.

f) Esta imagen le sirve al Especialista en Higiene Industrial para mostrar el aumento

de los niveles de ruido por la instalación de teclas en la línea, ayudando, además, a ratificar la idea de instalar cerramientos laterales, situación que, por restricciones de acceso por riesgo de accidente laboral por explosión de botellas, el Especialista en Higiene Industrial no tuvo la oportunidad de intentar cuantificar mediante sonómetro.

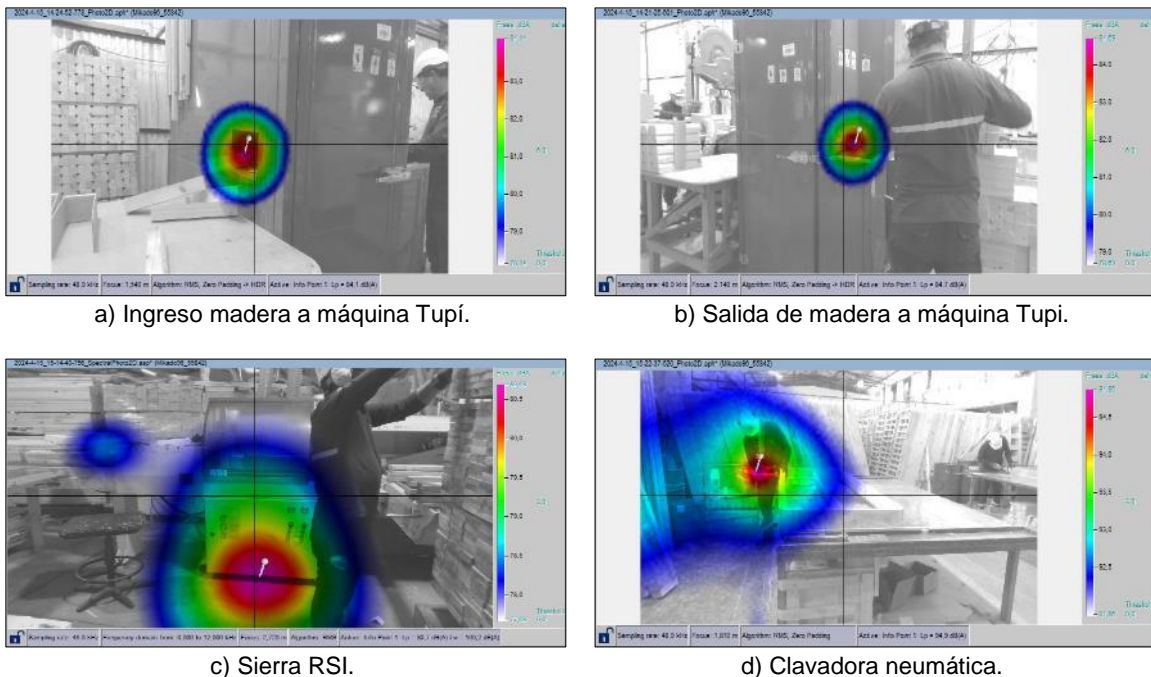
7.9. Muestra 7: Fábrica de muebles

Las mediciones al interior de la planta se realizaron en el Sector Carpintería. En la siguiente figura se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

Figura 63: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 7.



Figura 64: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) y b) Estas imágenes sirven para evidenciar que el encierro acústico implementado por la empresa en máquina Tupi, presenta una buena hermeticidad en sus uniones, no constante, se observan importantes fugas, identificadas por el Especialista en Higiene Industrial con sonómetro, en el ingreso y salida de los listones de madera, información que se valora para la gestión del control de ruido con la empresa.

c) Esta imagen le sirve al Especialista en Higiene Industrial para visualizar la transmisión de ruido que se presenta en la zona inferior de la cabina de corte y, en menor medida, en el vano de salida del producto, costado izquierdo, información que orienta al Especialista en Higiene Industrial a prescribir medidas de control más precisas.

d) Esta imagen ayuda al Especialista en Higiene Industrial para confirmar que el foco de la emisión de ruido corresponde exclusivamente a la Clavadora Neumática, no siendo importante la radiación al mesón.

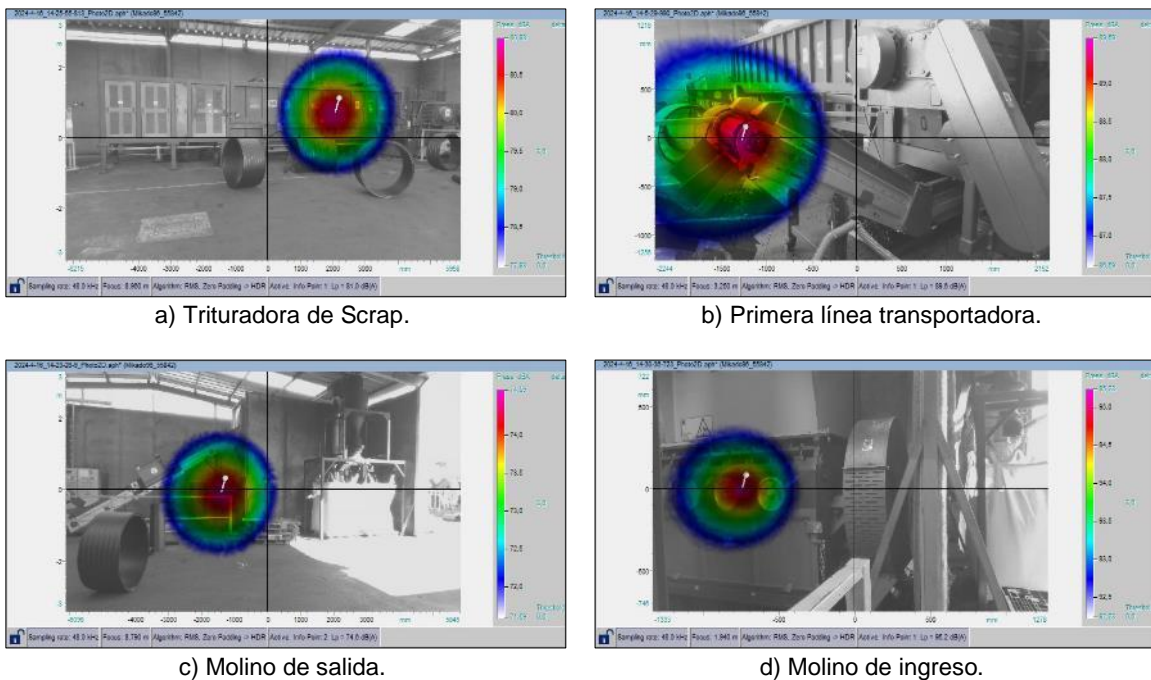
7.10. Muestra 8: Fabricación de tubos de PVC

Las mediciones al interior de la planta se realizaron en Galpón Molino. En la siguiente figura se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

Figura 65: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 8.



Figura 66: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) La imagen sirve para identificar fuga o falta de estanqueidad en puerta y cerraduras de trituradora, situación que no había sido posible detectarla por Especialista en Higiene Industrial mediante sonómetro.

b) La imagen sirve para identificar las emisiones sonoras generadas en la parte superior del equipo ventilador y el sistema mecánico en las correas transportadoras, fuentes que el Especialista en Higiene Industrial no había detectado anteriormente en la empresa.

c) Esta imagen sirve al Especialista en Higiene Industrial para identificar las fugas o falta de estanqueidad en puerta y cerraduras de molino, lo cual no había sido posible detectarlo mediante sonómetro.

d) Esta imagen sirve al Especialista en Higiene Industrial para corroborar/visualizar, que las principales emisiones sonoras del molino provienen de su zona inferior, donde se ubica la puerta de acceso para su mantención.

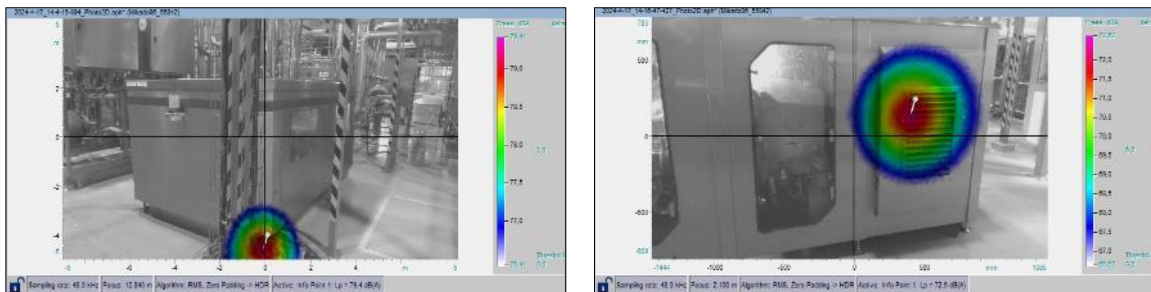
7.11. Muestra 9: Elaboración de productos lácteos

Las mediciones al interior de la planta se realizaron en las zonas de Esterilización y Pasteurización. En la siguiente figura se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

Figura 67: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 9.

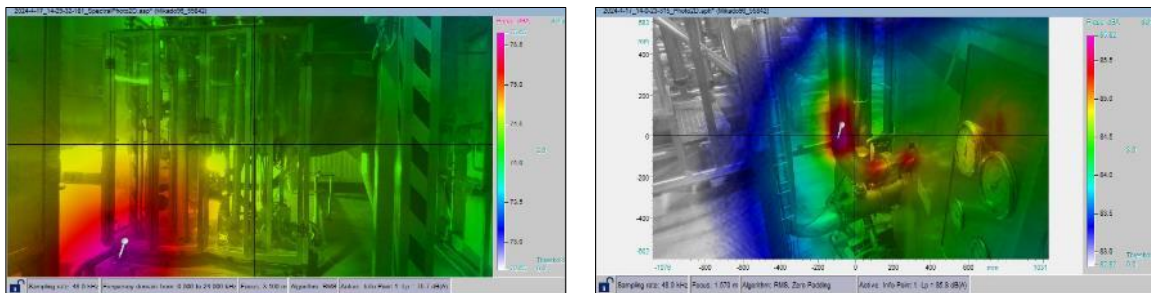


Figura 68: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) Cabinas equipo homogeneizador. Área esterilización.

b) Cabinas equipo homogeneizador. Área esterilización.



c) Tuberías en sistema de esterilización.

d) Tuberías en sistema de esterilización.

a) y b) A través de estas imágenes, se pudo identificar las fugas o faltas de estanqueidades en algunas partes de las cabinas de los equipos, como lo es la parte inferior y celosías. Dicha identificación, no pudo ser posible con la utilización de un sonómetro.

c) Esta imagen, permite identificar transmisión sonora por la parte baja de pantallas y sirve como apoyo en la gestión del control de ruido con la empresa. Dicha identificación, no pudo ser posible con la utilización de un sonómetro.

d) Esta imagen, permite identificar el ruido producto de los flujos que circulan por la gran cantidad de tuberías que presenta la planta y sirve como apoyo en la gestión del control de ruido con la empresa. Dicha identificación, no pudo ser posible con la utilización de un sonómetro.

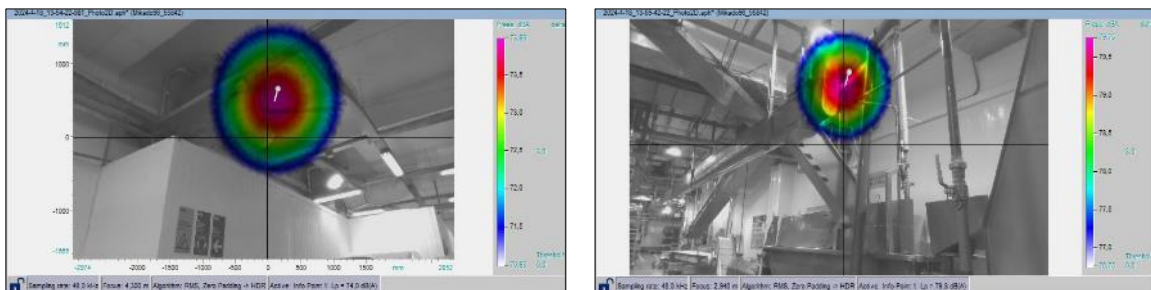
7.12. Muestra 10: Industria alimentaria

Las mediciones al interior de la planta se realizaron en la zona de Producción. En la siguiente figura se presentan algunas imágenes de las zonas evaluadas.

Figura 69: Fotos de zonas medidas al interior de planta, Muestra 10.

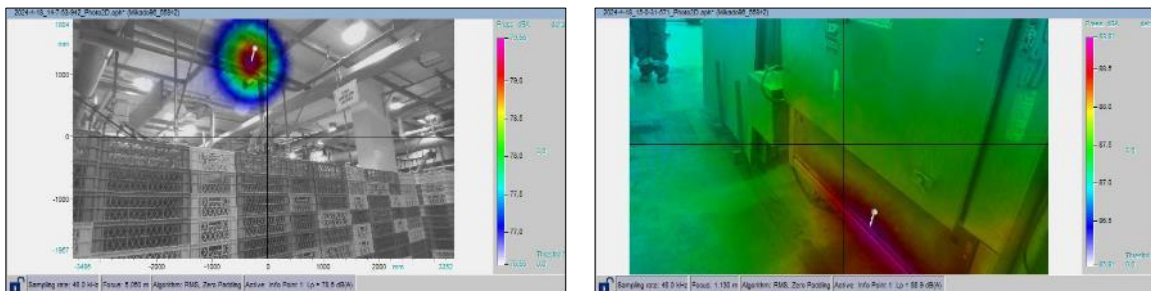


Figura 70: Imágenes acústicas seleccionadas por el Especialista en Higiene Industrial.



a) Equipo inyector de aire.

b) Tuberías de agua y aire.



c) Llave de paso en el techo.

d) Despiche, parte inferior de maquinaria.

a) Esta fuente había sido identificada por el Especialista en Higiene Industrial, no obstante, se solicita la imagen como apoyo en la gestión del control de ruido con la empresa.

b) En esta imagen, si bien el Especialista en Higiene Industrial había identificado la zona donde se produce el ruido, esta sirve para precisar en qué tramo se generan los mayores niveles de ruido.

c) Si bien el Especialista en Higiene Industrial había medido en esta área altos niveles de ruido de fondo, no tenía claridad de dónde provenía el ruido, situación que se soluciona con la imagen obtenida.

d) Si bien esta fuga de ruido estaba identificada por el Especialista en Higiene Industrial, la imagen sirve como apoyo en la gestión del control de ruido con la empresa.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. De cómo se comportó la cámara

La cámara acústica Mikado presenta ventajas técnicas en comparación con la cámara acústica SoundCam, especialmente en los siguientes aspectos:

- Arreglo de micrófonos más numeroso: La presencia de un mayor número de micrófonos en la configuración de Mikado, respaldada por la tecnología de beamforming, permite una captura de audio más direccional, precisa y libre de interferencias. Esto se traduce en una mejora sustancial en la calidad general del sonido capturado, brindando una mayor precisión en la localización de las fuentes de ruido.
- Respuesta en frecuencia: Mikado genera mapas acústicos con un ancho de banda de frecuencia más amplio (514 Hz - 24 kHz), en comparación a SoundCam, cuyo rango de frecuencia es menor (800 Hz - 24 kHz). Esta diferencia resalta la capacidad de Mikado para capturar detalles acústicos en un espectro más amplio.
- Resolución de la cámara y pantalla: Mikado cuenta con una cámara de video de mayor resolución en comparación con SoundCam. Además, la cámara de video provista por Mikado incorpora tecnología de profundidad, lo que posibilita trabajar con objetos en 3D si fuese necesario. En cuanto a la pantalla para la visualización en terreno de los datos capturados, Mikado ofrece la flexibilidad de trabajar con distintos modelos de Microsoft Surface de diversos tamaños. En contraste, SoundCam presenta una pantalla fija de solo 7" y con una resolución inferior a las opciones que actualmente proporciona Microsoft Surface.

En virtud de los aspectos mencionados, la cámara acústica Mikado exhibe un rendimiento técnico superior en términos de precisión, respuesta de frecuencia y resolución para la visualización de resultados, transformándose en la mejor alternativa para cubrir los objetivos del presente proyecto.

8.2. De las mediciones en terreno

Como se indicó en el marco teórico desarrollado en el Capítulo 5 de este informe, la técnica de beamforming se puede trabajar en el dominio de la frecuencia o del tiempo. Ambos dominios tienen ventajas y desventajas que son determinantes al momento de analizar una fuente. El dominio frecuencial disminuye el tiempo de procesamiento a través de la Transformada de Fourier; mientras que el dominio del tiempo tiene la particularidad de estudiar señales con un espectro en frecuencias amplio.

De las imágenes acústicas seleccionadas por los Especialistas en Higiene Industrial: 35 imágenes correspondieron a un análisis en el dominio del tiempo y 9 imágenes a un análisis en el dominio de la frecuencia. En 23 imágenes acústicas fue posible detectar fuentes sonoras que los Especialistas en Higiene Industrial no habían podido identificar anteriormente y con 19 imágenes acústicas los Especialistas en Higiene Industrial pudieron ratificar y/o evidenciar fuentes sonoras previamente identificadas.

En las siguientes figuras se muestra la información que entrega el software NoiseImage Mobile para un análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

Figura 71: Análisis en el dominio del tiempo.

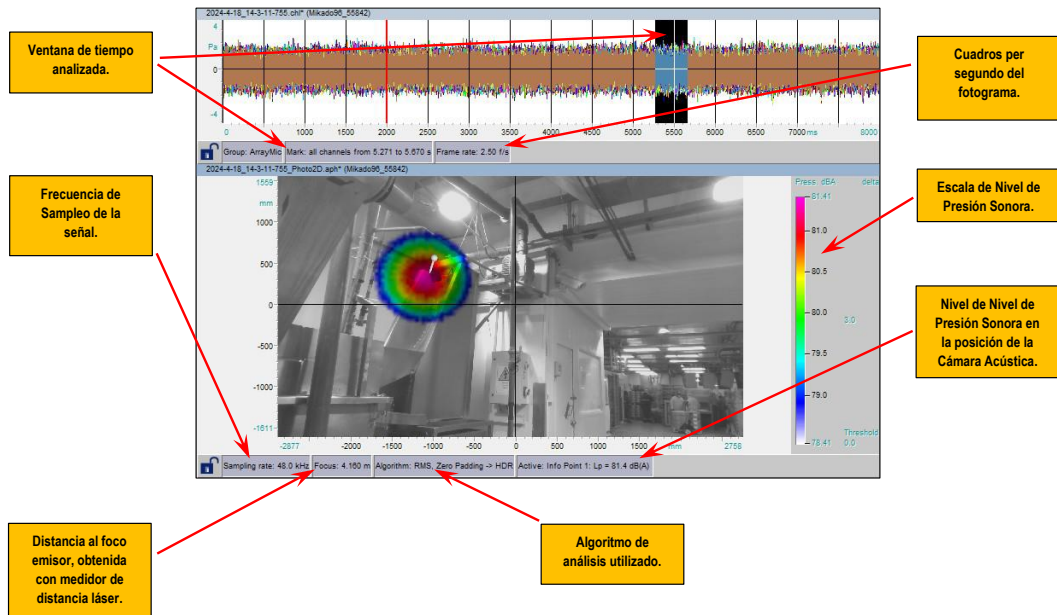
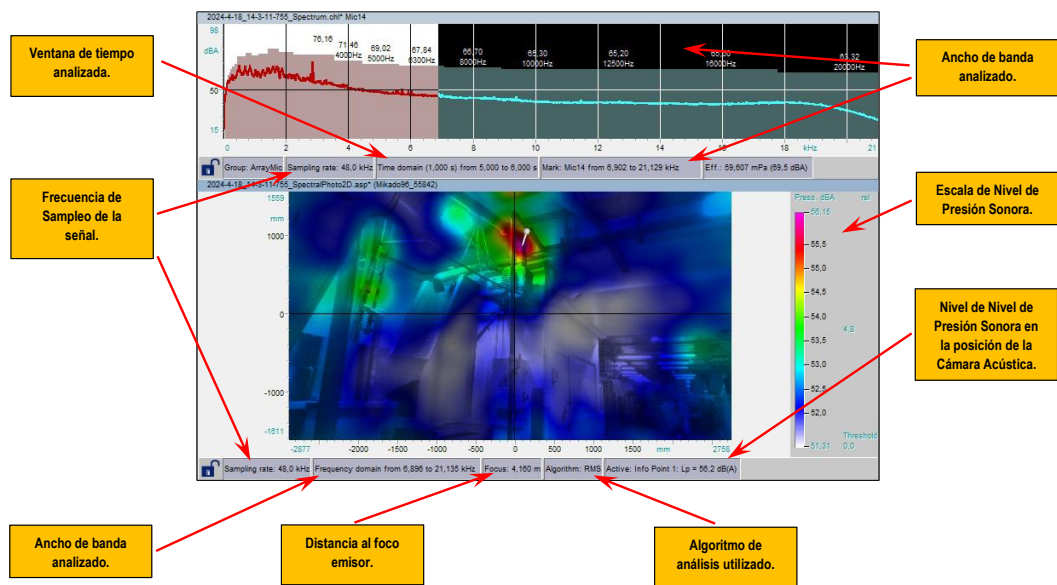


Figura 72: Análisis en el dominio de la frecuencia.



Respeto de las preguntas planteadas para esta investigación:

- ¿Cuáles son las ventajas o desventajas de Beamforming para el ámbito ocupacional?
- ¿Es Beamforming la metodología apropiada para la identificación de fuentes de ruido en ambientes industriales complejos?

De acuerdo a lo indicado por los Especialistas en Higiene Industrial de la ACHS en las reuniones de trabajo y análisis cualitativo, con el uso de una Cámara Acústica se logra la identificación de focos sonoros y su caracterización en magnitud y en espectro de frecuencia, en especial en aquellos ambientes donde existe una gran variedad de maquinaria operando simultáneamente y que por su naturaleza no es posible detenerlas para analizar una en particular.

Permite llevar a cabo mediciones a una mayor distancia del foco emisor, facilitando su labor en aquellas áreas restringidas o donde existan riesgos de accidentes laborales para el profesional, lo que no es posible mediante el método tradicional (sonómetro). Posibilita detectar focos emisores provenientes de fuentes de ruido de tipo puntuales, lineales y superficiales, detectar fugas de ruido en encierro de

máquinas y soluciones acústicas implementadas para el control de ruido, como en puertas, ventanas, sellos, celosías, etc.

Es una herramienta que permite validar las prescripciones dadas por los Especialistas en Higiene Industrial de la ACHS para el control de ruido, en el caso de las ya ejecutadas posibilita la evaluación de su eficiencia, en el caso de aquellas no implementadas, reafirmar la importancia de su ejecución. Con una Cámara Acústica un usuario no experto en ruido pueda visualizar las emisiones sonoras provenientes de un foco emisor a través de una foto y una escala de colores graduada en decibeles consiguiendo una fácil lectura del fenómeno de radiación sonora. Posibilita un análisis de datos sencillo, ya que una vez que se han adquirido los datos en terreno el post proceso de la información, con un poco de entrenamiento, es rápido e intuitivo al disponer de los softwares adecuados. Permite visualizar toda la información en una sola ventana.

Es una metodología de medición cómoda para su implementación en terreno, el armado del sistema es sencillo y permite la grabación de audio y video; una vez instalado el equipo en la cercanía de la fuente que se desea analizar la adquisición de datos es rápida, toma aproximadamente tres (3) minutos.

9. RECOMENDACIONES PARA SISTEMA DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO

- i. Se recomienda el uso de la Cámara Acústica y la técnica de Beamforming, pues permite identificar focos de emisión sonora, posibilitando su caracterización en magnitud (dBA) y frecuencia (Hz).
- ii. Se recomienda el uso de la Cámara Acústica y la técnica de Beamforming, pues es una herramienta que permite evaluar emisiones sonoras en aquellos ambientes donde existe una gran variedad de maquinaria operando simultáneamente y que, por su naturaleza no es posible detenerlas para analizar una en particular.
- iii. Se recomienda el uso de la Cámara Acústica, pues con ella es posible realizar mediciones de ruido a una mayor distancia del foco emisor, facilitando la labor en aquellas áreas restringidas o donde existan riesgos de accidentes laborales para el profesional de terreno, lo que no es posible mediante el método tradicional (sonómetro).
- iv. Se recomienda el uso de la Cámara Acústica y la técnica de Beamforming, pues permite identificar focos emisores provenientes de fuentes de ruido de tipo puntuales, lineales y superficiales.
- v. Se recomienda el uso de la Cámara Acústica y la técnica de Beamforming, pues con ella es posible detectar fugas de ruido en encierros de máquinas y/o soluciones acústicas implementadas para el control de ruido, como las provenientes de puertas, ventanas, sellos, celosías, etc.
- vi. Se recomienda el uso de la Cámara Acústica y la técnica de Beamforming, pues con ella es posible validar y justificar las prescripciones entregadas por los Especialistas en Higiene Industrial para el control de ruido. En el caso de las prescripciones ejecutadas, permite la evaluación de su eficiencia y en el caso de las no implementadas, reafirmar la importancia de su ejecución.
- vii. Se recomienda el uso de la técnica de Beamforming, pues apoya al Especialista en Higiene Industrial en su gestión preventiva con la empresa, dado que permite visualizar las emisiones sonoras a través de una imagen y una escala de colores graduada en decibeles.
- viii. Se recomienda el uso de una Cámara Acústica portátil (como la modelo Mikado 96_4), ya que es un equipo de medición cómodo para su uso en terreno. Todo el sistema es transportado en una maleta, su armado es sencillo y permite la grabación de audio y video. Una vez instalado el equipo en la cercanía de la fuente que se desea analizar, la adquisición de datos toma un tiempo reducido.
- ix. Se recomienda el uso de la técnica de Beamforming, ya que permite un análisis de datos sencillo. Una vez que se han adquirido los datos en terreno, el post proceso de la información, con una capacitación técnica adicional, es rápido e intuitivo al disponer de los softwares adecuados.

10. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo de innovación se ha desarrollado una metodología, a través del uso de técnicas de Beamforming, para la identificación precisa de focos de emisión sonora proveniente de diversas maquinarias inmersas en ambientes industriales acústicamente complejos.

Tradicionalmente la manera de identificar, con un grado mediano de fiabilidad, implica la detención de partes de maquinarias, procesos o actividades colindantes para efectuar mediciones específicas con un equipo sonómetro y así cuantificar, de manera medianamente precisa, el aporte de ruido de cada una de ellas. Dado que la detención de procesos es difícil de concretar y se dispone de un tiempo acotado para que el Especialista en Higiene Industrial pueda realizar el levantamiento de la información, la metodología de Beamforming propuesta mediante el uso de una Cámara Acústica, permite detectar la ubicación de focos sonoros de manera rápida y precisa, sin tener que interferir en la operación de la empresa.

Para llegar a este punto, se estudiaron los conceptos teóricos que establecen los principios básicos de la técnica de Beamforming, revisando estudios recientes a nivel nacional y mundial, así como sus eventuales aplicaciones en la industria (ver Capítulo 5); para luego, una vez seleccionado un proveedor nacional que pueda arrendar la tecnología requerida en función de su disponibilidad, características de funcionamiento, capacidad de análisis de datos y competencias, proceder a desarrollar pruebas en terreno aplicando la técnica seleccionada con el fin de desarrollar una guía metodológica para el uso de dicha tecnología (ver Capítulo 6).

A partir del análisis de las mediciones llevadas a cabo en terreno, ejercicio desarrollado en conjunto por el equipo innovador y los Especialistas en Higiene Industrial de ACHS, se pueden establecer conclusiones respecto de la experiencia implementada y la utilidad de la Cámara Acústica para la identificación y caracterización de fuentes sonoras en ambientes industriales.

En conclusión:

- a. La Cámara Acústica y la técnica de Beamforming permiten identificar focos de emisión sonora, posibilitando su caracterización en magnitud (dBA) y frecuencia (Hz).
- b. La Cámara Acústica y la técnica de Beamforming permiten evaluar emisiones sonoras en aquellos ambientes donde existe una gran variedad de maquinaria operando simultáneamente y que por su naturaleza, no es posible detenerlas para analizar una en particular.
- c. Con una Cámara Acústica es posible realizar mediciones de ruido a una mayor distancia del foco emisor, facilitando la labor en aquellas áreas restringidas o donde existan riesgos de accidentes laborales para el profesional de terreno, lo que no es posible mediante el método tradicional (sonómetro).
- d. La Cámara Acústica y la técnica de Beamforming permiten identificar focos emisores provenientes de fuentes de ruido de tipo puntuales, lineales y superficiales.
- e. Con una Cámara Acústica y la técnica de Beamforming es posible detectar fugas de ruido en encierros de máquinas y/o soluciones acústicas implementadas para el control de ruido, como las provenientes de puertas, ventanas, sellos, celosías, etc.

- f. Con una Cámara Acústica y la técnica de Beamforming es posible validar y justificar las prescripciones entregadas por los Especialistas en Higiene Industrial para el control de ruido. En el caso de las prescripciones ejecutadas, permite la evaluación de su eficiencia y en el caso de las no implementadas, reafirmar la importancia de su ejecución.
- g. La técnica de Beamforming apoya al Especialista en Higiene Industrial en su gestión preventiva con la empresa, dado que permite visualizar las emisiones sonoras a través de una imagen y una escala de colores graduada en decibeles.
- h. La Cámara Acústica portátil (como la modelo Mikado 96_4) es un equipo de medición cómodo para su uso en terreno. Todo el sistema es transportado en una maleta, su armado es sencillo y permite la grabación de audio y video. Una vez instalado el equipo en la cercanía de la fuente que se desea analizar, la adquisición de datos toma un tiempo reducido.
- i. La técnica de Beamforming permite un análisis de datos sencillo. Una vez que se han adquirido los datos en terreno, el post proceso de la información, con una capacitación técnica adicional, es rápido e intuitivo al disponer de los softwares adecuados.

11. CONSIDERACIONES

a. Es importante tener en cuenta que el rendimiento, precisión y funcionamiento de una cámara acústica pueden verse afectados por las condiciones ambientales en las que se utiliza. El rango de operación de la cámara acústica está limitado por factores como temperatura, humedad y nivel de ruido ambiental.

- **Temperatura:** Las cámaras acústicas están diseñadas para operar dentro de un rango específico de temperaturas. Fuera de este rango, los sensores pueden no funcionar correctamente, lo que podría llevar a mediciones inexactas o incluso a fallas en el equipo. Para el caso de la cámara acústica utilizada en este proyecto, el límite superior de uso es de 35 °C, considerando que esta temperatura se puede dar solo por las condiciones ambientales reinantes en la región metropolitana durante el período estival.
- **Humedad:** La alta humedad puede afectar la sensibilidad de los micrófonos y otros componentes electrónicos de la cámara, lo que podría comprometer la calidad de las grabaciones y las mediciones acústicas.
- **Ruido ambiental:** Para obtener resultados precisos, es esencial que el ruido de fondo esté dentro de los límites aceptables para la operación de la cámara. Un entorno con demasiado ruido de fondo puede interferir con la capacidad de la cámara para identificar y localizar fuentes sonoras con precisión, situación que se produce en casos puntuales.

Dado que el rendimiento de la cámara acústica puede variar en función de estas y otras condiciones ambientales, es fundamental realizar evaluaciones previas y, si es necesario, ajustar las configuraciones o elegir un entorno más adecuado para asegurar que los resultados sean fiables.

b. El uso de cámaras acústicas que emplean la técnica de beamforming requiere que el personal encargado de su operación posea competencias específicas y un cierto grado de especialización. El beamforming es una técnica avanzada que permite enfocar y analizar el sonido proveniente de direcciones específicas, aumentando la precisión en la localización de fuentes sonoras. Sin embargo, esta complejidad técnica implica varios desafíos.

- **Competencias del Personal:** Para operar correctamente una cámara acústica con beamforming, el personal debe contar con conocimientos tanto de los principios acústicos como de la tecnología de la cámara. Esto incluye la capacidad de configurar correctamente los parámetros de medición, interpretar los datos obtenidos y ajustar la cámara para diferentes condiciones ambientales y operativas. Partes de estas competencias pueden ser adquiridas a través del proveedor del equipo de medición.
- **Procesamiento de la Información:** Además, el procesamiento de la información capturada por la cámara acústica con técnica beamforming no es instantáneo y puede requerir un tiempo mayor. El análisis de datos implica la aplicación de algoritmos que permiten filtrar y reconstruir las señales acústicas, lo que demanda recursos informáticos para garantizar que los resultados sean precisos.

En resumen, la utilización de cámaras acústicas con técnica beamforming no solo depende del equipo en sí, sino también de la preparación y habilidades del personal técnico, así como del tiempo necesario para procesar la información de manera adecuada. Es fundamental asegurar que estos factores se tomen en cuenta para obtener resultados confiables y efectivos.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bruel & Kjaer. Identificación de Fuentes de Ruido. Disponible para revisión en el siguiente enlace, <https://www.bksv.com/es/knowledge/applications/noise-source-identification>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.
- [2] Bruel & Kjaer. Identificación de Fuentes de Ruido. Disponible para revisión en el siguiente enlace <https://www.bksv.com/es/knowledge/applications/noise-source-identification/acoustic-holography>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.
- [3] Samir, N.Y. Gerges; Arenas, J. Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones. NR Editora, 2004.
- [4] Harris, C. Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido. Mc Graw Hill, 1998.
- [5] Machis, J. (2016). Beamforming, Localización de Fuentes Sonoras Mediante Arrays de Micrófonos. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [6] Calcumil, A., Suárez, E. (2020). Caracterización del Ruido Emitido por Vehículos con Cámara Acústica Mediante la Técnica de Beamforming. Congreso Internacional de Acústica y Audio Profesional INGEACUS. Valdivia, Chile.
- [7] Heilmann, G. Döbler, D. (2008) Improving the Time/Spatial Resolution Capabilities of Beamforming in the Time Domain using Zeropadding. Inter-Noise 2008; 26-29 October, Shanghai, China.
- [8] Jaeckel, O., Gunnar, H. (2006). Transient noise source localization. Euronoise 2006; 30 May – 1 June, Tampere, Finland.
- [9] Alloza, P., Vornrhein, B. (2018). Visualización Sonora en 3D. XI Congreso Iberoamericano de Acústica 2018; 24-26 Octubre, Cádiz, España.
- [10] Alloza, P., Bock, M. (2018). Aplicaciones de localización de fuentes de ruido en acústica de edificios. XI Congreso Iberoamericano de Acústica 2018; 24-26 Octubre, Cádiz, España.
- [11] Kerscher, M., Vornrhein, B., Heilmann, G., Barré, S. Weigel, P. (2016). Measurement and Visualization of Room Impulse Responses with Spherical Microphone Arrays. 29th Tonmeistertagung – VDT International Convention.
- [12] Kümmitz, S., Movahed, A., Pehe, J. (2020). Development of a standard approach for wind turbine measurements with an acoustic camera for optimization purposes. Forum Acusticum 2020; 7-10 December, Lyon, France.
- [13] gfai tech GmbH. (s.f.a). 2D Beamforming Microphone Arrays. Obtenido de Sitio web de gfai tech GmbH: <https://www.gfaitech.com/products/acoustic-camera/microphone-arrays/2d-beamforming-microphones>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.

- [14] gfai tech GmbH. (s.f.b). 3D Beamforming Microphone Arrays. Obtenido de Sitio web de gfai tech GmbH: <https://www.gfaitech.com/products/acoustic-camera/microphone-arrays/3d-beamforming-microphones>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.
- [15] Laaber GmbH (2016) The Acoustic Camera. Obtenido de Sitio web de Laaber GesmbH: <http://www.schallmessung.com/gfai/#1482321118094-da97e547-770a>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.
- [16] gfai tech GmbH. (s.f.c). 3D Soundcam Mikado. Obtenido de Sitio web de gfai tech GmbH: <https://www.gfaitech.com/products/acoustic-camera/handheld-soundcam-mikado>. Consultada el 28 de diciembre del 2023.
- [17] Ruido Industrial (2018). Análisis de Ruido Ragasa, Nutrioli Planta de Procesamiento. Monterrey, NL México.
- [18] Meyer, A., Döbler, D., Hambrecht, J., Matern, M. (2011). Acoustic Mapping on three-dimensional models. CompSysTech 2011; 16-17 June 2011, Vienna, Austria.
- [19] Tatiana Pereira (2022). Estudio de Emisiones de Ruido aplicando Técnicas 3D mediante Escáner Láser y Cámara Acústica. Tesis para optar al título de Magíster en Acústica y Vibraciones. Universidad Austral de Chile.
- [20] Döbler, D., Schröder, R. (2012). High-Dynamic-Range-Algorithmus zur Kontrastverbesserung und exakter uellrekonstruktion in Beamforming-Systemen. DAGA 2012; 19-22 March, Darmstadt, Germany.
- [21] Gfai Acoustic Camera. (2015) Noise Image Help and Manual. Version: 06-2015. Berlin.
- [22] Döbler, D., Heilmann, G., Schröder, R. (2008). Investigation of the depth of field in acoustic maps and its relation between focal distance and array design. Inter-Noise 2008; 26-29 October, Shanghai, China.
- [23] Acoustic Camera Training. (2014). Chapter 02 Theoretical Background (physical principles). Versión: August-2014.
- [24] gfai tech GmbH. (s.f.d). Microphone Array Optimal Frequency Range. Obtenido de Sitio web de gfai tech GmbH: <https://www.gfaitech.com/knowledge/faq/frequency-range-microphone-array>. Consultada el 02 de enero del 2024.
- [25] Johnson, D.H., Dudgeo, D.E. (1993). Array Signal Processing Concepts and Techniques. New Jersey: PTR Prentice Hall.
- [26] Ginn, K., Hald, J. (2010). Aerodynamic noise source identification in wind tunnels using acoustical array techniques. 8th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference - 'Low Carbon Vehicles' (2010); 13-14, October, Grove, United Kingdom.
- [27] Brüel & Kjær. Wind tunnel testing for cars. Obtenido de Sitio web de Brüel & Kjær: <https://www.bksv.com/en/knowledge/applications/noise-sourceidentification/automotive-wind-tunnel-testing>. Consultada el 4 de enero del 2024.

- [28] Döbler, D., Ocker, J., Puhle, C. (2016). On 3D-Beamforming in the wind tunnel. Berlin Beamforming Conference 2016; 29 February-01 March, Berlin, Germany.
- [29] Acoustic Camera. Application note. Pass-by and Interior Measurements. Obtenido de Sitio web de Acoustic Camera: <https://www.acousticcamera.com/fileadmin/acoustic-camera/applications/Acoustic-Camera-Application-Train-Passby02.pdf>. Consultada el 5 de enero de 2024.
- [30] Kümmitz, S., Movahed, A. (2020) Visualisation of train noise with acoustic cameras. 27th International Congress on Sound and Vibration; 12-16 July, Prague, Czech Republic.
- [31] Alloza, P., Vonrhein, B. (2019). Noise source localization in industrial facilities. Inter-Noise 2019; 16-19 June, Madrid, Spain.
- [32] Grythe, J., Norsonic AS. (2014). Norsonic Acoustic Camera. Identifying low-frequency tonal noise in windy and noisy conditions.
- [33] Kerscher, M., Heilmann, G., Puhle, C., Krause, R., Friebe, C. (2017). Sound source Localization on a fast rotating fan using rotational beamforming. Inter-Noise 2017; 27-30 August, Hong Kong, China.
- [34] Kerscher, M., Vonrhein, B., Ueberle, F., Rokita, D. (2016). How Acoustic Camera Measurements can help to increase the Acceptance of Wind Turbines. Wind Europe 2016; 27-29 September, Hamburg, Germany.
- [35] Kümmitz, S., Movahed, A., Pehe, J. (2020). Development of a standard approach for wind turbine measurements with an acoustic camera for optimization purposes. Forum Acusticum 2020; 7-10 December, Lyon, France.
- [36] Heilmann, G., Meyer, A., Böck, M., Döbler D. (2008). Beamforming in the Time-domain using 3D-microphone arrays. Berlin Beamforming Conference 2008; 19-20 February, Berlin, Germany.
- [37] Barros, J.L., Aguilera, A. (2016). Estudio experimental de la relación entre sonido radiado y condiciones de maquinado de una máquina cepilladora de madera basado en mediciones con cámara acústica. X Congreso FIA. Buenos Aires, Argentina.
- [38] Navvab, M., Bisegna, F., Heimann, G., Böck, M. (2014b). Capturing historical buildings space sound signature using beamforming. Berlin Beamforming Conference 2014; 19-20 February, Berlin, Germany.
- [39] Barros, J.L., Álvarez, J.P. (2016). Medición, modelamiento y análisis de ruido industrial en la ciudad de Coronel (Chile) – Ventajas de usos de una cámara acústica para localización de fuentes. X Congreso FIA. Buenos Aires, Argentina.
- [40] Vonrhein, B., Kerscher, M., Heilmann, G., Döbler, D., Meyer, A. (2020). Introduction to a new 3-dimensional method to visualize sound directivity based on a moving microphone array and beamforming. Inter-Noise 2020; 23-26 August, Seúl, South Korea.

- [41] gfai tech GmbH. Soundcam Mikado. Handheld Acoustic Camera for Troubleshooting Noise and Vibration Problems. Data Técnica.
- [42] CAE Software und Systems GmbH. Soundcam, product data. Data Técnica.

**ANEXO A: GUÍA METODOLÓGICA PARA EL USO DE LA CÁMARA
ACÚSTICA MIKADO DE GFAI TECH CON TECNOLOGÍA BEAMFORMING EN
ENTORNOS INDUSTRIALES.**



Serie Proyectos de Investigación e Innovación

Superintendencia de Seguridad Social Santiago - Chile

**Guía Metodológica para el Uso de la Cámara Acústica Mikado de gfai tech
con Tecnología Beamforming en Entornos Industriales
(307-2023)**

Autor: Juan Rodrigo Chávez Miranda, Rodrigo Andrés Astudillo Farlora
Asociación Chilena de Seguridad (ACHS)
Septiembre, 2024



13. INTRODUCCIÓN

13.1. Descripción del equipo

La cámara acústica Mikado de gfai tech, equipada con tecnología de beamforming, es un sistema de vanguardia diseñado para la detección y visualización en tiempo real de fuentes de ruido para diversos entornos acústico. Este dispositivo utiliza una matriz avanzada de micrófonos para captar señales acústicas desde múltiples direcciones. Mediante la técnica de beamforming, la cámara Mikado enfoca estas señales hacia una fuente específica, ajustando dinámicamente las fases y amplitudes de las ondas captadas, lo que permite resaltar con precisión el sonido proveniente de esa dirección.

El resultado de este proceso es una imagen acústica detallada, donde las fuentes de ruido se visualizan como áreas de alta intensidad en un mapa de colores. Esta capacidad de localización precisa es fundamental en aplicaciones industriales que demandan un análisis detallado del ruido, tales como la inspección de maquinaria, la evaluación acústica en la industria automotriz, la verificación de la calidad acústica en edificios y el control efectivo del ruido en entornos industriales complejos.

13.2. Propósito de la guía

El propósito de esta guía metodológica es proporcionar un conjunto de instrucciones para el uso eficiente y seguro de la cámara acústica Mikado. Está diseñada para capacitar a los usuarios en la correcta configuración, operación, y mantenimiento del equipo, asegurando que puedan identificar y analizar con precisión las fuentes de ruido en diversas aplicaciones industriales. Además, la guía busca estandarizar los procedimientos para maximizar la efectividad del dispositivo en la localización de problemas acústicos y la implementación de soluciones correctivas.

13.3. Alcance

El alcance de esta guía metodológica se enfoca en el uso de la cámara acústica en el área de higiene industrial, específicamente como un complemento en la cuantificación de la exposición al ruido. Esta herramienta avanzada permite identificar y visualizar los principales focos de ruido en entornos industriales, facilitando la localización precisa de fuentes sonoras que contribuyen significativamente a la exposición de los trabajadores. La guía está diseñada para orientar en el uso de la cámara acústica con el fin de realizar prescripciones correctas y fundamentadas, mejorando así la eficiencia de las medidas de mitigación, protegiendo la salud auditiva en el ambiente laboral.

14. OBJETIVOS

14.1. Objetivo General

Capacitar a los usuarios en el manejo adecuado de la cámara acústica Mikado, para la correcta identificación y análisis de fuentes de ruido en ambientes industriales.

14.2. Objetivos específicos

- Explicar las funciones básicas de la cámara acústica.
- Detallar los procedimientos para la configuración del equipo.
- Instruir sobre la recolección y análisis de datos acústicos.
- Describir las medidas de seguridad y mantenimiento del equipo.

15. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO ^{43, 44}

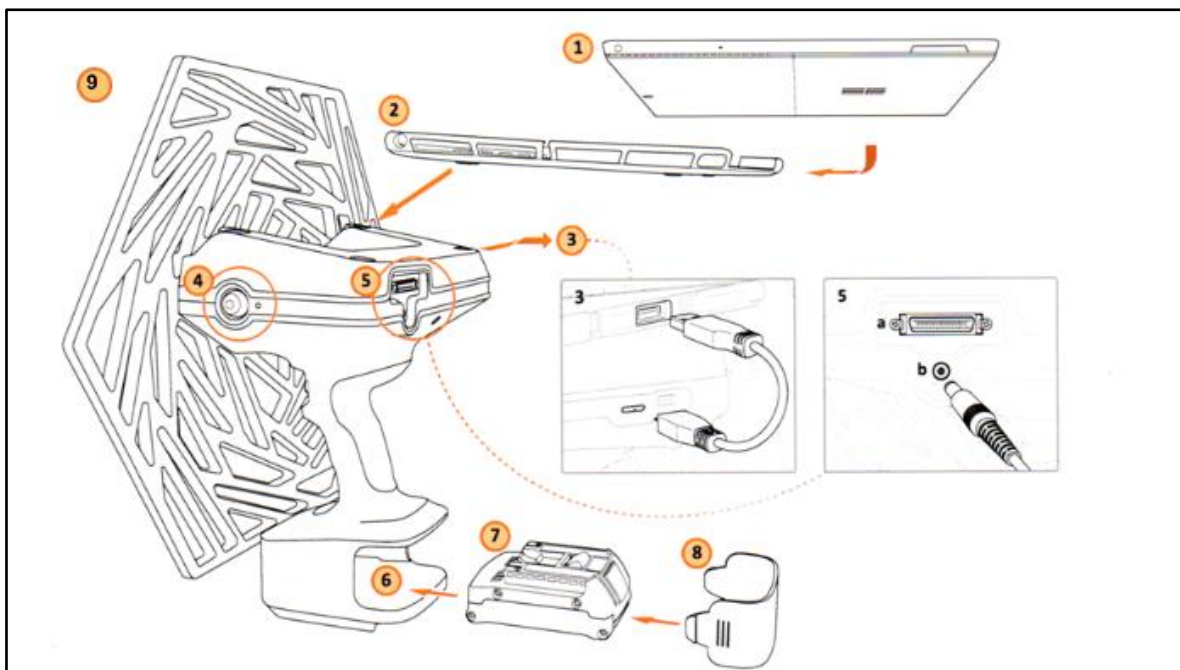
15.1. Componentes principales

Los principales componentes de la Cámara Acústica Mikado son:

1. Tablet o Windows Surface Pro.
2. Cobertura magnética.
3. Cable USB microB o USB 3.0.
4. Botón de encendido.
5. Conexiones cámara acústica.
 - a. Conector de señales digitales.
 - b. Conector para adaptador de potencia.
6. Compartimento de batería.
7. Batería 18 V Lithium-Ion 2.0 Ah SlimPack.
8. Tapa del compartimento de batería.
9. Arreglo de micrófonos. (96 MEMS).

En el lado frontal del arreglo de micrófonos de la cámara acústica, se encuentra una cámara de video Full HD ubicada en el centro. Esta cámara está a cargo de la captura de imágenes, proporcionando un contexto visual complementario a los datos acústicos recogidos por el arreglo de micrófonos. La combinación de la captura de imágenes y los datos acústicos permite un análisis más completo y detallado del entorno o del objeto que se está evaluando.

Figura A1: Componentes principales de Cámara Acústica Mikado.



⁴³ gfai tech GmbH. 2021. NoiseImage Mobile V4.13.1 Help and Manual.

⁴⁴ gfai tech GmbH. 2023. Soundcam Mikado. DataSheet.

Figura A2: Vista frontal de Cámara Acústica Mikado.



15.2. Descripción de las partes de la cámara acústica

15.2.1. Tablet o Windows Surface Pro

La cámara acústica Mikado utiliza una Tablet o Windows Surface Pro como unidad de control y visualización. Este dispositivo es fundamental para la configuración del equipo, la visualización en tiempo real de las imágenes acústicas y la operación del software Noiselmage, que se encarga del análisis de datos. La pantalla táctil facilita la interacción intuitiva con el sistema, permitiendo ajustes rápidos y la visualización precisa de las fuentes de sonido detectadas.

15.2.2. Cobertura Magnética

Las cubiertas magnéticas para tablets y dispositivos como el Microsoft Surface tienen el objetivo principal de proteger el dispositivo contra daños físicos, como rasguños y golpes, y de proporcionar funcionalidad adicional, como un soporte ajustable para diferentes ángulos de visión. También facilitan el transporte al ser ligeras y compactas, y en algunos casos, integran un teclado para mejorar la productividad.

15.2.3. Cable USB microB o USB 3.0

Este cable es responsable de la conexión de datos entre la cámara acústica y la Tablet o Surface Pro. El USB 3.0, en particular, ofrece alta velocidad de transferencia de datos, crucial para la transmisión en tiempo real de las señales acústicas captadas por la matriz de micrófonos al software de análisis. La estabilidad y calidad del cable aseguran una comunicación sin interrupciones e interferencias de la señal, lo cual es esencial para el funcionamiento fluido del sistema.

15.2.4. Botón de Encendido

El botón de encendido es el interruptor principal que controla la activación del sistema de la cámara acústica. Al presionarlo, se enciende el dispositivo y se inicia el proceso de inicialización de todos los componentes. Este botón suele estar asociado con indicadores LED que muestran el estado operativo del equipo, como encendido, apagado o carga de batería.

15.2.5. Conexiones Cámara Acústica

- a. Conector de Señales Digitales: Este conector permite la transmisión de datos digitales entre la cámara acústica (matriz de micrófonos y cámara de video) y dispositivos externos, como Tablet o Windows Surface. Es clave para integrar la cámara acústica en sistemas más complejos, facilitando el análisis y la sincronización con otros equipos.
- b. Conector para Adaptador de Potencia: Este es el puerto donde se conecta el adaptador de corriente para cargar la batería interna de la cámara o para alimentar el sistema directamente desde una fuente de energía externa. Es esencial para asegurar que la cámara esté siempre operativa durante las sesiones de trabajo prolongadas.

15.2.6. Compartimento de Batería

El compartimento de batería es la sección de la cámara donde se aloja la batería recargable. Está diseñado para facilitar el acceso rápido y seguro a la batería, permitiendo su reemplazo o inspección sin necesidad de herramientas especiales. Este compartimento suele estar bien sellado para proteger la batería de elementos externos como polvo y humedad.

15.2.7. Batería 18 V Lithium-Ion 2.0 Ah SlimPack

La batería de 18V Lithium-Ion 2.0 Ah SlimPack proporciona la energía necesaria para el funcionamiento autónomo de la cámara acústica. Esta batería recargable es compacta y ligera, pero ofrece una capacidad adecuada para soportar largas horas de operación en campo. Su diseño SlimPack la hace fácil de transportar y manejar, minimizando el peso total del equipo.

15.2.8. Tapa del Compartimento de Batería

La tapa del compartimento de batería protege la batería y los conectores internos de la cámara. Es crucial para mantener la integridad del sistema eléctrico y para asegurar que la batería esté correctamente instalada y fija durante el uso. Además, la tapa suele estar diseñada para un cierre hermético, previniendo la entrada de polvo o humedad que podría dañar el sistema.

15.2.9. Arreglo de Micrófonos (96 MEMS)

El arreglo de micrófonos está compuesto por 96 micrófonos MEMS (Sistemas Microelectromecánicos), distribuidos en una matriz específica. Estos micrófonos captan las ondas sonoras desde diferentes direcciones, lo que permite a la cámara realizar un mapeo acústico detallado del entorno. La disposición precisa y la alta sensibilidad de los MEMS son cruciales para el funcionamiento efectivo de la tecnología beamforming, que enfoca y resalta las fuentes de sonido con alta precisión, ofreciendo imágenes acústicas claras y detalladas en tiempo real.

15.2.10. Cámara de video

El sistema Mikado de gfai tech está equipado con una cámara de video Intel® RealSense™ Depth Camera D435, que permite la captura de imágenes en 3D. Esta cámara ofrece una resolución Full HD de 1920 x 1080 píxeles y proporciona un amplio campo de visión. Su conectividad USB 3.0 facilita una transferencia rápida de datos, haciéndola ideal para aplicaciones avanzadas en robótica, realidad aumentada y visión por computadora.

15.3. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas de Mikado son las siguientes:

Tabla A1: Especificaciones técnicas Cámara Acústica Mikado.

PARÁMETRO	MIKADO GFAI TECH
Dimensiones	45 x 35 x 15 cm
Peso	3.4 kg incluyendo batería y pantalla
Tamaño Pantalla	Microsoft Surface Desde 10"
Resolución Pantalla	Desde 1920 x 1280 Px
Video cámara	Intel® RealSense™ Depth Camera D435
Resolución Cámara	1920 x 1080 (Full HD)
Imágenes 3D	Sí
Micrófonos	96 MEMS
Respuesta de frecuencia	10 Hz – 24 kHz
	100 – 5 kHz (< 0.5 dB)
	100 Hz – 11 kHz (< 3 dB)
Frecuencia de Sampleo	48 kS/s
Máximo Nivel de Presión Sonora	121 dB at 10 % THD
Nivel de Ruido base	30 dB(A)
Sensibilidad (1 kHz, 94 dB SPL)	-26 dBFS
Distancias recomendadas	> 0.3 m (beamforming)
	< 0.15 m (holografía acústica)
Rango de Niveles Mapas Acústicos	9 dB – 120 dB
Rango de frecuencias Mapas Acústicos	514 Hz – 24 kHz (beamforming)
	30 Hz – 2 kHz con campo cercano (Holografía acústica)
Rango Dinámico	15 dB – 27 dB, hasta 50 dB con algoritmos avanzados
Condiciones ambientales de operación	0 °C – 35 °C, hasta 80 % RH (operación manual)
	-10 °C – 45 °C, hasta 80 % RH (operación escritorio)
Autonomía de batería	3 horas

16. PROCEDIMIENTO DE USO

La cámara acústica Mikado está diseñada para la medición in situ de ruido y vibraciones. Este dispositivo integra un arreglo de micrófonos, un sistema de adquisición de datos y una tablet con el software NoiseImage Mobile, permitiendo realizar análisis directos tanto en el dominio temporal como en el frecuencial en el lugar de la medición. Además, es compatible con la estación de trabajo para análisis avanzados mediante NoiseImage Pro.

La cámara acústica Mikado incluye una cámara de video Intel® RealSense™ con resolución Full HD, que permite capturar datos de profundidad del entorno medido. Los componentes del sistema de medición incluyen:

- **Cámara acústica Mikado:** Equipado con un arreglo de micrófonos para la captura precisa y detallada de datos acústicos, más cámara de video Full HD.
- **Tablet:** Con el software NoiseImage Mobile para el procesamiento y análisis de datos en tiempo real, incluyendo su cargador.
- **Baterías:** Específicas para la cámara acústica Mikado, junto con su cargador.
- **Trípode:** Para proporcionar soporte y estabilidad al arreglo de micrófonos durante la medición.

Figura A3: Elementos que configuran la cámara acústica Mikado de gfai tech.



Es recomendable complementar las evaluaciones en terreno con el siguiente equipamiento:

- **Medidor de distancia láser:** Para la toma precisa de distancias y dimensiones en el entorno de medición.
- **Monitor de condiciones ambientales:** Para registrar y monitorear parámetros ambientales como temperatura y humedad, que pueden influir en las mediciones.

Figura A4: Medidores de distancia laser y monitor de condiciones ambientales. Imágenes referenciales.



16.1. Transporte y preparación del equipamiento

- Utilizar siempre la maleta original del equipo.
- Evitar dejar la maleta en ubicaciones en donde pueda saltar o golpearse durante el transporte.
- No usar el equipo bajo condiciones de lluvia.
- Tomar precauciones para realizar mediciones en caso de que la temperatura ambiente supere los 35 ° C.
- Confirmar que la batería de 18 V Lithium-Ion esté completamente cargada. Si es necesario, utilice una batería de las mismas características cargada como respaldo.

16.2. Montaje del equipamiento

- El equipo debe ser utilizado siempre por personal calificado.
- Inicialmente, colocar la maleta de transporte del equipamiento sobre una superficie plana y estable (mesa).
- Sacar todas las partes del sistema de medición, ubicarlas sobre la superficie plana y proceder al ensamblaje de sus componentes.
- Revise el estado físico de la cámara, tablet, cables y accesorios.
- Verifique que la matriz de micrófonos y la cámara de video estén limpias y sin obstrucciones.
- Inserte la batería en su compartimento y asegúrese de que la tapa esté bien cerrada.
- Fijar la Tablet a la Cámara Acústica mediante los broches magnéticos dispuestos en la base de la carcasa del dispositivo. Instalar el cable de comunicación entre la Cámara Acústica y Tablet mediante el cable USB microB o USB 3.0.
- Montar cámara acústica en un trípode que garantice estabilidad y robustez. Este trípode debe ser fabricado con materiales duraderos, como acero o aluminio, y contar con una base ancha para evitar vuelcos. Debe permitir ajustes precisos en altura y ángulo, además de facilitar el montaje y desmontaje rápido de la cámara. Un diseño plegable es ideal para el transporte, mientras que la resistencia a la corrosión y a condiciones climáticas variables es esencial.

Contar con burbuja de nivel. También debe tener la capacidad de integrar accesorios adicionales si se requiere.

- Encender la Cámara Acústica y Tablet. Comprobar la carga adecuada de las baterías en ambos dispositivos.

16.3. Configuración del software y grabación de eventos

Para garantizar un análisis eficiente y preciso de las mediciones acústicas, es fundamental una correcta configuración del software y grabación de eventos. Con el software NoiseImage, este proceso se optimiza mediante una serie de pasos que permiten ajustar las configuraciones del sistema y registrar eventos de manera efectiva. Esta herramienta facilita la personalización de parámetros de medición y el almacenamiento detallado de datos, asegurando que cada evento se capture con la precisión necesaria para un análisis exhaustivo. A continuación, se detallan los procedimientos para configurar adecuadamente NoiseImage y registrar eventos clave durante el proceso de medición.

16.3.1. Modos de operación software NoiseImage Mobile

La Cámara Acústica Mikado emplea el software NoiseImage Mobile para la adquisición de datos. Este programa, diseñado específicamente para mediciones in situ, optimiza las funciones de localización más utilizadas, reduciendo el tiempo de cálculo. Aunque permite ciertos postprocesos, estos se realizan considerando valores estándar optimizados.

El software NoiseImage Mobile ofrece tres modos de operación para facilitar la medición y el análisis:

- **Modo Temporal:** El análisis en el dominio del tiempo ofrece ventajas claves. Permite una visualización directa de las señales acústicas, facilitando la identificación de eventos rápidos y patrones transitorios. Esta modalidad simplifica el procesamiento y mejora la capacidad para diagnosticar problemas acústicos de manera eficiente.
- **Modo Frecuencial:** Gracias a los avanzados algoritmos del software, se puede realizar la localización sonora segmentada por bandas de frecuencia, así como aplicar selecciones precisas dentro de rangos de frecuencia específicos para un análisis detallado.
- **Modo Espectrograma:** El modo espectrograma en la cámara acústica Mikado ofrece ventajas significativas. Permite visualizar cómo las frecuencias del sonido varían con el tiempo, proporcionando una representación gráfica clara de la evolución espectral. Esto facilita la identificación de patrones complejos y la detección de componentes de frecuencia específicas, ayudando a analizar fenómenos acústicos detalladamente y a interpretar mejor los resultados.

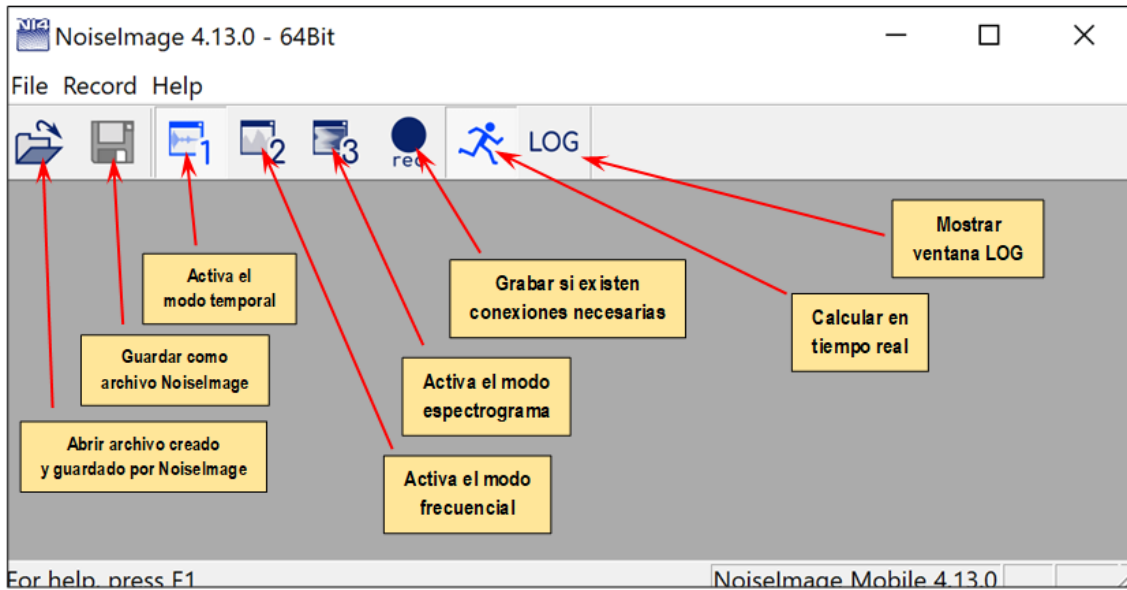
El modo de visualización seleccionado puede depender de las preferencias del usuario. Generalmente, el modo espectrograma se considera más práctico durante la medición, ya que permite ajustar rápidamente el rango de frecuencias y filtrar las frecuencias bajas que pueden afectar la precisión de la localización debido a las dimensiones del arreglo de micrófonos. Sin embargo, algunos usuarios optan por utilizar otros modos, como el modo frecuencial, que también permite eliminar las frecuencias bajas para el cálculo de la imagen acústica.

Es importante destacar que, independientemente del modo en que se haya realizado el registro (ya sea en el dominio temporal o frecuencial), la señal grabada será idéntica en todos los casos. El modo de visualización solo afecta a la previsualización de los datos, mientras que el análisis posterior puede llevarse a

cabo en cualquiera de los modos disponibles.

En la imagen siguiente se presenta la pantalla de inicio del software NoiselImage, donde se exhiben las opciones previamente detalladas.

Figura A5: Ventana de inicio, software NoiselImage Mobile.



16.3.2. Configuración Modo de Grabación NoiselImage Mobile

Para grabar una señal sonora con la Cámara Acústica, es necesario ajustar los parámetros en la ventana de grabación del software NoiselImage según lo indicado en la Figura A6. Es crucial especificar la distancia a la fuente analizada y la temperatura ambiental durante la medición para asegurar la precisión de los resultados.

Una vez iniciado el programa, seleccione uno de los modos de operación de la Cámara Acústica (temporal, frecuencial o espectrograma). A continuación, proceda de la siguiente manera:

- Haga clic en el botón **REC** en la barra de herramientas para acceder a la pestaña "**Recorder Control**". Ajuste el canal de micrófonos seleccionado y configure la frecuencia de muestreo correspondiente (por ejemplo, **ArrayMic de Mikado96** y **48,000 Hz**, respectivamente).
- Mida la distancia al foco emisor y regístrela en el casillero "**Focus**" de la pestaña "**Recorder Control**".
- Mida la temperatura ambiental y regístrela en el casillero "**Temperature**" de la pestaña "**Recorder Control**".
- Configure la duración de la grabación en el campo "**Duration (s)**" dentro de la pestaña "**Recorder Control**". Se recomienda establecer un intervalo de entre 4 y 8 segundos, que es adecuado para la mayoría de las aplicaciones.
- Una vez que se hayan realizado estos ajustes, inicie la medición haciendo clic en el botón "**Record**" en la pestaña "**Recorder Control**".
- Inmediatamente se desplegará la pestaña "**Recording**", haga clic en el botón "**Trigger**" y espere a que finalice de grabar. El registro quedará grabado en la memoria de la Tablet.
- Es importante destacar que en **Recorder Control**, al abrir la ventana de **Trigger Setting**, se puede acceder a la configuración del **Pre-trigger**, la cual permite definir un tiempo de pre-guardado de datos al momento de ejecutar el botón

Trigger en la grabación. Esta herramienta facilita la identificación de eventos sonoros momentáneos de corta duración, tales como despiches, golpes, entre otros.

Figura A6: Ventana de grabación, software NoiselImage Mobile.

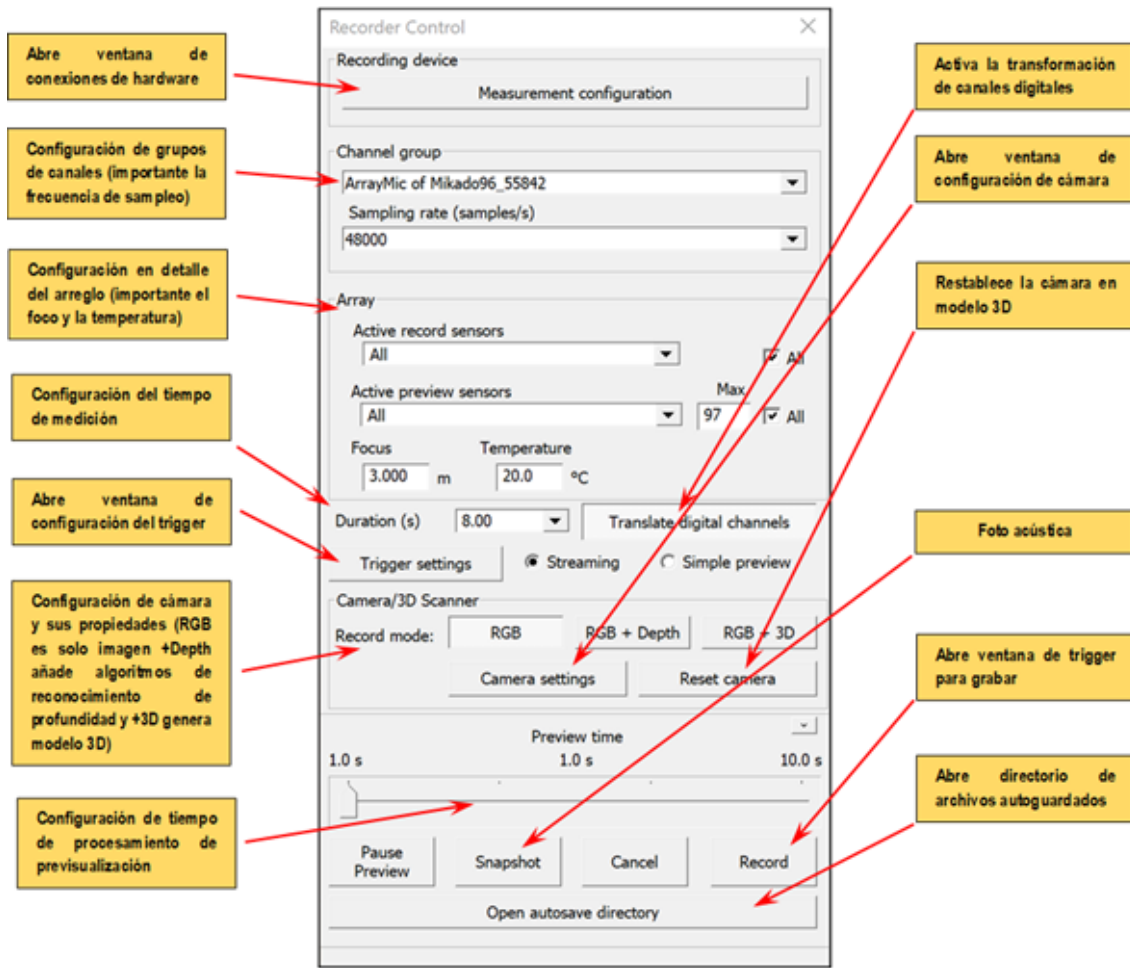


Figura A7: Ejemplo función modo temporal, software NoiselImage Mobile

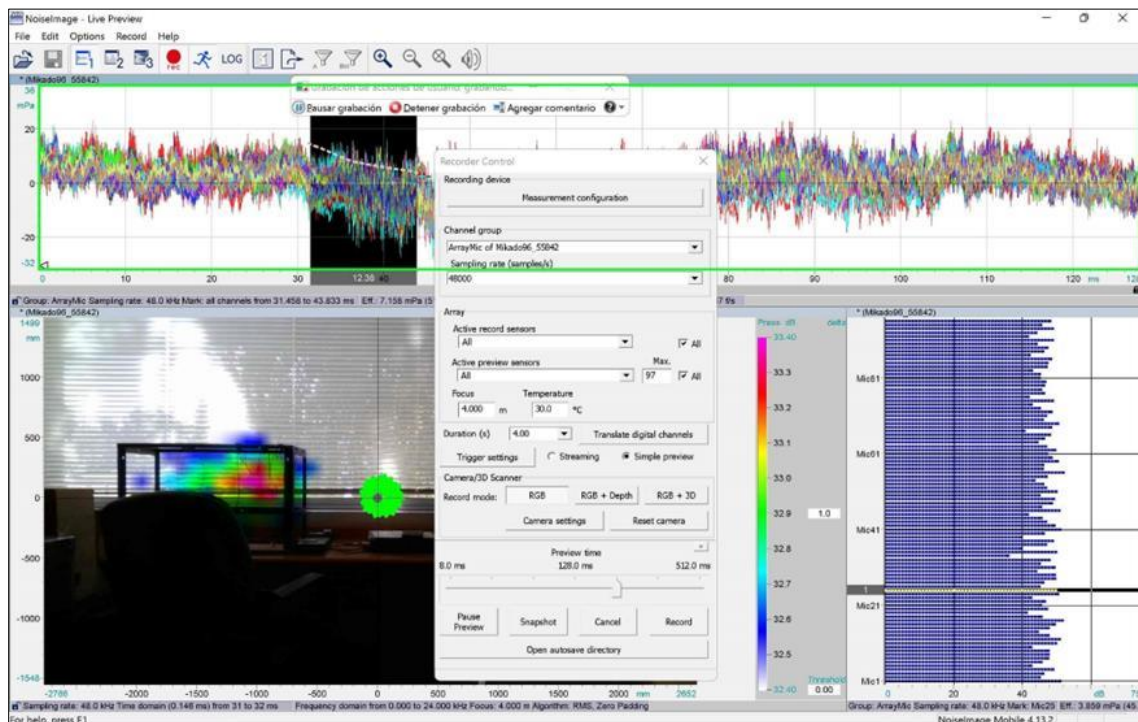


Figura A8: Ejemplo función modo frecuencial, software NoiselImage Mobile

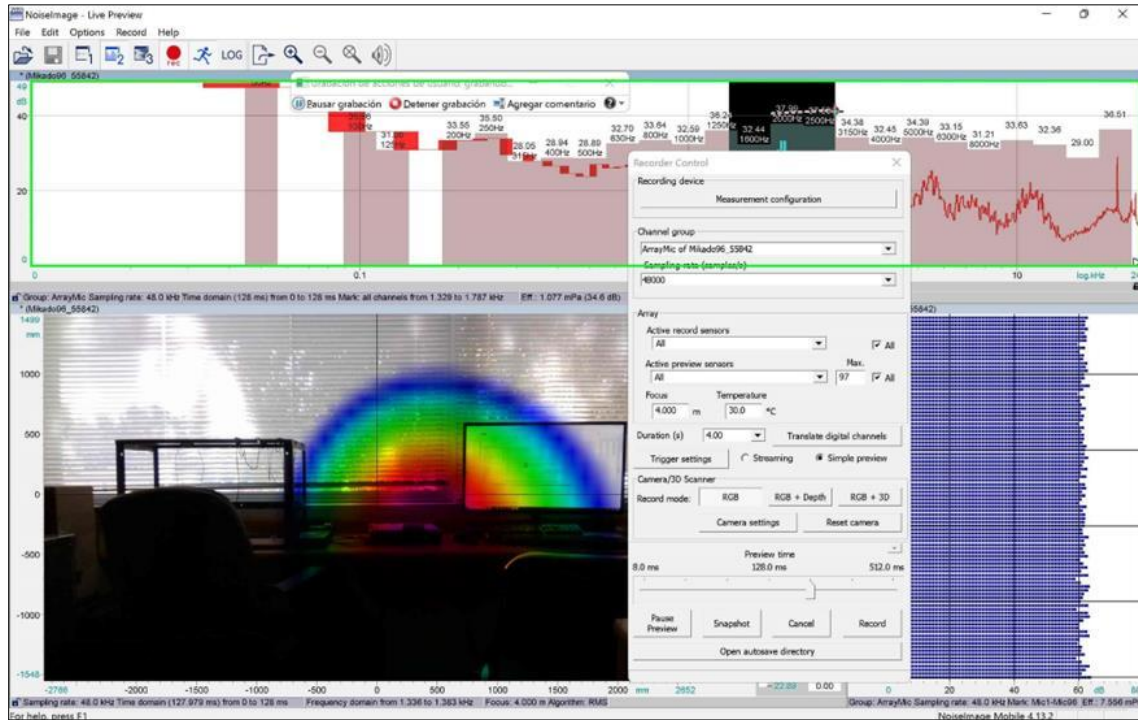
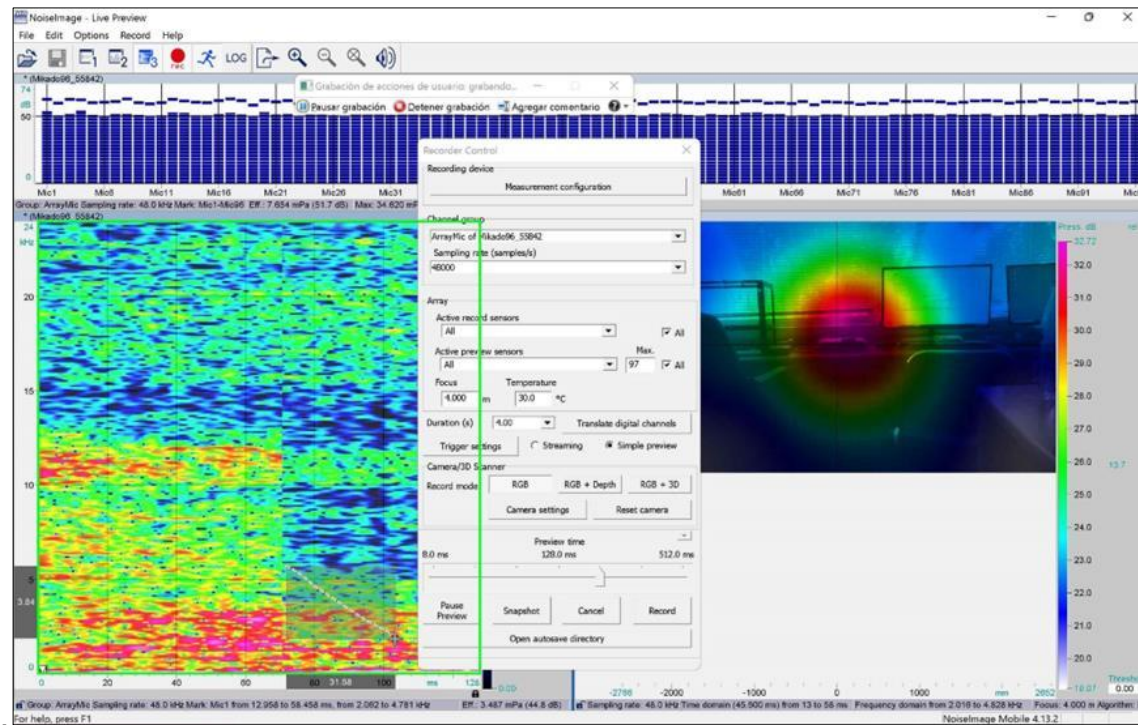


Figura A9: Ejemplo función modo espectrograma, software NoiselImage Mobile



16.4. Configuración del Entorno de Trabajo

16.4.1. Posicionamiento de la Cámara

- Ubique la cámara en una sitio estable y seguro, orientada hacia el área de interés.
- Asegúrese de que no haya obstrucciones directas entre la cámara y la fuente de sonido.
- Se recomienda verificar las condiciones ambientales reinantes en el lugar de la evaluación, para contrastarlas con las especificaciones técnicas de operación del equipo. Para esto se aconseja complementar las mediciones acústicas con medidor de condiciones ambientales.

16.4.2. Iluminación

- Verifique que haya suficiente iluminación en el área para que la cámara de video pueda capturar imágenes claras.
- Ajusta la iluminación si es necesario.

16.5. Captura de Datos

16.5.1. Iniciar Captura

- Inicie la captura de datos en el software NoiseImage y observe en tiempo real cómo las señales acústicas se visualizan en la pantalla. Asegúrese de que los parámetros de configuración de grabación previamente establecidos, como la distancia a la fuente y la temperatura ambiental, estén correctamente ajustados. Monitoree las visualizaciones para verificar que reflejen adecuadamente los datos acústicos y ajuste los parámetros según sea necesario para garantizar la precisión y calidad de la captura de datos.

16.5.2. Ajuste de Parámetros en Tiempo Real

- Si es necesario, durante la captura realice ajustes en tiempo real en el software para optimizar la visualización y la precisión de los datos acústicos, garantizando que la representación en pantalla refleje con exactitud las condiciones y características del sonido registrado.

16.5.3. Monitoreo de Resultados

- Monitoree la representación acústica generada por el software, evaluando el mapa de colores para detectar las regiones con los máximos niveles de presión sonora. Realice un análisis detallado de los picos de intensidad y las áreas de mayor concentración de energía acústica, prestando especial atención a las variaciones en el espectro de frecuencias y la distribución espacial del ruido.

17. ANÁLISIS Y REPORTE

17.1. Guardar Datos

- Una vez finalizada la captura, guarde los datos acústicos y visuales en la memoria de la Tablet o Surface Pro.
- Sería conveniente que, si la tablet dispone de una ranura para tarjeta SD, la información se almacene tanto en la memoria interna de la tablet como en la memoria externa. De este modo, al finalizar la jornada de medición, el operario podrá retirar la tarjeta SD y transportarla personalmente, asegurando una copia adicional de los datos y facilitando el respaldo y la transferencia de la información.

18. FINALIZACIÓN

Para concluir el uso de la cámara acústica, es fundamental seguir los siguientes pasos:

18.1. Apagado del Equipo

- Cierre el software NoiseImage Mobile y apague la cámara acústica usando el botón de encendido.

- Desmonte el sistema de medición del trípode y colóquelo sobre una superficie plana y estable (mesa).
- Desconecte el cable que comunica la cámara acústica con la Tablet.
- Desmonte la Tablet de la cámara acústica.
- Saque la batería de 12 V del compartimento que provee la cámara acústica. Posteriormente, tape el compartimento sin batería.
- Ordene cada uno de los elementos al interior de la maleta de transporte.

18.2. Desconexión y Almacenamiento

- Desconecta la Tablet o Surface Pro y guarda todos los componentes en sus estuches de transporte.
- Verifica que la batería esté desconectada si no se va a usar el equipo por un período prolongado.

18.3. Mantenimiento

- Limpia la cámara y la matriz de micrófonos según las recomendaciones del fabricante.
- Almacene el equipo en un lugar seco, seguro y protegido de condiciones ambientales extremas. Asegúrese de retirar la batería antes de su almacenamiento para prevenir posibles daños por fugas o deterioro, y para garantizar la longevidad y el buen funcionamiento del equipo.

Este procedimiento te permitirá utilizar la cámara acústica Mikado de manera eficiente y segura, asegurando la captura precisa de datos acústicos en diversos entornos industriales.

19. ANÁLISIS POSTERIOR

Utilice las herramientas del software Noiselimage Mobile para llevar a cabo un análisis detallado de los datos. Estas herramientas incluyen la identificación de frecuencias específicas, el filtrado de ruido y la generación de espectros acústicos. Estas capacidades avanzadas permiten una evaluación precisa de las características acústicas, facilitando la detección de problemas y la interpretación de los resultados con gran detalle.


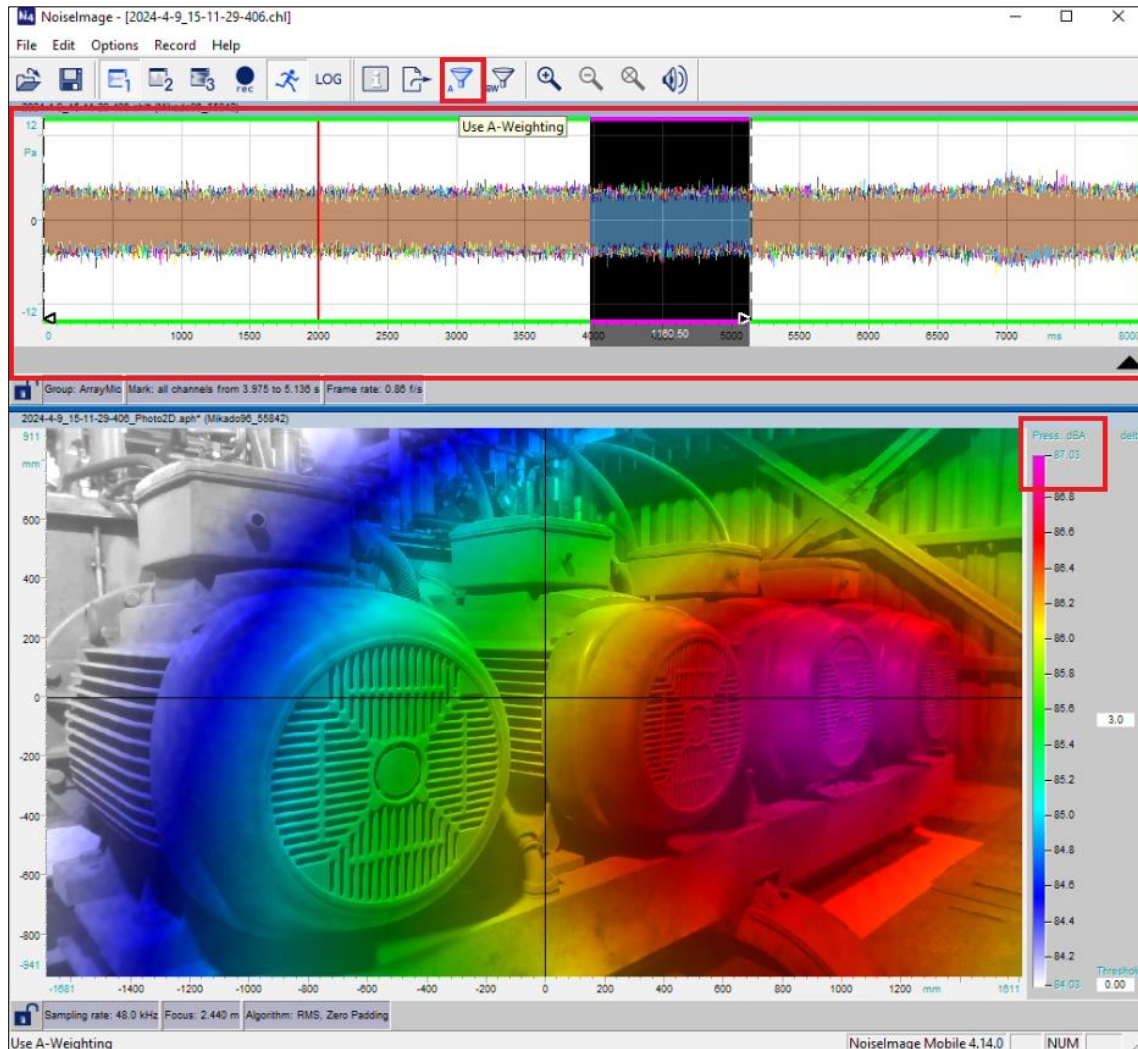
- Primero, y muy importante, antes de hacer cualquier análisis, es fundamental tener en cuenta en qué ponderación es necesario obtener nuestros datos. Por defecto, el software entregará datos en **dB**. Si es necesario el uso de los datos en **dBA**, debe activarse el botón **A-Weighting**. 
- Dependiendo de cada usuario y del objetivo de la medición, se puede utilizar los distintos modos de visualización. El proceso se inicia con el **Modo Temporal**, donde se sugiere definir un segmento de tiempo (aproximado a 1 segundo), que facilite identificar la o las fuentes.

Figura A10: Ejemplo función filtro “A- Weighting”, software NoiselImage Mobile.



- Luego, para obtener una mejor imagen para la identificación de la fuente, haga “clic” sobre la imagen. Esto habilita las herramientas. En el rectángulo color rojo en la Figura A11 se muestran herramientas de visualización que se pueden activar o desactivar. De izquierda a derecha se encuentra:

- ✓ Show acoustic image: Muestra la imagen acústica de la situación.
- ✓ Show optical image: Muestra la imagen obtenida.
- ✓ Show array: Permite visualizar el arreglo de micrófonos de la cámara.

Las siguientes funciones no tienen un funcionamiento en simultaneo.

- Show image as grayscale and of set brightness: Muestra la imagen en escala de grises la imagen con un brillo ajustable, que se puede modificar manteniendo presionado el clic derecho en el ícono.
- Change intensity threshold for edges detection: Muestra los contornos de los elementos de la imagen.
- En el rectángulo amarillo en la Figura A11 se muestran más herramientas de localización y escucha de la fuente de igual forma se pueden activar o desactivar. De izquierda a derecha se encuentra:
 - ✓ Listen into de Channel data: Permite escuchar el contexto general de ruido de la imagen.










- ✓ Existen dos funciones de borrado. Para escoger cada opción mantener “clic” derecho sobre el icono:
 - Erase/extract the market point:  Permite borrar una fuente de la imagen y extraer puntos de referencias del marcador.
 - Erase/extract the point with has the maximum level in a marked region:  Borra el punto de máximo nivel.
- ✓ El ícono que continúa variará según la opción que escojamos. Se selecciona mantener clic derecho sobre el ícono:
 - Find the point witch has the maximum level in a marked region: Esta  función permite marcar un punto dentro de un área seleccionada y mostrará el punto máximo de presión sonora y su ubicación en la imagen.
 - Select one or more point:  Permite identificar el nivel de presión sonora de un punto en la imagen.
 - Select one or more areas:  Seleccionará un área en la imagen.
- ✓ Listen into the acoustic image:  Se puede hacer un paseo con el micrófono sobre la imagen para una escucha más detallada e identificación de la fuente
- En el rectángulo verde de la Figura A11 se muestra una de las herramientas más importante que suele facilitar la ubicación de la fuente:
 - ✓ Apply contrast- improvement algorithm (HDR):  Esta función aplica un algoritmo de mejora el contraste que permite ubicar más rápidamente la fuente de interés.
- Luego de aplicar las herramientas de visualización de HDR y  seleccionar el área identificada, utilice la opción **Find the point which has the maximum level in a marked región**  . En la Figura A12, se puede apreciar el resultado.

Figura A11: Herramientas de visualización y localización, software NoiseImage Mobile.

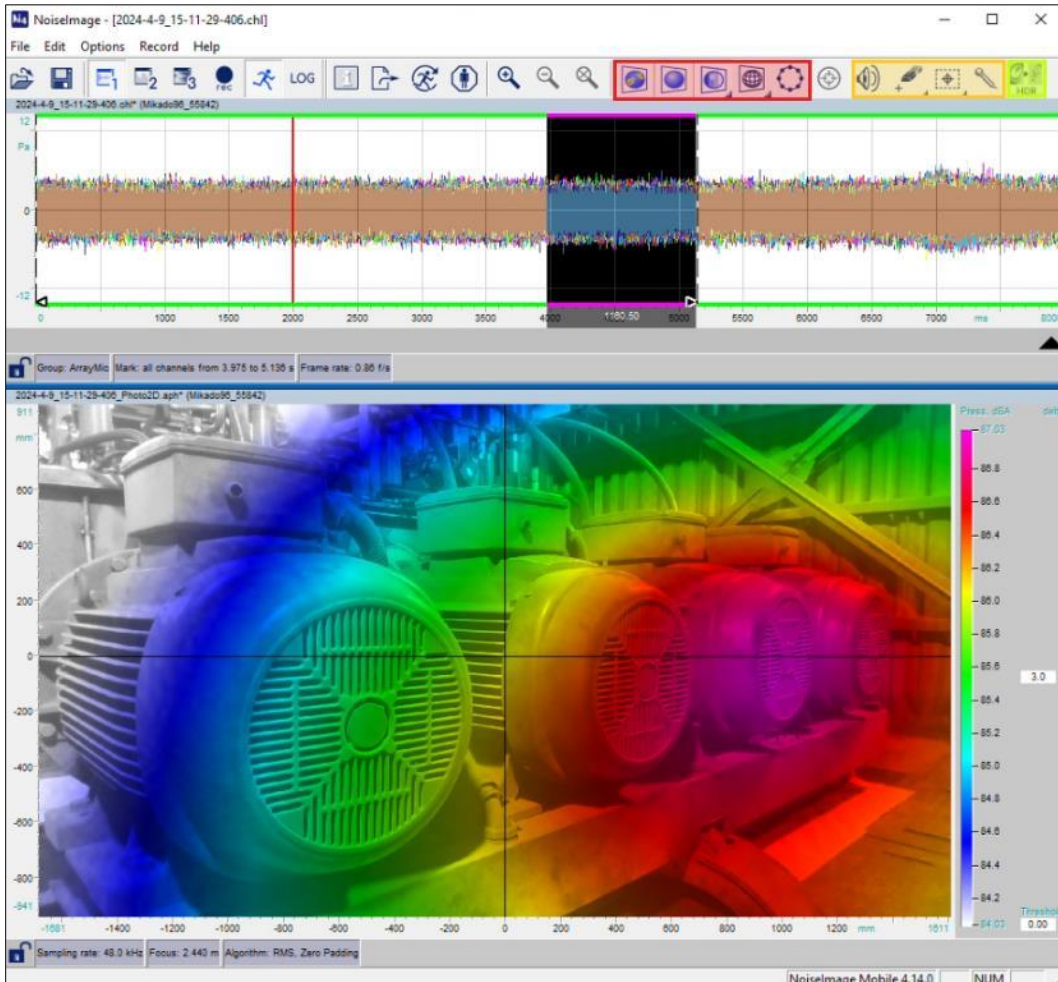
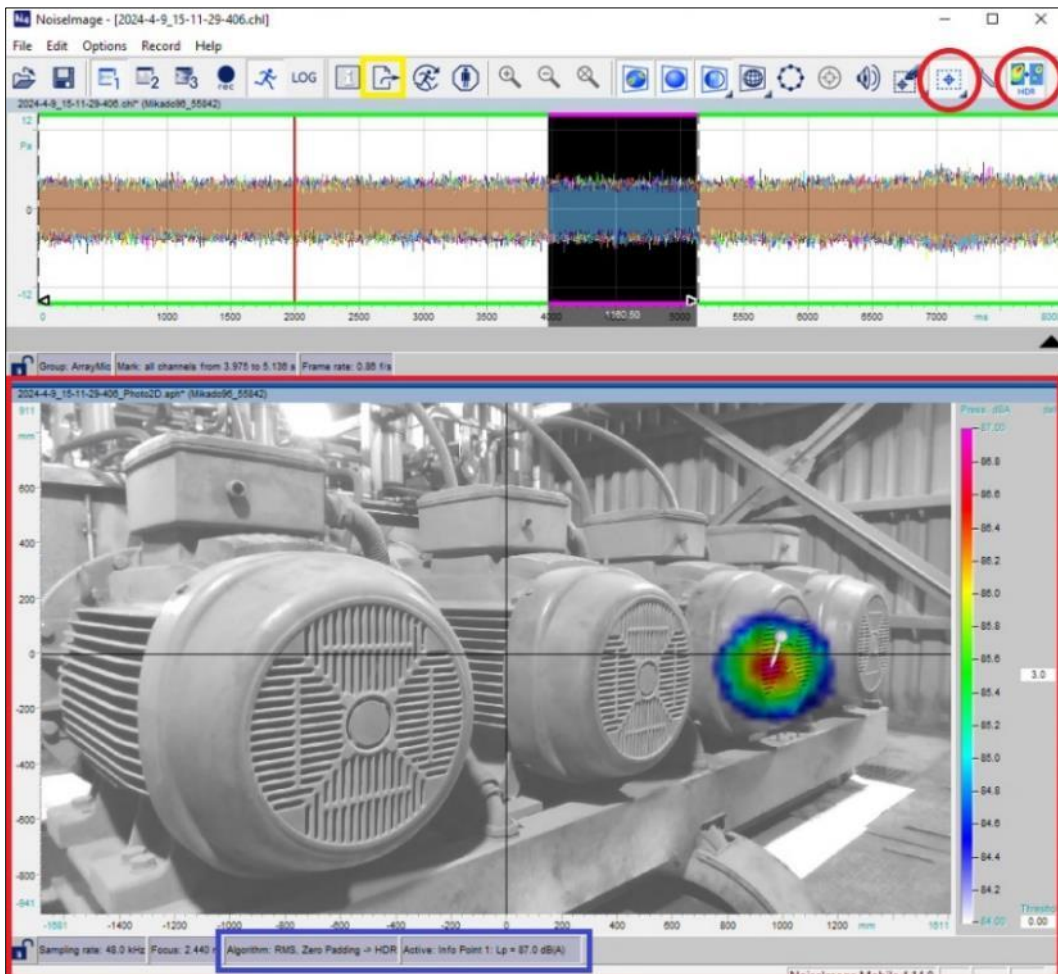
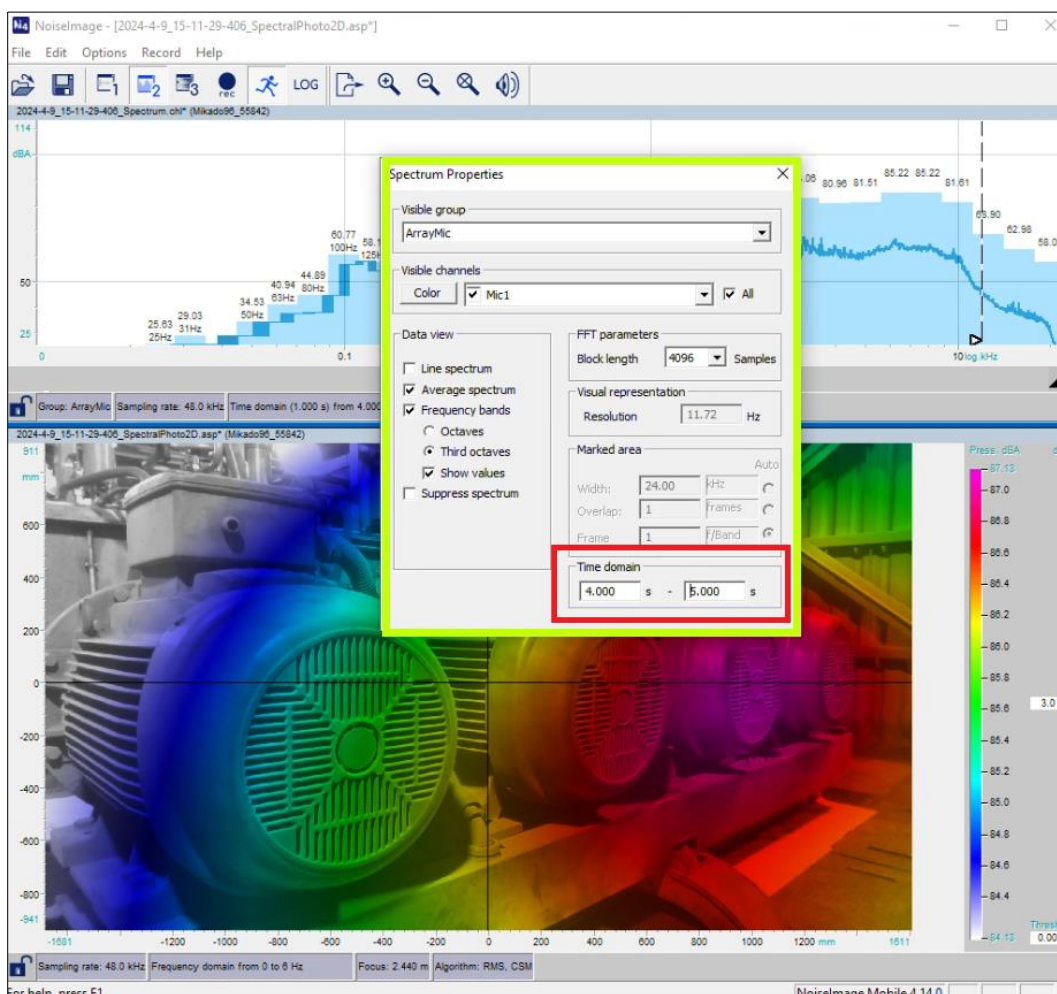


Figura A12: Uso de herramientas de visualización, software NoiseImage Mobile.



- Para exportar la imagen obtenida, dirígete al cuadrado de color amarillo marcado en la Figura A12.
- Ahora, para obtener la información de frecuencias de la fuente identificada, debemos ir a la **función modo frecuencias**. Es importante tener en cuenta que el tiempo seleccionado en el análisis del **modo temporal** fue de 4 a 5 segundos; este dato es de suma importancia ya que se usará en el siguiente paso).
- En el **modo frecuencias** veremos el rango de frecuencia en la parte superior y en la imagen en la parte inferior. Debemos hacer doble clic, sobre las frecuencias; esto habilitará **Spectrum Properties**. Aquí, ingresamos el rango de tiempo seleccionado en el modo temporal, como se ve en el rectángulo rojo de la Figura A13.

Figura A13: Ingreso de rango de tiempo en Spectrum Properties, software NoiseImage Mobile.




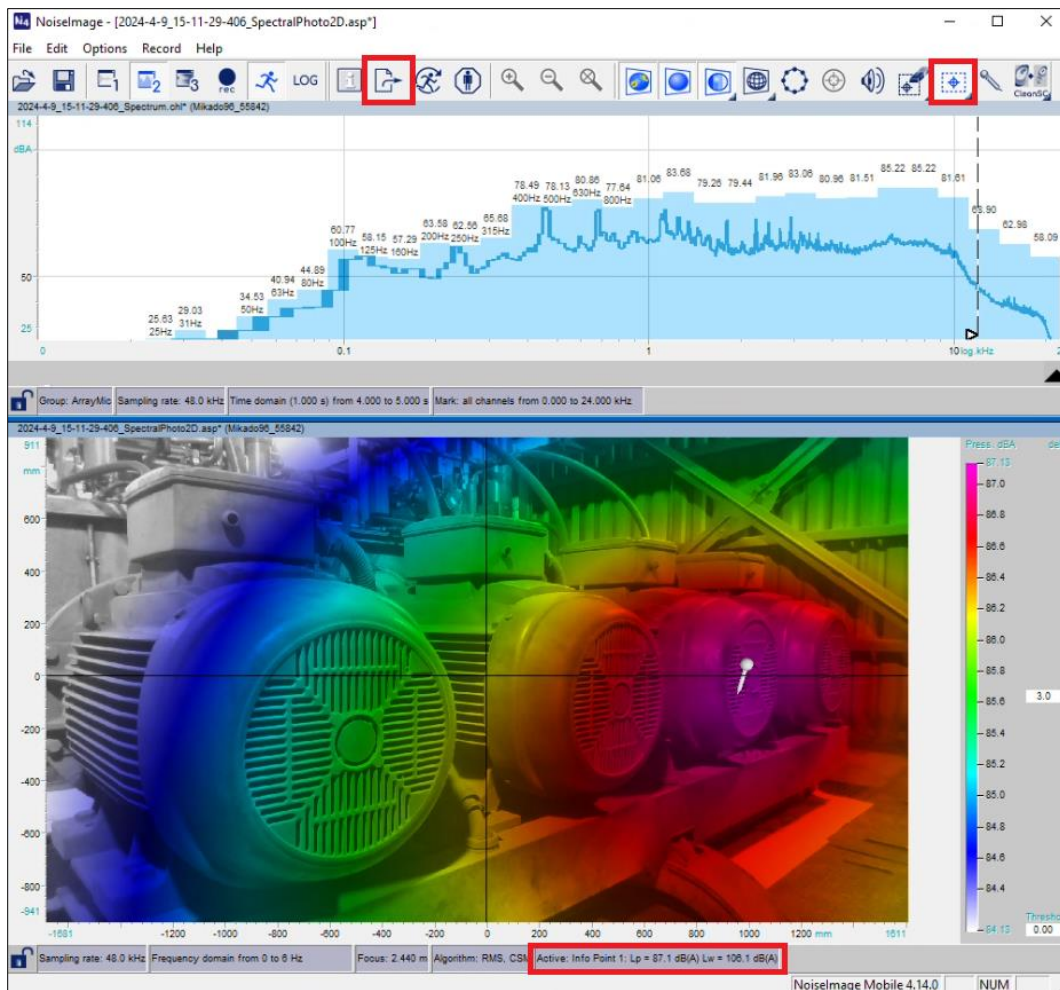
- Luego, cerramos la pestaña de **Spectrum Properties** y hacemos clic en alguna parte de la imagen para habilitar sus herramientas. En este caso, utilizamos la herramienta **Find the point which has the maximum level in a marked region**  y luego, como se muestra en la Figura A14, exportamos nuestro resultado.

Figura A14: Uso de herramienta de visualización, software NoiseImage Mobile.



- Es importante destacar que tanto el modo de temporal y de frecuencias se puede exportar los datos como imágenes o texto. Esto dependerá de lo que cada usuario quiera mostrar. En este caso, dado que la imagen permite apreciar de forma más evidente la localización de la fuente, se optó por utilizar la imagen obtenida en el modo temporal y solo la información en texto, del modo frecuencia.

Si se requiere un análisis más exhaustivo NoiseImage Pro ofrece funciones, como la correlación de datos y el análisis en 3D, proporcionando una visión más completa y profunda del entorno acústico.

20. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS GUÍA METODOLÓGICA

[43] gfai tech GmbH. 2021. NoiseImage Mobile V4.13.1 Help and Manual.

[44] gfai tech GmbH. 2023. Soundcam Mikado. Data Sheet.