



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis del empleo de técnicas de acústica avanzada para la identificación y caracterización de pérdidas de espesor y poros en cascos metálicos de buques.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Romero Ruiz

DIRECTORES: Gerardo González-Cela Echevarría

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis del empleo de técnicas de acústica avanzada para la identificación y caracterización de pérdidas de espesor y poros en cascos metálicos de buques.

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En un contexto marcado por el aumento de situaciones de riesgo en el entorno marítimo, tanto por accidentes como por conflictos armados, la mejora de la seguridad interior a bordo de los buques se ha convertido en una prioridad. En este escenario, tecnologías como **Scan & Paint**, que permiten realizar análisis acústicos avanzados, cobran especial relevancia. Este equipo es capaz de registrar parámetros como la **velocidad de partícula** y generar **mapas acústicos** que ayudan a identificar posibles anomalías estructurales, como la presencia de pequeños **orificios** en superficies metálicas. Durante el desarrollo del proyecto, se llevan a cabo múltiples ensayos sobre una chapa metálica perforada con orificios de diferentes tamaños realizando barridos de la sonda a distintas distancias. El análisis conjunto de los **espectrogramas** y los mapas acústicos permiten identificar patrones asociados a la presencia de los orificios. A partir de estas observaciones, se extraen tendencias que permiten predecir la detectabilidad de los defectos en función de su tamaño. Los resultados alcanzados a lo largo de este trabajo han permitido extraer una serie de conclusiones y trazar unas líneas futuras que abren la puerta a la implementación de estas técnicas de acústica avanzada en los buques de la Armada.

PALABRAS CLAVE

Scan & Paint, Velocidad de partícula, Mapas acústicos, Orificios, Espectrograma

AGRADECIMIENTOS

En esta parte me gustaría dar las gracias primero a Dios, por darme la fuerza de sacar esto adelante. A mi familia, por estar siempre, por su apoyo y por los ánimos. A mi novia, que se ha ganado el cielo aguantándome. A mi tutor, por no perder la fe en que lo sacábamos adelante, gracias por responderme a los correos. A toda mi promoción, gracias por estos últimos cinco años de risas, sobrevivimos. Por último, a mis amigos, en especial a los Bonsais, ese grupo de leyendas que nació en el Juan Sebastián de Elcano y se ha convertido en una gran familia. Gracias por los buenos ratos y las anécdotas. Ojalá sigamos rememorando historias y creando nuevas durante mucho tiempo, os quiero.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	11
Nomenclatura	12
1 Motivación y objetivos	13
1.1 Motivación	13
1.2 Objetivos	13
1.3 Estructura de trabajo	14
2 Estado del arte	15
2.1 Conceptos fundamentales de acústica	15
2.1.1 La onda sonora: generación	15
2.1.2 Características de la onda sonora.....	16
2.1.3 Las magnitudes acústicas: Potencia, presión e intensidad sonora	18
2.1.4 Tipos de ruido	21
2.1.5 Velocidad de partícula	22
2.2 Equipo de acústica avanzada Scan & Paint	23
2.2.1 Elementos del equipo.....	24
2.2.2 Proceso para la obtención de datos acústicos y su posterior análisis	29
2.2.3 Ventajas y novedades del software Scan & Paint.....	32
2.2.4 Aplicaciones en los sectores automovilístico, aeronáutico y naval	33
3 Casos de estudio	37
3.1 Fundamentos teóricos	37
3.1.1 Aplicación práctica: Cálculo de caudales	37
3.2 Mediciones realizadas sobre la chapa	38
3.3 Diagnóstico: Análisis de los resultados en el laboratorio	41
3.3.1 Análisis orificio de 4 mm pasando a diferentes distancias (tapado y sin tapar)	42
3.3.2 Análisis orificio de 8 mm pasando a diferentes distancias (sin tapar).....	43
3.3.3 Análisis orificio de 8 mm pasando a diferentes distancias (tapado).....	44
3.3.4 Análisis orificio de 14 mm pasando a diferentes distancias (sin tapar).....	45
3.3.5 Análisis orificio de 14 mm pasando a diferentes distancias (tapado).....	46
3.3.6 Análisis orificio de 20 mm pasando a diferentes distancias (sin tapar).....	47
3.3.7 Análisis orificio de 20 mm pasando a diferentes distancias (tapado).....	48
3.3.8 Análisis del barrido de la sonda pasando sobre el orificio (sin tapar)	49

3.3.9 Análisis del barrido de la sonda pasando sobre el orificio (tapado)	50
3.3.10 Análisis del barrido de la sonda pasando a 2 cm del orificio (sin tapar)	51
3.3.11 Análisis del barrido de la sonda pasando a 2 cm del orificio (tapado)	52
3.3.12 Análisis del barrido de la sonda pasando a 4 cm del orificio (sin tapar)	53
3.3.13 Análisis del barrido de la sonda pasando a 4 cm del orificio (tapado)	54
3.3.14 Análisis del barrido de la sonda pasando a 8 cm del orificio (sin tapar)	55
3.3.15 Análisis del barrido de la sonda pasando a 8 cm del orificio (tapado)	56
3.3.16 Análisis del barrido de la sonda pasando por encima del orificio de 8 mm (tapado y sin tapar).....	57
3.3.17 Análisis del barrido de la sonda pasando por encima del orificio de 14 mm (tapado y sin tapar).....	58
3.3.18 Análisis del barrido de la sonda pasando por encima del orificio de 20 mm (tapado y sin tapar).....	58
3.4 Tendencias observadas.....	59
4 Conclusiones y líneas futuras	60
4.1 Conclusiones	60
4.2 Líneas futuras	61
5 Bibliografía.....	62
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	65
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	66
Anexo III: Fichas de ensayos	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Generación onda sonora ([2])	15
Figura 2-2 Amplitud de una onda sonora ([4]).....	16
Figura 2-3: Relación entre frecuencia y longitud de onda ([6])	17
Figura 2-4 El sonido se propaga esféricamente desde una fuente puntual en ausencia de obstáculos ([13])	18
Figura 2-5 Área de audición, área entre el umbral de silencio y el umbral de dolor ([16])	19
Figura 2-6 Curvas isofónicas ([18])	20
Figura 2-7 Curvas de ponderación ([19])	21
Figura 2-8 Diferencias de tipos de ruidos ([24])	22
Figura 2-9 Foto del montaje (izquierda), mapas acústicos de presión (superior derecha), velocidad de partícula (centro derecha), mapa de las posiciones recorridas durante los escaneos (inferior derecha)	23
Figura 2-10 Sonda Microflow P-U, estructura interna y cables del sensor de velocidad de partículas ([27])	24
Figura 2-11 Representación de medidas de presión y velocidad de partícula con sonda P-U ([30])	25
Figura 2-12 MFPA-2 por delante y por detrás ([33])	25
Figura 2-13 Scout V-2 ([34]).....	26
Figura 2-14 Pestaña HW Setup de Scan & Paint (Elaboración propia)	26
Figura 2-15 Pestaña Capture de Scan & Paint (Elaboración propia)	27
Figura 2-16 Pestaña Process de Scan & Paint (Elaboración propia).....	27
Figura 2-17 Pestaña Analyse de Scan & Paint (Elaboración propia).....	28
Figura 2-18 Componentes Scan & Paint ([35]).....	29
Figura 2-19 Método de medición ([35]).....	29
Figura 2-20 Proceso de discretización espacial ([26])	30
Figura 2-21 División del espacio en celdas ([7]).....	30
Figura 2-22 Método de cuadrícula de Scan & Paint con tamaño de bloque de 20cm (Elaboración propia)	31
Figura 2-23 Visualización de los diferentes métodos de medición ([7]).....	32
Figura 2-24 Comparación de los mapas acústicos de baja frecuencia radiada entre diferentes embarcaciones ([31]).....	33
Figura 2-25 Mapeo acústico de la cabina de la aeronave ([26]).....	34
Figura 2-26 Representación de la fuga acústica artificial en la ventana trasera del vehículo ([36]).....	35
Figura 2-27 Mapa acústico a 40 km/h en el rango de 200 Hz - 2 kHz ([36]).....	35
Figura 2-28 Mapa acústico a 40 km/h en el rango de 2 kHz - 10 kHz ([36]).....	35

Figura 2-29 Distribución de la velocidad de partícula en el interior del vehículo con altavoz externo (200 Hz - 2 kHz) ([36])	36
Figura 2-30 Distribución de la velocidad de partícula en el interior del vehículo con altavoz externo (2 kHz - 10 kHz) ([36])	36
Figura 3-1 Configuración inicial de ensayo acústico en chapa sin fresado (Elaboración propia) ...	38
Figura 3-2 Chapa con fresado central realizado (Elaboración propia)	39
Figura 3-3 Chapa con orificio de 8mm perforado y marcas de referencia (Elaboración propia)	39
Figura 3-4 Montaje equipo para realización de ensayos (Elaboración propia)	40
Figura 3-5 Chapa metálica con orificio de 20mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	40
Figura 3-6 Mapas acústicos para el orificio de 4 mm (Elaboración propia)	42
Figura 3-7 Espectrogramas para el orificio de 4 mm (Elaboración propia)	42
Figura 3-8 Mapas acústicos para el orificio de 8 mm sin tapar (Elaboración propia)	43
Figura 3-9 Espectrogramas para el orificio de 8 mm sin tapar (Elaboración propia)	43
Figura 3-10 Mapas acústicos para el orificio de 8 mm tapado (Elaboración propia)	44
Figura 3-11 Espectrogramas para el orificio de 8 mm tapado (Elaboración propia)	44
Figura 3-12 Mapas acústicos para el orificio de 14 mm sin tapar (Elaboración propia)	45
Figura 3-13 Espectrogramas para el orificio de 14 mm sin tapar (Elaboración propia)	45
Figura 3-14 Mapas acústicos para el orificio de 14 mm tapado (Elaboración propia)	46
Figura 3-15 Espectrogramas para el orificio de 14 mm tapado (Elaboración propia)	46
Figura 3-16 Mapas acústicos para el orificio de 20 mm sin tapar (Elaboración propia)	47
Figura 3-17 Espectrogramas para el orificio de 20 mm sin tapar (Elaboración propia)	47
Figura 3-18 Mapas acústicos para el orificio de 20 mm tapado (Elaboración propia)	48
Figura 3-19 Espectrogramas para el orificio de 20 mm tapado (Elaboración propia)	48
Figura 3-20 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del agujero sin tapar (Elaboración propia)	49
Figura 3-21 Espectrogramas con la sonda pasando por encima del agujero sin tapar (Elaboración propia)	49
Figura 3-22 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del agujero tapado (Elaboración propia)	50
Figura 3-23 Espectrogramas con la sonda pasando por encima del agujero tapado (Elaboración propia)	50
Figura 3-24 Mapas acústicos con la sonda pasando a 2 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)	51
Figura 3-25 Espectrogramas con la sonda pasando a 2 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)	51
Figura 3-26 Mapas acústicos con la sonda pasando a 2 cm del agujero tapado (Elaboración propia)	52
Figura 3-27 Espectrogramas con la sonda pasando a 2 cm del agujero tapado (Elaboración propia)	52

Figura 3-28 Mapas acústicos con la sonda pasando a 4 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)	53
Figura 3-29 Espectrogramas con la sonda pasando a 4 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)	53
Figura 3-30 Mapas acústicos con la sonda pasando a 4 cm del agujero tapado (Elaboración propia)	54
Figura 3-31 Espectrogramas con la sonda pasando a 4 cm del agujero tapado (Elaboración propia)	54
Figura 3-32 Mapas acústicos con la sonda pasando a 8 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)	55
Figura 3-33 Espectrogramas con la sonda pasando a 8 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)	55
Figura 3-34 Mapas acústicos con la sonda pasando a 8 cm del agujero tapado (Elaboración propia)	56
Figura 3-35 Espectrogramas con la sonda pasando a 8 cm del agujero tapado (Elaboración propia)	56
Figura 3-36 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del orificio de 8 mm (Elaboración propia)	57
Figura 3-37 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del orificio de 14 mm (Elaboración propia)	58
Figura 3-38 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del orificio de 20 mm (Elaboración propia)	58
Figura 3-39 Relación aproximada entre el diámetro del orificio y la distancia de barrido máxima a la que puede ser detectado (Elaboración propia)	59
Figura A3- 1 Chapa metálica con orificio de 4 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	68
Figura A3- 2 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	68
Figura A3- 3 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	68
Figura A3- 4 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	68
Figura A3- 5 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	68
Figura A3- 6 Chapa metálica con orificio de 4 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	69
Figura A3- 7 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm pasando a 2cm del agujero. (Elaboración propia)	69
Figura A3- 8 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	69
Figura A3- 9 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	69
Figura A3- 10 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	69
Figura A3- 11 Chapa metálica con orificio de 4 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	70
Figura A3- 12 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm pasando a 4cm del agujero. (Elaboración propia)	70
Figura A3- 13 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	70

Figura A3- 14 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	70
Figura A3- 15 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	70
Figura A3- 16 Chapa metálica con orificio de 4 mm tapado en el centro. (Elaboración propia).....	71
Figura A3- 17 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm tapado pasando por encima del agujero. (Elaboración propia).....	71
Figura A3- 18 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	71
Figura A3- 19 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	71
Figura A3- 20 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	71
Figura A3- 21 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	72
Figura A3- 22 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)	72
Figura A3- 23 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	72
Figura A3- 24 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	72
Figura A3- 25 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	72
Figura A3- 26 Chapa metálica con orificio de 8mm perforado en el centro. (Elaboración propia).	73
Figura A3- 27 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)	73
Figura A3- 28 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	73
Figura A3- 29 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	73
Figura A3- 30 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	73
Figura A3- 31 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	74
Figura A3- 32 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando a 4cm del agujero. (Elaboración propia)	74
Figura A3- 33 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	74
Figura A3- 34 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	74
Figura A3- 35 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	74
Figura A3- 36 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	75
Figura A3- 37 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	75
Figura A3- 38 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	75
Figura A3- 39 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	75
Figura A3- 40 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	75
Figura A3- 41 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia).....	76
Figura A3- 42 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando justo por encima del agujero. (Elaboración propia)	76
Figura A3- 43 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	76
Figura A3- 44 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	76
Figura A3- 45 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	76

Figura A3- 46 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia).....	77
Figura A3- 47 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)	77
Figura A3- 48 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	77
Figura A3- 49 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	77
Figura A3- 50 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	77
Figura A3- 51 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia).....	78
Figura A3- 52 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando a 4cm del agujero. (Elaboración propia)	78
Figura A3- 53 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	78
Figura A3- 54 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	78
Figura A3- 55 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	78
Figura A3- 56 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia).....	79
Figura A3- 57 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	79
Figura A3- 58 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	79
Figura A3- 59 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	79
Figura A3- 60 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	79
Figura A3- 61 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	80
Figura A3- 62 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	80
Figura A3- 63 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	80
Figura A3- 64 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	80
Figura A3- 65 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	80
Figura A3- 66 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	81
Figura A3- 67 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)	81
Figura A3- 68 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	81
Figura A3- 69 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	81
Figura A3- 70 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	81
Figura A3- 71 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	82
Figura A3- 72 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)	82
Figura A3- 73 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	82
Figura A3- 74 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	82

Figura A3- 75 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	82
Figura A3- 76 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	83
Figura A3- 77 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	83
Figura A3- 78 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	83
Figura A3- 79 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	83
Figura A3- 80 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	83
Figura A3- 81 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)...	84
Figura A3- 82 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando por encima del agujero. (Elaboración propia).....	84
Figura A3- 83 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	84
Figura A3- 84 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	84
Figura A3- 85 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	84
Figura A3- 86 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)...	85
Figura A3- 87 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)	85
Figura A3- 88 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	85
Figura A3- 89 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	85
Figura A3- 90 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	85
Figura A3- 91 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)...	86
Figura A3- 92 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)	86
Figura A3- 93 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	86
Figura A3- 94 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	86
Figura A3- 95 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ...	86
Figura A3- 96 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)...	87
Figura A3- 97 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	87
Figura A3- 98 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	87
Figura A3- 99 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	87
Figura A3- 100 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ..	87
Figura A3- 101 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	88
Figura A3- 102 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)	88
Figura A3- 103 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	88
Figura A3- 104 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	88
Figura A3- 105 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia) ..	88

Figura A3- 106 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	89
Figura A3- 107 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)	89
Figura A3- 108 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	89
Figura A3- 109 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	89
Figura A3- 110 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	89
Figura A3- 111 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	90
Figura A3- 112 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)	90
Figura A3- 113 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	90
Figura A3- 114 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	90
Figura A3- 115 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	90
Figura A3- 116 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	91
Figura A3- 117 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	91
Figura A3- 118 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	91
Figura A3- 119 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	91
Figura A3- 120 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	91
Figura A3- 121 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	92
Figura A3- 122 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)	92
Figura A3- 123 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	92
Figura A3- 124 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	92
Figura A3- 125 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	92
Figura A3- 126 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	93
Figura A3- 127 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)	93
Figura A3- 128 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	93
Figura A3- 129 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	93
Figura A3- 130 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	93
Figura A3- 131 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	94
Figura A3- 132 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)	94
Figura A3- 133 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	94
Figura A3- 134 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	94
Figura A3- 135 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	94
Figura A3- 136 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	95

Figura A3- 137 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	95
Figura A3- 138 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	95
Figura A3- 139 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia).....	95
Figura A3- 140 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de la sonda Microflown P-U ([29])	24
Tabla 2-2 Ventajas del software Scan & Paint (Elaboración propia).....	32
Tabla 3-1 Caudal de entrada y tiempo de inundación según tipo de orificio (Elaboración propia).38	
Tabla A3- 1 Matriz de ensayos (Elaboración propia)	67

NOMENCLATURA

dB = Decibelio

Hz: Hercio

°C = Grados Centígrados

W = Vatios

Pa = Pascales

PU = Pressure and Particle Velocity

USB = Universal Serial Bus

MFPA = Microflown Preamplifier

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

La evolución de la ingeniería acústica ha dado lugar a técnicas avanzadas capaces de identificar y caracterizar fuentes de ruido y vibraciones con gran precisión. Ferrari, Porsche, Airbus, Dassault o incluso la Agencia Espacial Europea aplican técnicas de acústica avanzada buscando mejorar la calidad de sus productos e incrementar la eficiencia de los programas de mantenimiento. La Armada no puede ser ajena al empleo estratégico de estas técnicas para evaluar las condiciones operativas de los buques de la flota.

En el ámbito naval, garantizar la integridad estructural de los cascos metálicos de los buques es una prioridad de primer orden. Uno de los problemas más peligrosos es la existencia de pérdidas de espesor y poros que permitan la entrada de agua al interior del buque. La detección temprana de estos defectos resulta crucial para evitar fallos mayores, pero los métodos de inspección convencionales como ensayos por ultrasonido de muestreo directo o inspecciones visuales suelen ser laboriosos, costosos y no siempre logran identificar a tiempo las anomalías más sutiles. En este contexto, el presente TFG, con trabajos principalmente de laboratorio, pretende evaluar la posible detección de poros o pérdidas de espesor en la chapa del casco de un buque mediante las citadas técnicas de acústica avanzada.

A partir de este trabajo experimental, se sientan las bases para desarrollar un protocolo de inspección que la Armada podría adoptar en el futuro para evaluar de forma más eficaz el estado operativo de los cascos de sus buques.

1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene como propósito principal explorar el potencial de las técnicas de acústica avanzada con el software *Scan & Paint*. La idea es comprobar hasta qué punto esta herramienta, puede ayudar a localizar orificios de distintos tamaños en una superficie, como es en este caso una chapa metálica interpretando los mapas acústicos que genera. A través de ellos, se trata de identificar la presencia y ubicación de pequeñas aberturas.

El enfoque va un poco más allá del simple hecho de detectar. Lo interesante está en ver si existe una tendencia que permita predecir resultados. Así, otro de los objetivos consiste en analizar la sensibilidad de la sonda. En particular, se estudia la influencia de la distancia de barrido del sensor con respecto al agujero, con el fin de identificar posibles umbrales de detección en función de su diámetro.

1.3 Estructura de trabajo

Este Trabajo de Fin de Grado se organiza en varias secciones bien definidas, con el objetivo de garantizar una exposición clara y comprensible para el lector.

En primer lugar, se aborda la relevancia de preservar la integridad estructural de los cascos metálicos en buques, una cuestión fundamental para la seguridad en el transporte marítimo. Este trabajo surge de la necesidad de disponer de herramientas innovadoras que permitan detectar y analizar de manera precisa defectos como pérdidas de espesor y poros en estas estructuras críticas. En este contexto, se resalta el valor de las técnicas de acústica avanzada, que no solo ofrecen mayor exactitud en los diagnósticos, sino que también reducen los tiempos y costos asociados a las inspecciones tradicionales. Además, se establecen los objetivos principales de este proyecto, que incluyen la evaluación del método *Scan & Paint* y su viabilidad para estas aplicaciones.

A continuación, se introducen los principios básicos de la acústica que sustentan este trabajo. Se explican los conceptos de las ondas sonoras, su generación y sus características principales, como la presión acústica, la intensidad y la velocidad de partícula. También se discute la naturaleza del ruido y su clasificación, aspectos esenciales para comprender el análisis realizado. Por otro lado, se detallan magnitudes acústicas clave como el decibelio, las curvas isofónicas y las curvas de ponderación, que son fundamentales para interpretar los resultados obtenidos en este estudio. Finalmente, se describe en profundidad el parámetro de velocidad de partícula, enfatizando su relevancia en la caracterización del campo acústico y las diferencias con respecto a la presión sonora.

El siguiente apartado se dedica al software *Scan & Paint*, una técnica clave en el desarrollo de este trabajo. Se describe su funcionamiento, basado en el uso del sensor de velocidad de partícula que es desplazado manualmente mientras un sistema de vídeo registra las mediciones. Esto permite generar mapas acústicos detallados, representando las características del campo sonoro. Asimismo, se destacan sus ventajas respecto a otros métodos, como su facilidad de implementación, su flexibilidad y su capacidad para ofrecer una resolución espacial elevada. También se mencionan diversos ejemplos de aplicación de esta tecnología, desde la localización de fuentes de ruido hasta la evaluación de materiales y estructuras.

La fase de desarrollo incluye una serie de experimentos llevados a cabo en una chapa dentro de los laboratorios del Centro Universitario de la Defensa. Durante esta etapa, se emplea el software de *Scan & Paint* para realizar mediciones acústicas detalladas, cuyos resultados se procesan para identificar y mapear las áreas afectadas. Este análisis trata de localizar con precisión defectos, en concreto, orificios de distinto tamaño.

Finalmente, las conclusiones recogen los hallazgos más relevantes de este trabajo. Se resalta la efectividad del método *Scan & Paint* para la detección de defectos estructurales. También se plantean líneas futuras de investigación destinadas a ampliar las capacidades de esta tecnología y su aplicación en la industria naval.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Conceptos fundamentales de acústica

Gracias a la forma en la que el sonido se propaga por los cascos de los buques, es posible identificar señales que revelan desde pérdidas de espesor hasta pequeños poros que, si no se detectan a tiempo, podrían comprometer tanto la integridad como el funcionamiento del barco. Para poder aplicar técnicas de acústica avanzada con eficacia en este contexto, resulta esencial detenerse primero en los fundamentos físicos que rigen el fenómeno sonoro: cómo se genera una onda, de qué manera viaja por distintos medios y qué propiedades determinan su interacción con una estructura metálica. Solo así se puede entender por qué una variación mínima en el material o en su geometría altera la respuesta acústica, y cómo esta alteración puede ser interpretada como un indicio de daño o debilidad estructural.

2.1.1 La onda sonora: generación

La onda sonora es una perturbación mecánica que se origina a partir de la vibración de un cuerpo y se propaga a través de un medio elástico en forma de variaciones de presión. Su origen se encuentra en una perturbación inicial que induce oscilaciones en las partículas del medio, generando un movimiento ondulatorio que se desplaza a lo largo de la estructura en estudio. En el contexto naval, este fenómeno es particularmente relevante, ya que las ondas acústicas pueden utilizarse para detectar alteraciones en la continuidad del material, como grietas o corrosión, a través del análisis de su propagación y atenuación en distintas superficies metálicas. [1]

En un medio como el acero naval o el agua, la propagación de la onda sonora ocurre en forma de ondas longitudinales, en las que la dirección del movimiento de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda. Estas ondas provocan ciclos alternos de compresión y rarefacción en el medio, lo que puede observarse en la *Figura 2-1*, donde se representa esquemáticamente el proceso de transmisión de una onda sonora en un medio sólido.

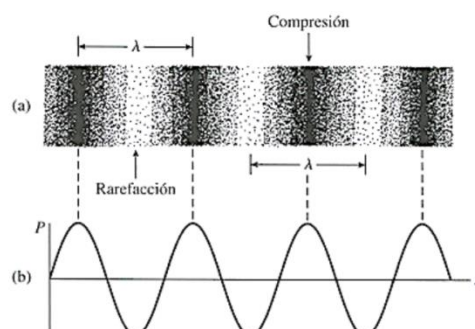


Figura 2-1 Generación onda sonora ([2])

2.1.2 Características de la onda sonora

Las ondas sonoras son perturbaciones mecánicas que se propagan a través de medios materiales, como gases, líquidos o sólidos, y se caracterizan por una serie de propiedades físicas fundamentales que determinan su comportamiento y la forma en que las percibimos. Estas propiedades incluyen la amplitud, la frecuencia, la longitud de onda, la velocidad de propagación, la intensidad, el timbre y la duración. Cada una de estas características juega un papel fundamental en la descripción y análisis de las ondas acústicas, lo que resulta clave para su aplicación en técnicas de acústica avanzada utilizadas en la identificación y caracterización de pérdidas de espesor y poros en los cascos metálicos de los buques. [3]

La amplitud de una onda sonora se refiere al desplazamiento máximo de las partículas del medio desde su posición de equilibrio debido a la propagación de la onda. Esta magnitud está directamente relacionada con la intensidad del sonido: a mayor amplitud, mayor será la intensidad percibida. La intensidad sonora se mide en decibelios (dB), una escala logarítmica que permite representar de manera más manejable la amplia gama de intensidades audibles por el ser humano. [4]

El umbral de audición humana comienza alrededor de 0 dB, mientras que niveles superiores a 120 dB pueden causar daño auditivo irreversible.[3] En la Figura 2-2, se observa una representación gráfica de una onda sonora, donde la amplitud se indica como la distancia vertical máxima desde la posición de equilibrio (línea central) hasta la cresta (punto más alto) o el valle (punto más bajo) de la onda. Esta medida está directamente relacionada con la intensidad o volumen del sonido: una mayor amplitud corresponde a un sonido más fuerte, mientras que una menor amplitud indica un sonido más suave.

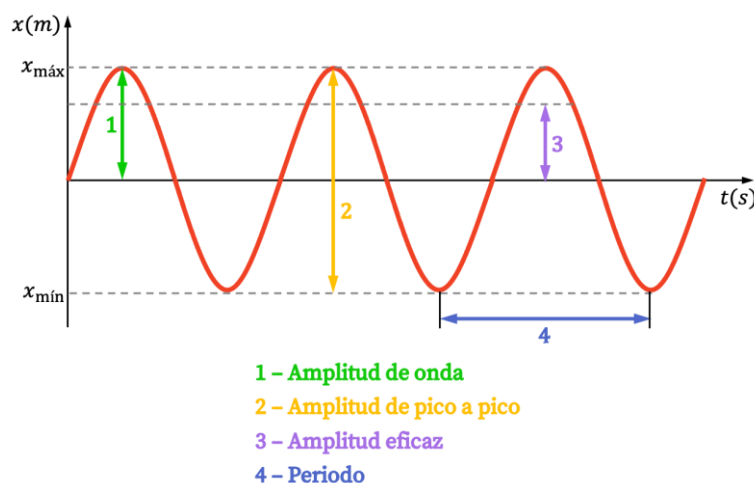


Figura 2-2 Amplitud de una onda sonora ([4])

La frecuencia es el número de ciclos completos que una onda realiza por segundo y se mide en hercios (Hz). Esta propiedad determina el tono del sonido: frecuencias altas se perciben como sonidos agudos, mientras que frecuencias bajas se perciben como sonidos graves. [5] El rango de audición humano típicamente abarca desde 20 Hz hasta 20.000 Hz, y dentro de este espectro se diferencian tres bandas de frecuencia:

- Frecuencias bajas (<500 Hz): generan sonidos graves, con ondas de gran longitud. [5]
- Frecuencias medias (500 Hz - 2.000 Hz): engloban la mayoría de sonidos de la voz humana. [5]
- Frecuencias altas (>2.000 Hz): sonidos agudos, con ondas de menor longitud. [5]

La relación entre la frecuencia y la longitud de onda (λ) se expresa mediante la ecuación fundamental

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2-1)$$

Donde:

- λ : Longitud de onda.
- v : Velocidad del sonido en el medio.
- f : Frecuencia de la onda.

Esta ecuación indica que, a mayor frecuencia, la longitud de onda es menor, y viceversa. En la *Figura 2-3*, se ilustra cómo varía la longitud de onda en función de la frecuencia de la onda sonora.

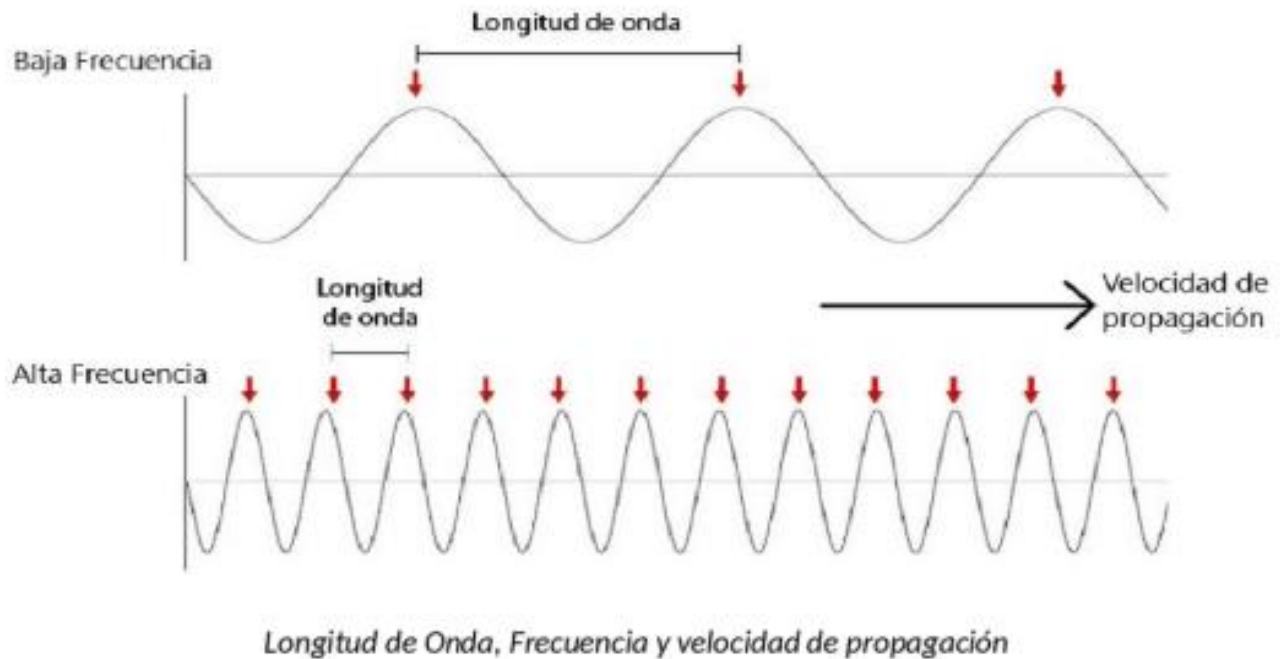


Figura 2-3: Relación entre frecuencia y longitud de onda ([6])

La velocidad de propagación de una onda sonora depende del medio a través del cual se desplaza. En el aire, a temperatura ambiente (20°C), la velocidad del sonido es aproximadamente 343 m/s, mientras que, en medios más densos, como el agua y los sólidos, la velocidad es considerablemente mayor. En el agua, por ejemplo, la velocidad del sonido es de 1480 m/s, y en el acero puede alcanzar hasta 5960 m/s. [7]

Esta diferencia se debe a que la velocidad del sonido está determinada por la densidad y la elasticidad del medio, según la ecuación de propagación:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2-2)$$

Donde:

- v : Velocidad del sonido.
- B : Módulo de elasticidad del medio.
- ρ : Densidad del medio.

La importancia de la velocidad de propagación radica en la precisión de técnicas acústicas avanzadas utilizadas en aplicaciones como la evaluación de estructuras de cascos metálicos de buques, donde la detección de defectos depende de la correcta caracterización de la propagación del sonido en el material analizado. [8]

Además de los conceptos mencionados en los párrafos anteriores, también son importantes para entender bien la onda sonora las siguientes características:

- **Duración:** Tiempo durante el cual se mantiene una onda sonora antes de extinguirse. Es un parámetro clave en el análisis acústico, ya que influye en la percepción de ecos y reverberaciones en distintos entornos. En espacios cerrados, como compartimentos de buques, la duración de un sonido puede estar determinada por las propiedades del material y su capacidad de absorción o reflexión del sonido. [9]
- **Tono:** Cualidad del sonido que permite diferenciar si es más grave o más agudo. Está directamente relacionado con la frecuencia de la onda sonora, de modo que a medida que la frecuencia aumenta, el sonido se percibe como más agudo, mientras que una menor frecuencia genera un sonido más grave. [10]
- **Intensidad:** Determinada por la amplitud de la onda sonora, mencionada previamente. Es la característica que permite diferenciar si un sonido se percibe como intenso y potente o, por el contrario, como débil y tenue. [10]

2.1.3 Las magnitudes acústicas: Potencia, presión e intensidad sonora

En el estudio de la propagación acústica en los cascos metálicos de buques, es fundamental comprender las magnitudes acústicas básicas: potencia sonora, intensidad sonora y presión sonora. Estas tres propiedades permiten caracterizar el comportamiento de las ondas acústicas en diferentes medios y su interacción con las estructuras del casco del buque.

A continuación, se definen las tres magnitudes acústicas fundamentales:

- **Potencia sonora:** Hace referencia a la cantidad total de energía que una fuente es capaz de emitir por unidad de tiempo. Este valor es característico de la propia fuente y no se ve afectado ni por el entorno ni por la forma en la que el sonido se propaga. Su unidad de medida es el vatio (W) y permanece constante en el tiempo. [11]

Como se ilustra en la Figura 2-4, la potencia sonora se propaga en forma de ondas esféricas desde la fuente emisora, mostrando una distribución uniforme en un medio homogéneo. [12]

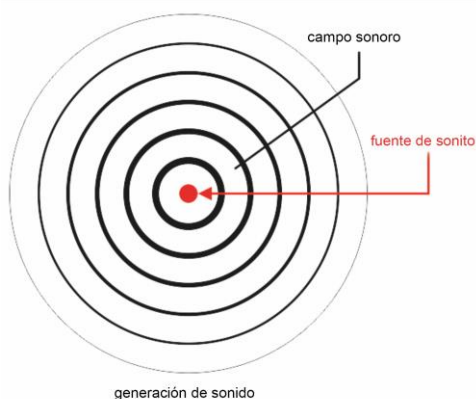


Figura 2-4 El sonido se propaga esféricamente desde una fuente puntual en ausencia de obstáculos ([13])

- **Intensidad sonora:** Expresa cuánta energía atraviesa una superficie determinada en una dirección perpendicular al sentido de propagación de la onda. Se calcula como la potencia distribuida por unidad de superficie y, por tanto, se mide en W/m². A diferencia de la potencia, sí está influida por factores como la distancia a la fuente y el medio por el que se transmite el sonido. [14] Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m²) y se calcula mediante la expresión:

$$I = \frac{W}{S} \quad (2-3)$$

Donde W es la potencia emitida y S la superficie a través de la cual se propaga la onda sonora.

- **Presión sonora:** Se define como la variación que sufre la presión en un punto del medio a causa del paso de la onda sonora, es decir, la diferencia respecto a la presión atmosférica en reposo. Esta magnitud depende tanto de la distancia a la fuente emisora como de las propiedades del entorno, y se expresa en pascales (N/m^2). [14]

Para comprender la interdependencia entre estas magnitudes acústicas, es fundamental analizar cómo se comporta una fuente emisora de sonido en distintos entornos. Por ejemplo, un motor a reacción en funcionamiento genera una potencia sonora determinada, que corresponde a la cantidad total de energía acústica que emite por unidad de tiempo. Sin embargo, la presión sonora que se percibe en diferentes ubicaciones no será la misma, ya que dependerá de la distancia y del entorno en el que se propague el sonido. En un espacio abierto, la energía sonora se dispersa uniformemente, mientras que, en un entorno cerrado, como un hangar, las reflexiones pueden generar un aumento significativo de la presión en determinadas zonas. [15]

La relación matemática entre estas magnitudes se puede expresar mediante la ecuación de la intensidad sonora, que se define como la potencia dividida por la superficie a través de la cual se propaga la onda. Esto implica que, si bien la potencia sonora de una fuente es constante, la intensidad disminuye a medida que la onda se expande en el espacio. Este fenómeno es clave en el diseño acústico de espacios confinados, donde la reflexión de las ondas puede influir en la percepción del sonido. [16]

Dado que la amplitud de los valores de presión sonora es extremadamente grande, se emplea una escala logarítmica para representar estos valores de forma más manejable. El umbral de audición del oído humano se encuentra en torno a $(2 \times 10^{-5}) \text{ N/m}^2$, mientras que el umbral del dolor alcanza aproximadamente los 20 N/m^2 . Para expresar estos valores de manera más comprensible, se utiliza la escala de decibelios (dB), definida por la ecuación:

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (2-4)$$

Donde L_p es el nivel de presión sonora en decibelios, p es la presión medida y p_0 es la presión de referencia (2×10^{-5}) Pa. Como se ilustra en la siguiente imagen (Figura 2-5), los valores en decibelios permiten una representación más manejable de la percepción auditiva, abarcando desde el umbral de audición hasta niveles peligrosos para el sistema auditivo. [17] También se indican las áreas abarcadas por la música y el habla, así como el límite de riesgo de daño. La escala del eje de ordenadas no solo se expresa en nivel de presión sonora, sino también en intensidad sonora. La parte punteada del umbral en silencio proviene de sujetos que frecuentemente escuchan música a un volumen muy alto.

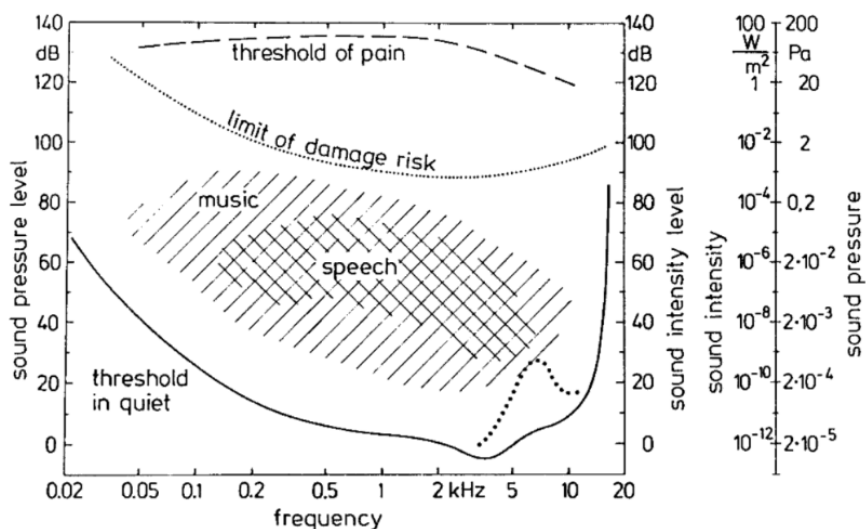


Figura 2-5 Área de audición, área entre el umbral de silencio y el umbral de dolor ([16])

Un aspecto interesante de esta escala es que los valores en decibelios no se pueden sumar directamente. Si se tienen dos fuentes sonoras que emiten cada una 90 dB, la combinación no resultará en 180 dB, sino en aproximadamente 93 dB. Este comportamiento se debe a la forma en la que la intensidad acústica se combina logarítmicamente, lo que demuestra que el sonido no se suma de manera lineal sino exponencial. [12]

Además, la percepción auditiva humana no responde de manera uniforme a todas las frecuencias. Las denominadas curvas isofónicas (*Figura 2-6*) ilustran que las frecuencias bajas y altas requieren mayores niveles de presión sonora para ser percibidas con la misma intensidad que las frecuencias medias. En otras palabras, un sonido grave o muy agudo debe ser significativamente más intenso para ser percibido con la misma claridad que un sonido en el rango de los 1000 Hz, frecuencia en la que el oído humano es más sensible. [12]

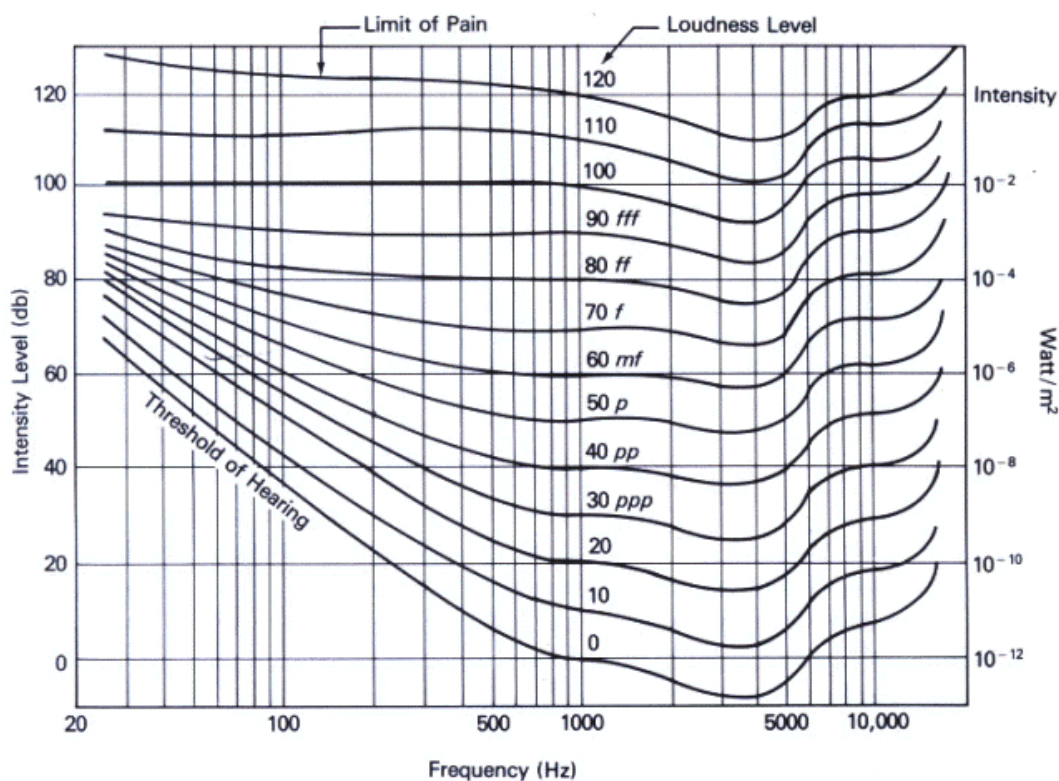


Figura 2-6 Curvas isofónicas ([18])

Para lograr mediciones acústicas más alineadas con la percepción del oído humano, se han desarrollado diversas curvas de ponderación. Estas curvas ajustan la respuesta de los instrumentos de medición a la sensibilidad del oído en función del nivel de presión sonora. Las más utilizadas en el análisis acústico son las ponderaciones A, B y C. [19]

La ponderación A es la más empleada y se utiliza para evaluar ruidos de fondo y ambientales, ya que atenúa las frecuencias bajas y altas, reflejando mejor la respuesta del oído humano a niveles bajos de sonido. Por otro lado, la ponderación B es más adecuada para niveles intermedios de presión sonora y se aplica principalmente en la medición de música y sonidos recreativos. Finalmente, la ponderación C es la más precisa para sonidos de alto nivel, como aquellos presentes en entornos industriales o en estudios de impacto acústico. [19]

El uso de estas curvas es fundamental para garantizar mediciones que reflejen la realidad perceptual del sonido. [20] En la *Figura 2-7* se pueden observar las diferencias entre estas curvas, evidenciando cómo cada una responde de manera diferente a las frecuencias sonoras, permitiendo ajustar las mediciones a las condiciones específicas del entorno y del tipo de ruido a evaluar. cómo cada una responde de manera diferente a las frecuencias sonoras.

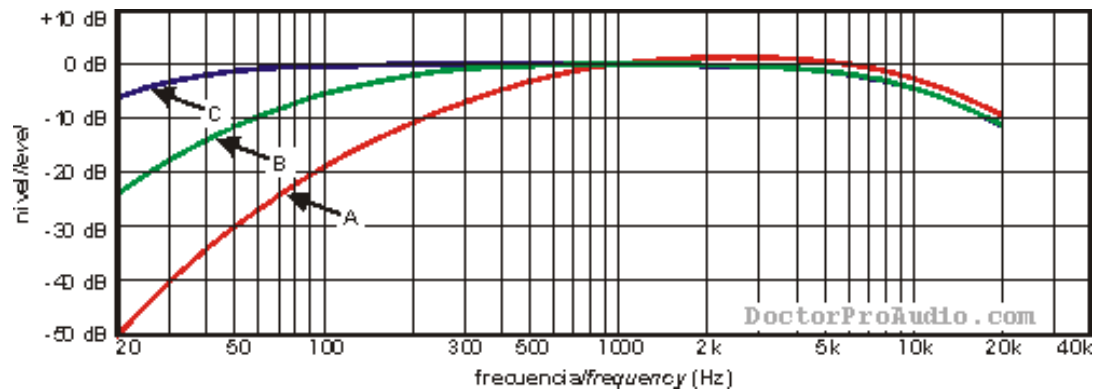


Figura 2-7 Curvas de ponderación ([19])

El estudio de la potencia, la presión y la intensidad sonora es esencial para comprender cómo se propaga el sonido en diferentes entornos y cómo es percibido por el oído humano. La utilización de escalas logarítmicas permite representar de manera más efectiva la percepción auditiva, mientras que las curvas isofónicas y de ponderación proporcionan herramientas para ajustar la medición del sonido en función de las características del sistema auditivo. Estos conceptos son de gran relevancia en múltiples disciplinas, desde la ingeniería acústica hasta la salud ocupacional, donde una medición adecuada del sonido es clave para la prevención de daños auditivos y el diseño de espacios acústicamente optimizados. [20]

2.1.4 Tipos de ruido

Comprender los distintos tipos de ruido es fundamental en el análisis de técnicas de acústica avanzada para la identificación y caracterización de pérdidas de espesor y poros en los cascos metálicos de buques. La selección adecuada del tipo de ruido permite optimizar los parámetros de medición, mejorando la sensibilidad, precisión y fiabilidad en la detección de anomalías estructurales. A continuación, se presentan los principales tipos de ruido empleados en este contexto:

- **Ruido Blanco:** El ruido blanco es un sonido constante que contiene todas las frecuencias audibles para el oído humano, cada una con la misma intensidad. Este tipo de ruido se utiliza comúnmente para enmascarar otros sonidos debido a su capacidad para cubrir un amplio espectro de frecuencias. Por ejemplo, el sonido constante y uniforme de un aire acondicionado es una forma de ruido blanco. [21]
- **Ruido rosa:** Similar al ruido blanco, el ruido rosa incluye todas las frecuencias audibles, pero su energía disminuye a medida que aumenta la frecuencia, aproximadamente a razón de 3 dB por octava. Esto significa que las frecuencias más bajas tienen mayor intensidad que las altas, produciendo un sonido más equilibrado y natural. Fenómenos naturales como las olas del mar o la lluvia suave son ejemplos de ruido rosa. Este tipo de ruido se utiliza en aplicaciones como la calibración de equipos de audio y en terapias para mejorar la calidad del sueño. [22]
- **Ruido marrón:** También conocido como ruido rojo o browniano, el ruido marrón tiene una disminución de energía de 6 dB por octava, lo que le confiere una mayor densidad de potencia en las frecuencias bajas. Esto resulta en un sonido más profundo y suave, similar al retumbar de un trueno distante o una cascada. El ruido marrón se utiliza en aplicaciones que requieren énfasis en las frecuencias bajas y para promover la relajación. [23]

Para las pruebas de detección de poros y espesores en cascos metálicos de buques, es fundamental seleccionar el tipo de ruido adecuado que permita una evaluación precisa de las estructuras. El ruido rosa es especialmente útil en estas aplicaciones debido a su distribución espectral equilibrada, que facilita la identificación de irregularidades en una amplia gama de frecuencias. Su energía decreciente en las frecuencias más altas reduce la posibilidad de interferencias no deseadas, mejorando la sensibilidad y precisión de las pruebas de estanqueidad.

A continuación, se presenta una ilustración que compara las características espectrales de los distintos tipos de ruido:

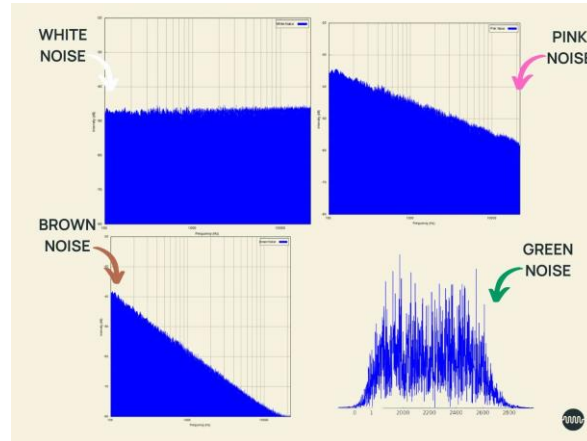


Figura 2-8 Diferencias de tipos de ruidos ([24])

En la *Figura 2-8*, se presentan las diferencias entre los distintos tipos de ruido en función de su espectro de frecuencias. En el eje X se representa el rango de frecuencias audibles, mientras que en el eje Y se muestra la potencia sonora. Se puede observar que, en el caso del ruido rosa, la intensidad disminuye progresivamente a medida que aumenta la frecuencia, lo que lo hace más adecuado para su aplicación en este TFG.

El ruido rosa es particularmente útil ya que presenta un comportamiento espectral más similar al de muchas fuentes de ruido estructural presentes en el entorno marino. Además, su distribución energética permite un análisis más detallado de las respuestas acústicas de las estructuras metálicas, mejorando la sensibilidad y precisión de las mediciones.

2.1.5 Velocidad de partícula

En el estudio de la acústica aplicada a estructuras metálicas, como los cascos de los buques, la velocidad de partícula emerge como un parámetro clave para caracterizar la propagación del sonido en el material y la detección de defectos estructurales. Este concepto se refiere al movimiento local de las partículas del medio en respuesta a la onda sonora, y está directamente relacionado con la presión sonora y la densidad del medio. [25]

La velocidad de partícula ($u(t)$) se define como la derivada temporal del desplazamiento de las partículas en un medio elástico bajo la acción de una onda acústica, expresada matemáticamente como:

$$u(t) = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (2- 5)$$

Donde $\partial \xi$ representa el desplazamiento de la partícula y $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ es su variación en el tiempo. En un campo sonoro, la velocidad de partícula se relaciona con la presión acústica ($p(t)$) mediante la ecuación:

$$u(t) = -\frac{1}{\rho} \int_0^t \frac{\partial p(t)}{\partial n} dt \quad (2- 6)$$

Donde ρ es la densidad del medio y $\frac{\partial p}{\partial n}$ es el gradiente de presión en la dirección normal al desplazamiento.

Existen dos métodos principales para medir la velocidad de partícula. El primero utiliza un sensor *Microflown*, tecnología desarrollada en 1994, capaz de medir la velocidad de partícula en todo el espectro audible con alta precisión. El segundo método consiste en calcular el gradiente de presión entre dos micrófonos situados a una distancia reducida, permitiendo inferir la velocidad de partícula a partir de la diferencia de presión entre ambos puntos. [8]

En aplicaciones de diagnóstico estructural y detección de defectos en cascos metálicos, la velocidad de partícula proporciona información crucial sobre la transmisión de ondas en la estructura. Por ejemplo, en pruebas de estanqueidad acústica, se ha observado que las regiones con mayores valores de velocidad de partícula corresponden a zonas de menor estanqueidad, lo que sugiere la presencia de fisuras, porosidades o variaciones en el espesor del material.

Tradicionalmente, la cuantificación del sonido se ha basado en la presión sonora, sin embargo, esta no proporciona información sobre la dirección del flujo acústico. La velocidad de partícula, en cambio, es una magnitud vectorial que indica la dirección de propagación del sonido y permite una evaluación más precisa de las vibraciones en estructuras sólidas. [8]

Los mapas de presión sonora permiten identificar regiones con niveles elevados de presión, incluso en áreas donde no hay una fuente de ruido evidente. Sin embargo, presentan una limitación en su rango dinámico, ya que la diferencia entre los valores máximos y mínimos de presión es de aproximadamente 12 dB. En contraste, la medición de la velocidad de partícula, al centrarse únicamente en la vibración perpendicular a la fuente, no se ve influenciada por reflexiones, lo que proporciona datos con una mayor precisión y sin la interferencia del ruido de fondo. Además, su rango dinámico es considerablemente más amplio, lo que permite obtener una mejor relación señal-ruido. [8]

Por estas razones, en el presente trabajo se da prioridad al uso de mapas de velocidad de partícula, ya que ofrecen una representación más clara y precisa de la propagación del sonido y de los posibles defectos estructurales.

2.2 Equipo de acústica avanzada Scan & Paint

El equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* es una tecnología innovadora para la medición y visualización de campos acústicos en tiempo real. Se basa en el uso de una sonda *PU* (Pressure-Particle Velocity), la cual permite medir simultáneamente la presión sonora y la velocidad de partícula. Esta combinación proporciona un análisis detallado de la intensidad y dirección de propagación del sonido en una superficie determinada. [26] Como se ilustra en la *Figura 2-9* el software *Scan & Paint* permite generar mapas acústicos detallados, facilitando la detección de irregularidades en estructuras analizadas. [8]

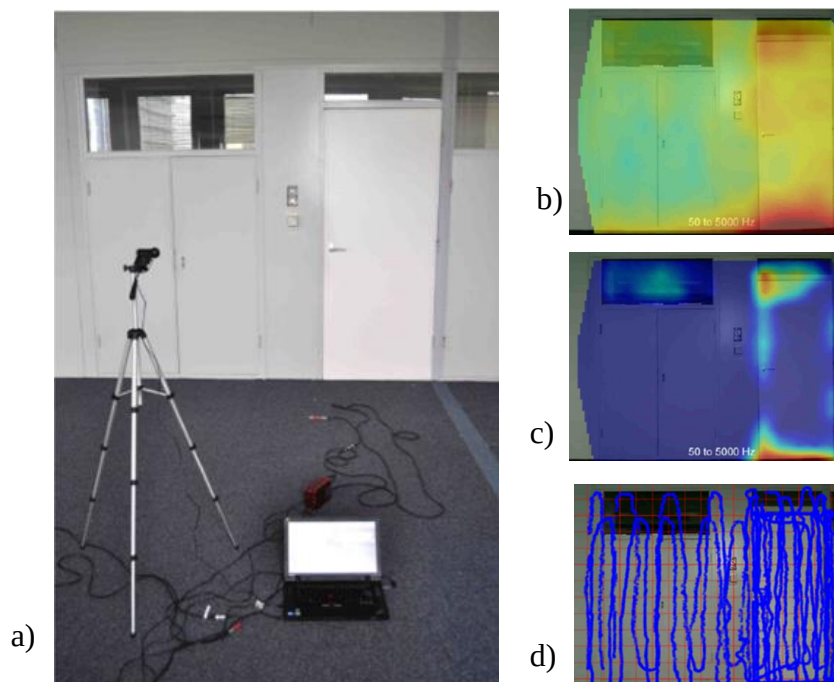


Figura 2-9 Foto del montaje (izquierda), mapas acústicos de presión (superior derecha), velocidad de partícula (centro derecha), mapa de las posiciones recorridas durante los escaneos (inferior derecha)

2.2.1 Elementos del equipo

A continuación, se procede a explicar de forma detallada los componentes del equipo de acústica avanzada:

- **Sonda Microflown P-U:**

Compuesta por un sensor de velocidad de partícula y un micrófono. El sensor de velocidad de partícula está formado por dos filamentos de platino de dimensiones extremadamente reducidas y ubicados a una distancia mínima entre sí, los cuales son calentados hasta alcanzar aproximadamente los 300 °C. La resistencia eléctrica de estos filamentos varía en función de la temperatura. Cuando una onda acústica incide en dirección perpendicular, provoca un cambio instantáneo en la distribución térmica, ya que uno de los filamentos se enfría más que el otro debido al flujo de partículas del sonido.

En la *Figura 2-10* se presenta la sonda Microflown P-U, donde a la izquierda se muestra el dispositivo completo, en el centro su estructura interna y a la derecha los filamentos de platino que conforman el sensor. [27]

A diferencia de los micrófonos tradicionales, este sensor es capaz de medir la velocidad de partícula en todo el rango de frecuencias audibles (20 Hz - 20 kHz), lo que permite la obtención de información acústica con mayor precisión, reduciendo la influencia del ruido de fondo y los efectos de campo lejano. [28]

Rendimiento de la sonda	Presión Sonora/Velocidad de partícula
Sensibilidad	65 mV / Pa / 30 V (m/s)
Rango de frecuencia (± 1 dB)	40 - 8000 Hz
Rango de frecuencia (± 2 dB)	20 - 10000 Hz
Nivel máximo	112 dB / 130 dB

Tabla 2-1 Características de la sonda Microflown P-U ([29])

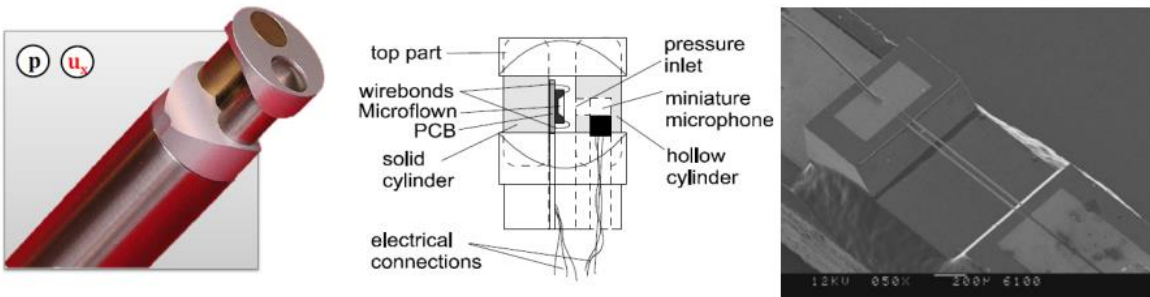


Figura 2-10 Sonda Microflown P-U, estructura interna y cables del sensor de velocidad de partículas ([27])

Además, el micrófono integrado en la sonda P-U desempeña un papel fundamental en la medición de la presión sonora. Su función principal es captar las variaciones de presión generadas por la propagación de las ondas acústicas en el medio circundante, permitiendo así un análisis detallado del comportamiento del sonido en un entorno específico. A través de este micrófono, es posible obtener datos precisos sobre la distribución de la presión sonora en diferentes puntos de la superficie analizada, lo que facilita la caracterización de los fenómenos acústicos presentes. En la *Figura 2-11* podemos observar el resultado obtenido al utilizar una sonda P-U en un estudio acústico. En dicha representación, se muestra tanto la velocidad de partícula, medida a través del sensor especializado de la sonda, como la presión sonora captada por el micrófono. Esta combinación de mediciones permite obtener un mapa detallado del campo sonoro, proporcionando información clave para el análisis de la propagación del sonido y la identificación de posibles anomalías acústicas en estructuras o materiales analizados.

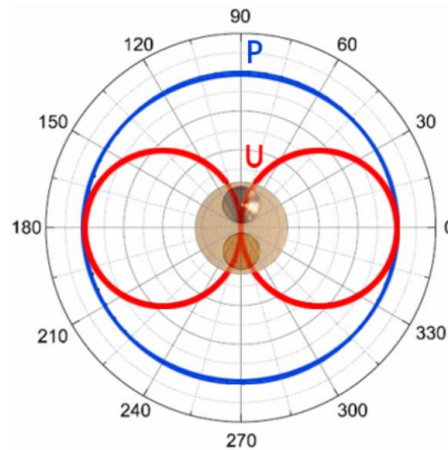


Figura 2-11 Representacion de medidas de presión y velocidad de partícula con sonda P-U ([30])

- **Cámara de Vídeo (WebCam Pro 9000)**

El sistema de *Scan & Paint* utiliza una cámara de vídeo de alta resolución para capturar el movimiento de la sonda en relación con la superficie analizada. Este componente es crucial, ya que permite rastrear la posición de la sonda a lo largo del tiempo, generando un mapa espacial preciso de la distribución acústica. [31]

El uso de la cámara permite que la técnica sea altamente flexible, eliminando la necesidad de un posicionamiento rígido y predefinido de sensores fijos. La posición de la sonda se extrae mediante algoritmos de seguimiento de color, facilitando la reconstrucción del campo acústico. [32]

- **Acondicionador de señal (MFPA-2)**

El MFPA-2 (Figura 2-12) es un preamplificador utilizado para alimentar la sonda P-U y amplificar las señales acústicas recibidas. Su función principal es garantizar que las señales de presión y velocidad de partícula sean adecuadamente procesadas antes de ser enviadas al sistema de adquisición de datos. [33]

Este componente permite mejorar la relación señal-ruido, optimizando la calidad de las mediciones acústicas en entornos con diferentes condiciones de propagación sonora.



Figura 2-12 MFPA-2 por delante y por detrás ([33])

- **Módulo de adquisición de datos (Scout V2)**

El Scout V2 (Figura 2-13) es un sistema de adquisición de datos de alta precisión (24 bits), diseñado específicamente para el registro de mediciones acústicas y vibracionales con sensores Microflown. Funciona a través de una interfaz USB, lo que facilita su integración con el software de análisis. [34]

Este módulo permite la sincronización de los datos de presión y velocidad de partícula con la información de posición capturada por la cámara, generando una representación espacial detallada del campo acústico. [34]



Figura 2-13 Scout V-2 ([34])

- Marcado de color

Para que el software pueda rastrear de manera precisa la posición de la sonda *P-U* en el vídeo, se emplea un marcador de color colocado en la parte superior de la sonda. Este marcador permite que los algoritmos de reconocimiento identifiquen y sigan la trayectoria del sensor sobre la superficie analizada.

Dado que el análisis de datos depende de la precisión del rastreo, la elección del color del marcador debe ser contrastante con el fondo de la superficie medida, reduciendo la posibilidad de errores en el seguimiento.

- Software Scan & Paint (Microflow Velo 4.A)

El software *Scan & Paint* es el encargado de procesar y visualizar los datos obtenidos por la sonda y la cámara. Este software se divide en diferentes módulos que permiten la configuración del hardware, captura de datos en tiempo real, procesamiento y análisis de la información acústica y representación gráfica de mapas de presión sonora, velocidad de partícula e intensidad sonora.

La manera más clara y comprensible de detallar el funcionamiento completo del software es mediante imágenes, permitiendo ilustrar de forma visual las distintas pestañas.

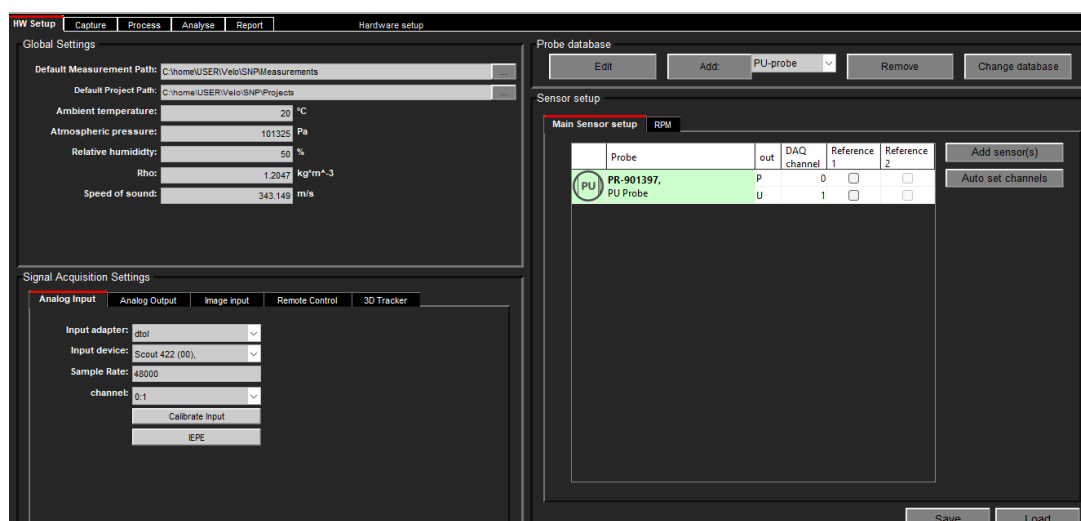


Figura 2-14 Pestaña HW Setup de Scan & Paint (Elaboración propia)

La pestaña *HW Setup* del software *Scan & Paint* (Figura 2-14) permite la configuración inicial del sistema de medición, asegurando la correcta integración de los sensores y la adquisición precisa de datos. En esta sección, se ajustan parámetros clave como la selección de la sonda de medición P-U, condiciones ambientales (temperatura, humedad y presión atmosférica) y la calibración del sistema.

El correcto ajuste de estos parámetros es fundamental para garantizar mediciones fiables y precisas. En aplicaciones como la caracterización de defectos estructurales en cascos metálicos de buques, esta configuración inicial es clave para detectar poros o pérdidas de espesor con alta resolución acústica.

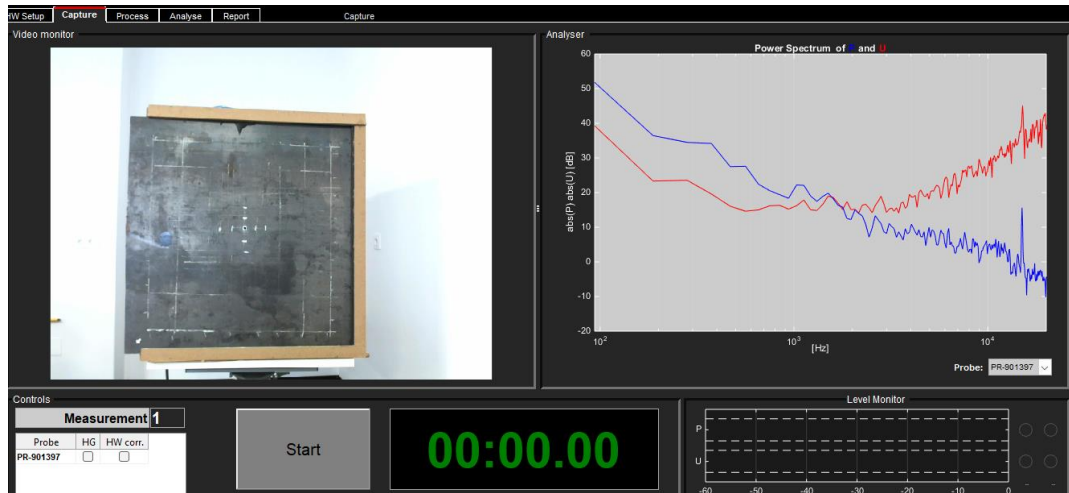


Figura 2-15 Pestaña Capture de Scan & Paint (Elaboración propia)

La pestaña *Capture* (Figura 2-15) permite la adquisición de datos en tiempo real mediante la sincronización de la sonda P-U y la cámara de vídeo. En esta interfaz, el usuario puede ajustar parámetros de grabación como el contraste, brillo y exposición de la imagen capturada, garantizando la correcta visualización del proceso de medición. Además, se muestra en pantalla el recorrido de la sonda sobre la superficie analizada, lo que permite correlacionar los valores medidos de presión sonora y velocidad de partícula con su posición en la imagen. Esta funcionalidad es clave para la obtención de mapas acústicos precisos, ya que facilita la identificación de patrones de propagación del sonido en estructuras complejas.

El botón "Start" inicia la grabación de datos, mientras que las lecturas en tiempo real aparecen en la parte inferior de la pantalla, permitiendo la supervisión inmediata de la medición. Esto asegura que la adquisición de datos sea eficiente y libre de errores, mejorando la calidad de los análisis posteriores.



Figura 2-16 Pestaña Process de Scan & Paint (Elaboración propia)

En esta sección del software (*Figura 2-16*), el primer paso consiste en cargar el vídeo previamente registrado en la pestaña anterior, utilizando la opción *Load measurement*. Posteriormente, es necesario definir el color de referencia de la sonda, permitiendo que el algoritmo de seguimiento identifique correctamente el punto de medición dentro del vídeo.

Un aspecto clave en esta etapa es la herramienta *Set time range*, la cual facilita la eliminación de segmentos no deseados del vídeo. Esto resulta especialmente útil cuando se detectan interferencias externas inesperadas o cuando la grabación es demasiado extensa y requiere optimización.

Una vez ajustados estos parámetros, el usuario puede proceder a la ejecución del procesamiento de datos presionando el botón *Start Process*, iniciando así el análisis del comportamiento acústico de la superficie medida.

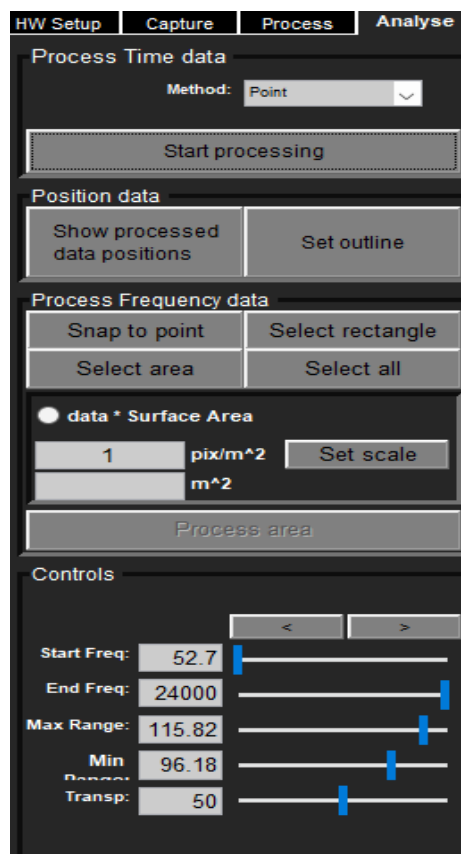


Figura 2-17 Pestaña Analyse de Scan & Paint (Elaboración propia)

La pestaña *Analyse* (*Figura 2-17*) permite la interpretación y visualización de los datos adquiridos tras el procesamiento de la medición. En esta sección, el usuario puede seleccionar el método de discretización de datos, ya sea mediante una cuadrícula regular o por puntos individuales, lo que influye en la resolución espacial de los mapas acústicos generados. Asimismo, es posible definir el rango de frecuencias de interés, filtrando aquellas componentes espectrales más relevantes para el análisis. Todo esto se explica de forma más detallada en el siguiente subapartado.

Además, esta pestaña proporciona herramientas avanzadas para la representación gráfica de la velocidad de partícula y la presión sonora, permitiendo una identificación precisa de patrones acústicos en estructuras complejas. Gracias a estas funcionalidades, el usuario puede evaluar la distribución sonora sobre una superficie y detectar posibles anomalías, como pérdidas de aislamiento o focos de emisión de ruido no deseados.

Esta funcionalidad es fundamental en el contexto de este TFG, ya que permite analizar con precisión las propiedades acústicas del casco metálico de los buques, facilitando la identificación de áreas con pérdida de espesor o presencia de porosidad.

Tras la descripción detallada de cada uno de los componentes del software, la imagen representada (*Figura 2-18*) muestra la implementación del sistema en un entorno de medición real, donde cada uno de sus componentes trabaja en conjunto para proporcionar mapas de presión sonora y velocidad de partícula en tiempo real.



Figura 2-18 Componentes Scan & Paint ([35])

2.2.2 Proceso para la obtención de datos acústicos y su posterior análisis

Para iniciar el proceso de medición, es fundamental posicionar la cámara de forma perpendicular a la superficie que se va a analizar, asegurando así una captura óptima de la zona de estudio. Luego, se procede a escanear la superficie con una sonda P-U, cabe destacar que a menor distancia mayor precisión tendrán los datos obtenidos. Durante la fase de posprocesamiento, el software extrae automáticamente la posición de la sonda en cada fotograma del vídeo mediante un algoritmo de seguimiento de color. Finalmente, el procesamiento de estos datos permite generar mapas acústicos detallados, proporcionando una representación clara de la distribución del sonido en la superficie analizada. El proceso seguido se muestra en la *Figura 2-19*.

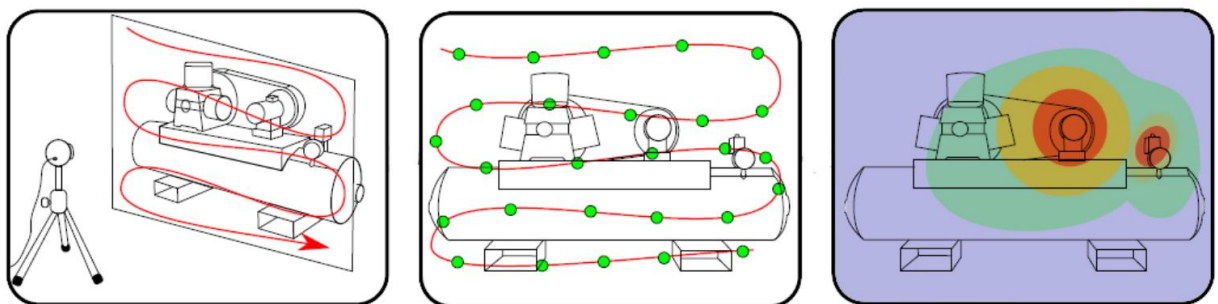


Figura 2-19 Método de medición ([35])

Después de capturar la grabación, se puede segmentar en distintas partes utilizando un algoritmo de cuadrícula espacial. Este método permite asociar cada sección de la señal registrada con una celda específica dentro de la cuadrícula, en función de la posición exacta de la sonda durante la medición. De esta manera, se logra una distribución organizada de los datos recogidos, facilitando su análisis y representación visual. En la *Figura 2-20* se presenta un esquema que ilustra el proceso de discretización. [26]

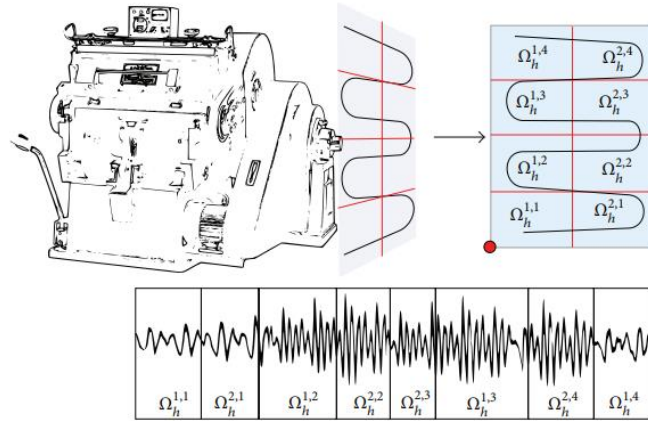


Figura 2-20 Proceso de discretización espacial ([26])

Para interpretar los datos obtenidos durante la medición y generar una representación visual del sonido, es fundamental definir un método adecuado para segmentar la información recopilada. En este estudio, se consideran dos enfoques principales para este propósito. El primero es el método de cuadrícula, que consiste en dividir la superficie analizada en una serie de celdas, permitiendo una distribución homogénea de los datos. El segundo es el método por puntos, en el cual la segmentación se realiza siguiendo el trayecto exacto recorrido por la sonda durante la medición. [7]

Método de cuadrícula plana: Para lograr un análisis uniforme del campo acústico esta técnica permite dividir una superficie continua en secciones de igual tamaño, facilitando así una evaluación homogénea, como se ilustra en la Figura 2-21. El sistema de rastreo implementado en este software determina la posición de la sonda a partir del análisis de cada fotograma del vídeo capturado durante la medición, lo que equivale a interpretar imágenes bidimensionales del entorno. [7]

Sin embargo, debido a la perspectiva de la cámara, obtener la ubicación exacta de la sonda puede resultar complejo, ya que pequeñas variaciones en la profundidad no son detectadas con precisión. Estos errores en el seguimiento pueden afectar la calidad de los mapas acústicos generados, aunque su impacto puede minimizarse asegurando que la cámara esté posicionada perpendicularmente a la superficie de medición y manteniendo una distancia constante durante el proceso. Esta disposición optimiza la fiabilidad de los resultados y reduce la posibilidad de discrepancias en la interpretación de los datos acústicos. [7]

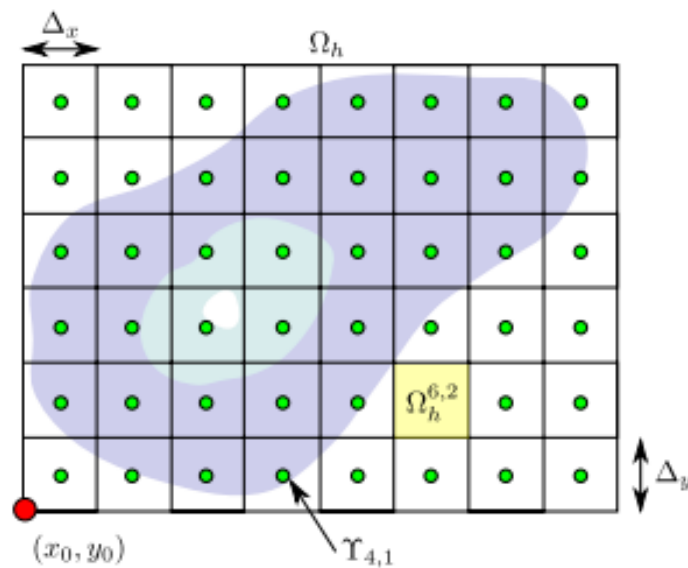


Figura 2-21 División del espacio en celdas ([7])

La discretización del dominio espacial y la definición del tiempo empleado se expresa mediante un conjunto de fórmulas complejas que resultan en la división del área en bloques “ $\Omega_h^{m,n}$ ” de tamaño “ Δ_x ” y “ Δ_y ”.

El centro de cada celda “ $\Omega_h^{m,n}$ ” está referenciado respecto al origen (x_0, y_0) , el tamaño de celda (Δ_x, Δ_y) y su correspondiente fila y columna (m, n) .

Una vez que se ha dividido el área de medición en una cuadrícula, es posible vincular los datos acústicos obtenidos con la ubicación exacta en la que fueron registrados. Para ello, el recorrido de la sonda se segmenta en pequeñas secciones que se asignan a las distintas celdas de la cuadrícula, permitiendo organizar la información de forma estructurada (Figura 2-22). Si la sonda pasa por la misma zona en múltiples ocasiones, la celda correspondiente contendrá varias mediciones, lo que permite obtener un promedio y minimizar posibles errores en la representación final. Esta metodología se basa en el uso de una *sonda PU*, equipada con un micrófono de presión sonora y un sensor de velocidad de partícula, lo que permite capturar simultáneamente ambas magnitudes acústicas en toda la superficie analizada. Gracias a este enfoque, se establece una relación directa entre los datos acústicos registrados y su distribución espacial. De esta manera, el software de análisis puede identificar qué zonas tienen información suficiente y cuáles requieren ajustes o interpolaciones. [7]

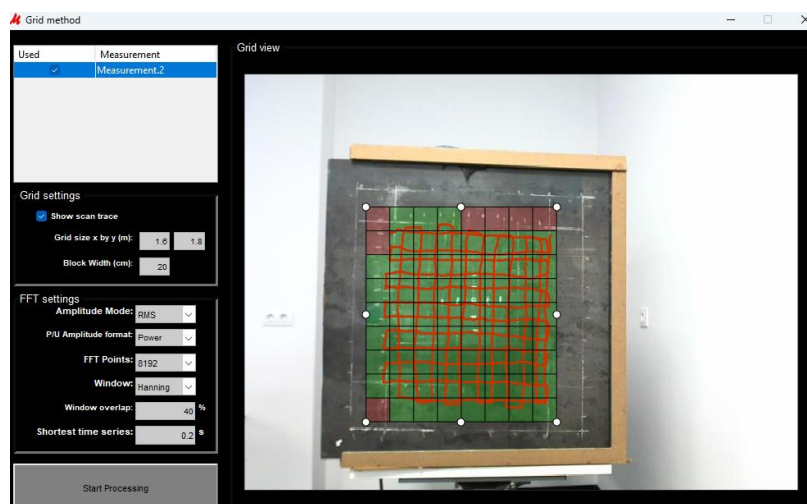


Figura 2-22 Método de cuadrícula de Scan & Paint con tamaño de bloque de 20cm (Elaboración propia)

Método por puntos: El método por puntos es una alternativa al método de cuadrícula utilizado en *Scan & Paint*. En lugar de dividir la superficie en una malla regular, este enfoque fragmenta la señal a lo largo del trayecto seguido por el sensor, asignando cada punto de medición a una ubicación específica dentro del área analizada. A diferencia de la discretización en cuadrícula, que segmenta el espacio en celdas homogéneas, el método por puntos se basa en una aproximación unidimensional. Esto permite registrar la trayectoria exacta de la sonda y asociar cada punto de medición con un instante temporal específico. [7]

El método por puntos en *Scan & Paint* ofrece una forma flexible de capturar mediciones acústicas sin la necesidad de establecer una correspondencia precisa entre la imagen capturada y la geometría del entorno real. Esta característica lo hace especialmente útil cuando la superficie de medición presenta formas irregulares o cuando la cámara de vídeo no se encuentra perfectamente alineada con la superficie evaluada. [7] Por ejemplo, en el análisis del casco metálico de un buque, donde existen curvaturas y variaciones de grosor, el método de cuadrícula podría no ser preciso al asumir una superficie plana. En cambio, el método por puntos permite recorrer zonas críticas como soldaduras o áreas corroídas sin necesidad de una alineación estricta, facilitando la detección de poros y pérdidas de espesor con mayor detalle. Por ello, durante el desarrollo del presente TFG, se realizan los ensayos trabajando con este método.

2.2.3 Ventajas y novedades del software Scan & Paint

Ventaja	Descripción
Alta resolución espacial	Permite obtener mapas detallados de intensidad acústica y velocidad de partícula con gran precisión.
Rápida adquisición de datos	El proceso de medición es más rápido en comparación con otros métodos tradicionales de análisis acústico.
Flexibilidad en la medición	Puede aplicarse a distintos entornos sin requerir configuraciones específicas o modificaciones complejas.
Visualización en tiempo real	Proporciona representaciones visuales inmediatas de los fenómenos acústicos analizados.
Reducción de errores por reflexiones	La medición de velocidad de partícula evita problemas de interferencias y reflexiones en el campo sonoro.
Compatibilidad con otras aplicaciones acústicas	Adecuado para análisis de ruido estructural, control de calidad acústica y localización de fuentes sonoras.
Menor costo comparado con otros métodos avanzados	Requiere menos infraestructura y equipamiento especializado, reduciendo los costos de implementación.
Facilidad de uso sin necesidad de calibración compleja	No necesita una calibración compleja, lo que facilita su implementación en diferentes contextos.

Tabla 2-2 Ventajas del software Scan & Paint (Elaboración propia)

La *Figura 2-23* destaca cómo *Scan & Paint* optimiza la relación costo-tiempo en comparación con los métodos tradicionales de medición acústica. Al reducir drásticamente el tiempo de configuración y medición sin necesidad de equipos costosos, se posiciona como una alternativa versátil y accesible para estudios de ruido y vibración en entornos industriales, automotrices y navales. Esta ventaja lo hace ideal para aplicaciones como la inspección de cascos de buques, el mantenimiento predictivo y la localización de fugas acústicas en estructuras complejas. En definitiva, proporciona el mejor rendimiento global, alcanzando un equilibrio óptimo entre el tiempo de medición, la configuración del sistema y su costo.

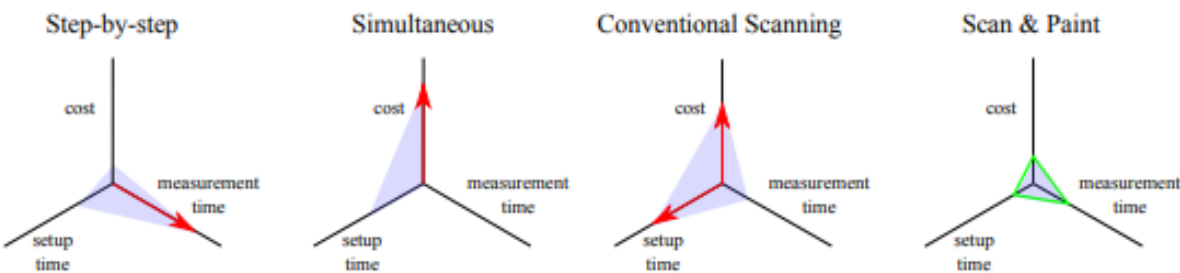


Figura 2-23 Visualización de los diferentes métodos de medición ([7])

2.2.4 Aplicaciones en los sectores automovilístico, aeronáutico y naval

El software *Scan & Paint* ha demostrado ser una herramienta versátil y eficaz para la identificación y análisis de fuentes de ruido y vibraciones en diversos sectores industriales. En este apartado se mencionan algunos de los trabajos realizados previamente con este equipo.

En un estudio realizado por Microflown Technologies, se investigó el campo sonoro producido por una estructura compleja en un entorno reverberante. El objetivo era comparar el ruido generado por la misma máquina instalada en dos buques distintos y localizar las principales áreas de excitación. Se empleó una sonda *PU* junto con *Scan & Paint* para mapear el campo acústico y determinar las diferencias en los niveles de ruido entre ambas embarcaciones (*Figura 2-24*). [31]

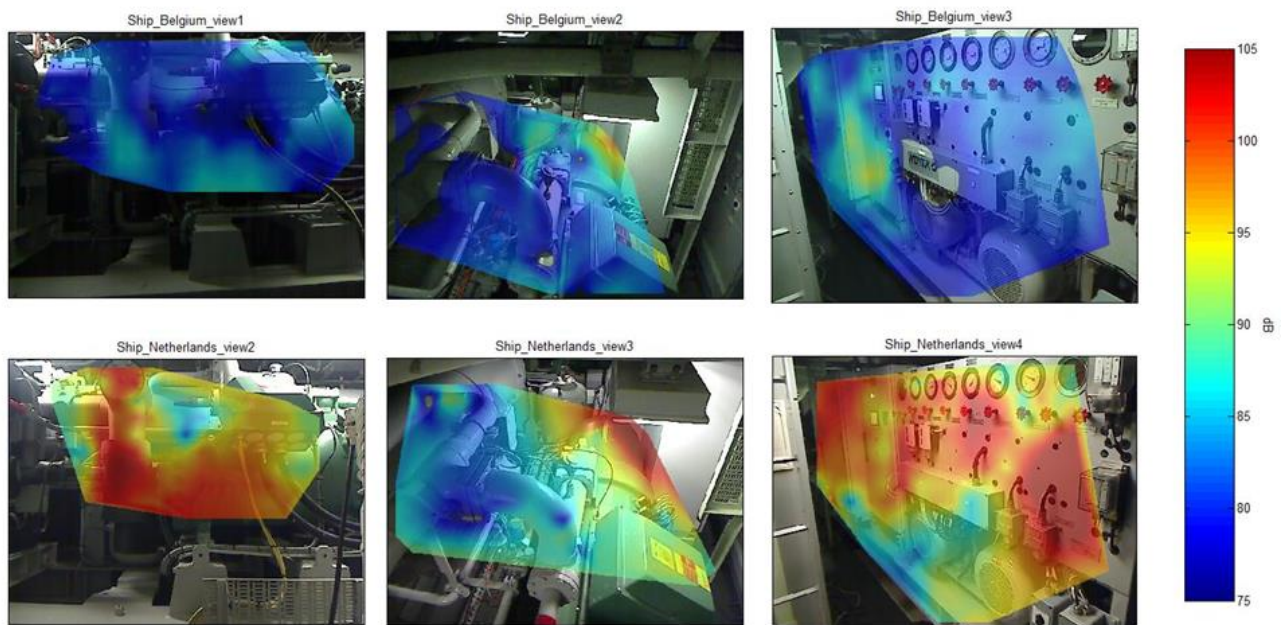


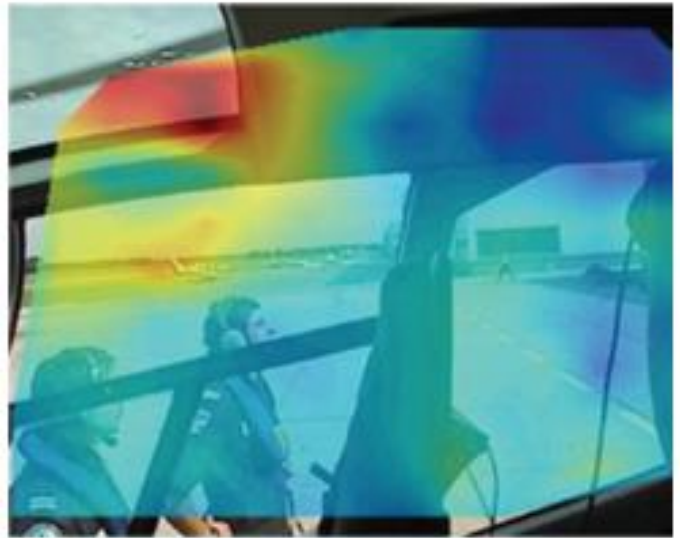
Figura 2-24 Comparación de los mapas acústicos de baja frecuencia radiada entre diferentes embarcaciones ([31])

En la industria aeronáutica, este equipo se ha empleado para identificar y mitigar fuentes de ruido en cabinas de aeronaves, mejorando el confort de los pasajeros y la eficiencia operativa.

Un caso de estudio documentado por Microflown Technologies muestra la aplicación de *Scan & Paint* para visualizar y cuantificar el ruido en el interior de una cabina de avión (*Figura 2-25*). Mediante el mapeo acústico, se identificaron las principales fuentes de ruido, lo que permitió implementar soluciones efectivas para su reducción. [26]



a)



b)



c)

Figura 2-25 Mapeo acústico de la cabina de la aeronave ([26])

En el sector automotriz, *Scan & Paint* se ha utilizado para identificar fuentes de ruido en el interior de vehículos y evaluar el rendimiento acústico de componentes específicos.

En un trabajo previo, se empleó esta tecnología para analizar las pérdidas de estanqueidad acústica en un vehículo. Para ello, se llevaron a cabo dos pruebas desde el interior del automóvil: una con el vehículo en movimiento a diferentes velocidades y otra en estado estacionario, utilizando un altavoz ubicado en el exterior como fuente sonora. Durante el experimento, se simuló una fuga acústica en la ventana mediante una pequeña apertura controlada (*Figura 2-26*). [36]



Figura 2-26 Representación de la fuga acústica artificial en la ventana trasera del vehículo ([36])

En un primer lugar, en condiciones de conducción, a 40 km/h, se observó que a bajas frecuencias (200 Hz - 2 kHz) la fuga acústica se detectaba con facilidad en la zona de la ventana (*Figura 2-27*), mientras que a frecuencias más altas (2 kHz - 10 kHz), el ruido se filtraba no solo en la fuga artificial, sino también en la parte inferior de la ventana, indicando otras rutas de transmisión sonora (*Figura 2-28*). [36]



Figura 2-27 Mapa acústico a 40 km/h en el rango de 200 Hz - 2 kHz ([36])

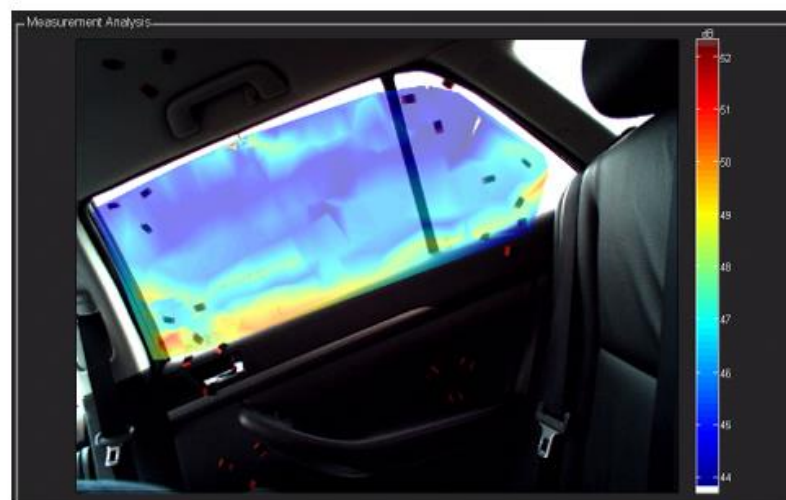


Figura 2-28 Mapa acústico a 40 km/h en el rango de 2 kHz - 10 kHz ([36])

A 100 km/h, los resultados fueron similares, pero con una mayor intensidad del ruido de fuga debido al aumento de la presión aerodinámica.

En un segundo lugar se colocó un altavoz externo ubicado a 2 metros del vehículo para analizar cómo se transmitía el sonido a través de la carrocería y sellos del automóvil (*Figura 2-29 y Figura 2-30*). Los resultados mostraron que la fuga principal era fácilmente detectable con *Scan & Paint*. [36]



Figura 2-29 Distribución de la velocidad de partícula en el interior del vehículo con altavoz externo (200 Hz - 2 kHz) ([36])



Figura 2-30 Distribución de la velocidad de partícula en el interior del vehículo con altavoz externo (2 kHz - 10 kHz) ([36])

La prueba en conducción real permitió detectar no solo la fuga artificial sino también otras rutas de transmisión del sonido no identificables con la técnica de altavoz externo.

3 CASOS DE ESTUDIO

3.1 Fundamentos teóricos

3.1.1 Aplicación práctica: Cálculo de caudales

Antes de comenzar con los ensayos, es interesante plantear un escenario donde la presencia de orificios en el casco tenga un impacto real. Un caso práctico es la posible entrada de agua a través de estos orificios en el propio casco de los barcos. Dependiendo del tamaño del orificio y su posición respecto a la línea de flotación, el caudal de entrada de agua puede representar una amenaza considerable para la estabilidad del barco, comprometiendo su flotabilidad.

Para representar esta situación, tomamos cuatro orificios de distintos diámetros (4 mm, 8 mm, 14 mm y 20 mm), similares a los agujeros con los que trabajamos luego en los ensayos. Ahora, calculamos el caudal de agua que ingresaría en un compartimento cualquiera del buque. Asumimos que el barco tiene un calado de 7 metros y que los orificios se encuentran a 2 metros de la quilla, dentro de la obra viva del buque.

El caudal de entrada de agua se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = 1.25 \times D^2 \times \sqrt{H} \quad (3-1)$$

Donde:

- Q es el caudal en m^3/h .
- D es el diámetro del orificio en cm.
- H es la altura del orificio respecto a línea de flotación en metros.
- El coeficiente 1,25 es un valor empírico obtenido de estudios sobre la entrada de agua a través de orificios. [37]

Como en este caso tenemos la distancia del orificio a la quilla y no a la línea de flotación, haremos la resta considerando el calado, quedando así una altura a la línea de flotación de 5 metros. De esta forma, utilizando la fórmula anterior calculamos los caudales para cada uno de los tamaños de orificio. Por otro lado, suponemos un volumen del compartimento de $50 m^3$ para estimar el tiempo en el que este se inundaría por completo.

<i>Tamaño de orificio</i>	<i>Caudal de entrada de agua</i>	<i>Tiempo de inundación</i>
4 mm	0.447 m ³ /h	112 h
8 mm	1.789 m ³ /h	28 h
14 mm	5.478 m ³ /h	9 h
20 mm	11.18 m ³ /h	4 h 30 min

Tabla 3-1 Caudal de entrada y tiempo de inundación según tipo de orificio (Elaboración propia)

3.2 Mediciones realizadas sobre la chapa

En primer lugar, mencionar que las mediciones han sido llevadas a cabo en el interior de los laboratorios de investigación del Centro Universitario de la Defensa. Antes de comenzar con el desarrollo principal de este TFG, se realizaron una serie de ensayos sobre una chapa metálica en su estado original. Como fuente sonora, se colocó un altavoz emitiendo ruido rosa detrás de la chapa, lo que permitió analizar cómo se propagaba el sonido a través del material y si existían zonas con diferencias en la transmisión acústica.

En la *Figura 3-1* se puede ver la configuración inicial del experimento, donde se observa la chapa sin modificaciones y el altavoz emitiendo ruido rosa colocado en la parte posterior. En la superficie de la chapa se marcan referencias con tiza para la alineación de futuras perforaciones y la realización del fresado.



Figura 3-1 Configuración inicial de ensayo acústico en chapa sin fresado (Elaboración propia)

Posteriormente, con el fin de estudiar cómo afectaban las modificaciones en la estructura a la propagación del sonido, se realizó un fresado en el centro de la chapa (*Figura 3-2*). Tras esta intervención, se repitieron las mediciones con *Scan & Paint*, obteniendo nuevos mapas acústicos y espectrogramas para analizar posibles cambios en la transmisión del ruido rosa a través del material. El objetivo de esta fase fue determinar si una reducción localizada de espesor era perceptible con este software y si afectaba significativamente la distribución del sonido en la superficie.



Figura 3-2 Chapa con fresado central realizado (Elaboración propia)

Finalizados los ensayos sobre la chapa sin modificaciones y tras la realización del fresado en su zona central, se procede a la fase de investigación de este TFG, en la cual se realizan perforaciones de distintos diámetros comenzando con uno de 4 mm en el centro de la chapa. Durante todas estas pruebas, el sensor *PU* de *Scan & Paint* hace varios barridos pasando a diferentes distancias de las perforaciones para observar cómo cambia la respuesta acústica. Para asegurarnos de que las mediciones a diferentes distancias fueran lo más precisas posible, se decide marcar referencias sobre la chapa. Para ello, se utiliza una tiza y una regla para dibujar líneas cada 2 cm, tanto en sentido horizontal como vertical, partiendo desde el centro del orificio. Estas marcas, como se puede ver en la *Figura 3-3*, sirven como guía para mantener la exactitud en la colocación del sensor *PU* de *Scan & Paint*, permitiendo que los barridos sean más precisos y comparables entre sí. De esta manera, se evitaban posibles desviaciones en la posición del sensor y se garantizaba la coherencia en la recogida de datos.

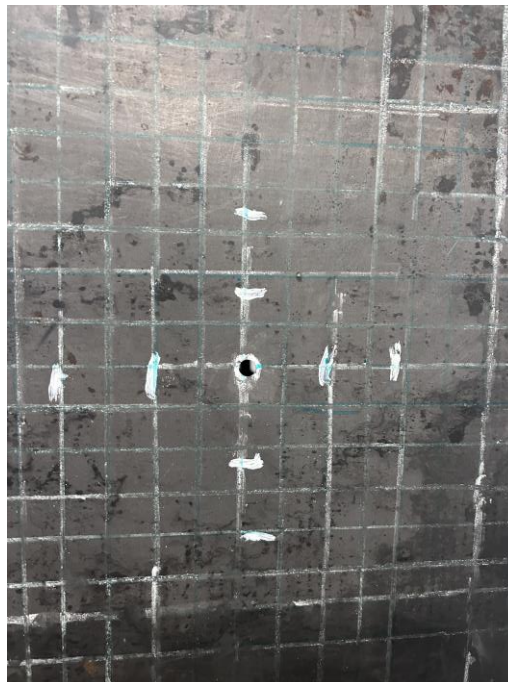
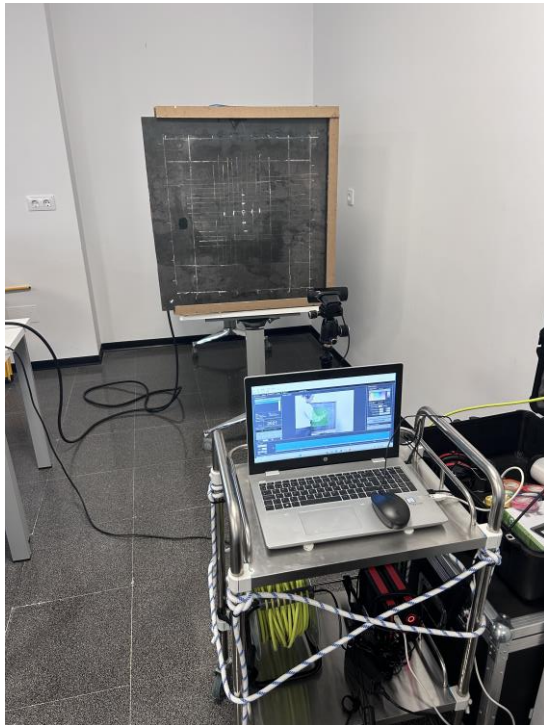


Figura 3-3 Chapa con orificio de 8mm perforado y marcas de referencia (Elaboración propia)

En la *Figura 3-4* se puede observar el montaje general del sistema de medición empleado en los ensayos.



a)



b)

Figura 3-4 Montaje equipo para realización de ensayos (Elaboración propia)

Además, a lo largo de los ensayos, se procede a tapar los distintos orificios que se van realizando en la chapa mediante cinta adhesiva (*Figura 3-5*), con el fin de evaluar si el software detectaba diferencias en las mediciones al comparar un orificio abierto con un orificio sellado. Para cada tamaño de perforación, se llevaron a cabo pruebas en ambas condiciones.



Figura 3-5 Chapa metálica con orificio de 20mm tapado en el centro. (Elaboración propia)

3.3 Diagnóstico: Análisis de los resultados en el laboratorio

Para poder analizar y organizar correctamente todos los ensayos realizados en el laboratorio, se ha creado una matriz que recoge las distintas configuraciones de cada prueba. En esta matriz se combinan tres factores principales: el tamaño de los orificios realizados en la chapa, si el orificio se encuentra tapado o sin tapar, y la distancia de barrido del sensor *PU* de *Scan & Paint* durante la medición.

Cada combinación de estas variables da lugar a un ensayo específico, donde se desarrolla una ficha individual. En estas fichas es donde se recoge toda la información relevante de cada prueba, desde una descripción inicial de cómo se ha realizado la medición, hasta los mapas acústicos y espectrogramas obtenidos con el software. Además de incluir los resultados gráficos, cada ficha cuenta con un apartado de observaciones donde se analizan las características más destacadas de cada caso. En este apartado se prestará especial atención a cómo afecta cada tamaño de orificio, la presencia o no de sellado y la distancia de barrido de la sonda, comparando los resultados entre unas condiciones y otras.

Este sistema de trabajo no solo permite visualizar y entender mejor el comportamiento acústico de la chapa en cada situación, sino que también facilita la comparación directa entre mediciones, ayudando a identificar patrones y tendencias de forma clara y ordenada. De esta forma, se consigue no solo documentar los resultados de manera rigurosa, sino también disponer de un historial completo de cómo evoluciona la respuesta acústica de la chapa a medida que se modifica su geometría.

La matriz completa con todas las fichas de medición detalladas se incluye en *el Anexo III: Fichas de ensayos*, proporcionando así una referencia exhaustiva donde cada medición se explica en profundidad.

En esta sección se prioriza la interpretación conjunta de los resultados a partir de los mapas acústicos generados y los espectrogramas correspondientes. El enfoque de análisis se divide en dos grandes bloques:

En primer lugar, se comparan los mapas acústicos y espectrogramas obtenidos para un mismo tamaño de orificio, explorando cómo varían los resultados en función de la distancia del paso del barrido del sensor. Este procedimiento permite identificar cómo se distribuye la emisión acústica sobre la superficie de la chapa y cómo la atenuación en dB de ciertas frecuencias se ve influida por la proximidad de la sonda al orificio.

En segundo lugar, se lleva a cabo un estudio comparativo entre diferentes tamaños de orificios, manteniendo constante la distancia de paso del barrido. Con este enfoque, se pueden analizar los diferentes mapas acústicos y determinar si se puede calcular una ecuación o patrón explicativo recurrente en la emisión acústica de orificios de distinta magnitud.

Además de estas comparaciones principales, se incluyen casos específicos en los que se evalúa el efecto del sellado del orificio. Para ello, se toman mediciones en las que tanto el tamaño del orificio como la distancia de paso de barrido de la sonda son constantes, pero variando entre un estado abierto y otro tapado. Esto permite analizar hasta qué punto el sellado afecta la propagación del sonido y si existen diferencias significativas en el mapa acústico.

En definitiva, el propósito de esta sección es interpretar los resultados obtenidos a través de una serie de imágenes comparativas. La visualización conjunta de los mapas acústicos facilita la identificación de tendencias generales y permite evaluar con mayor claridad cómo distintos parámetros experimentales influyen en la propagación sonora.

3.3.1 Análisis orificio de 4 mm pasando a diferentes distancias (tapado y sin tapar)

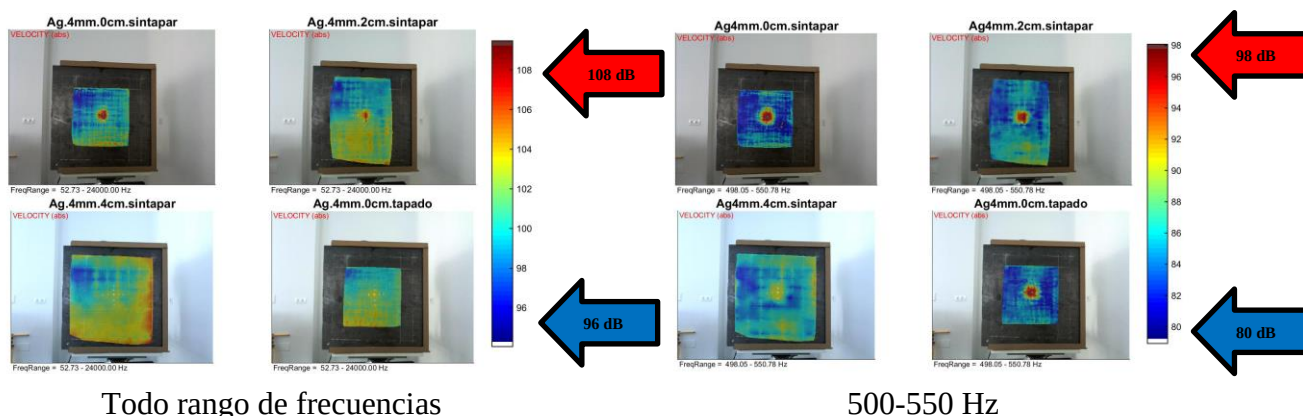


Figura 3-6 Mapas acústicos para el orificio de 4 mm (Elaboración propia)

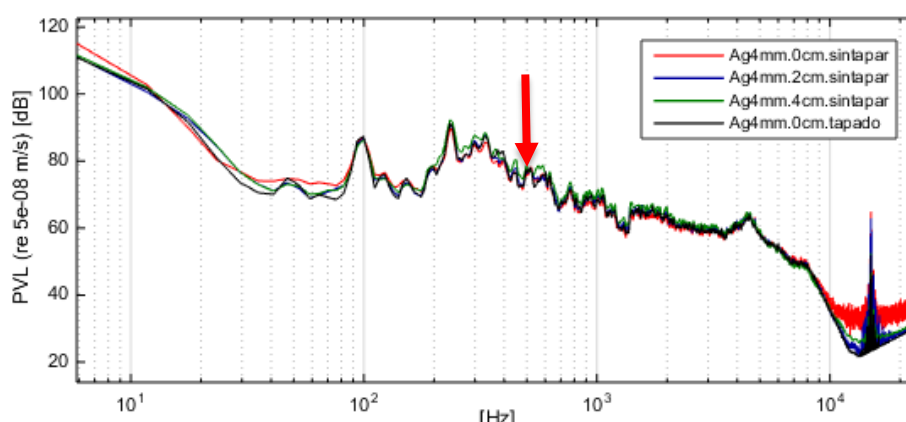


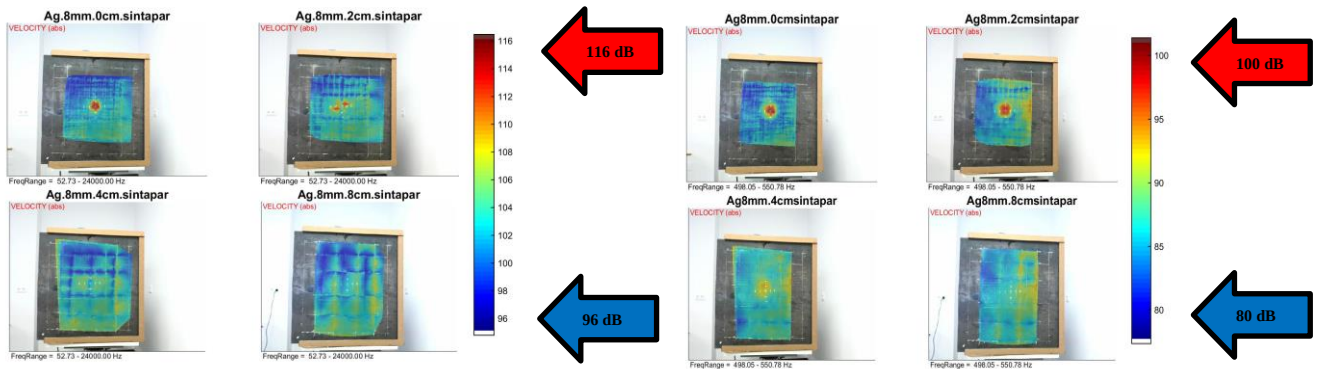
Figura 3-7 Espectrogramas para el orificio de 4 mm (Elaboración propia)

En el análisis de los mapas acústicos del orificio de 4 mm de diámetro dentro de todo el espectro frecuencial (*Figura 3-6*) se aprecia claramente la presencia del agujero cuando la sonda hace el barrido por encima del orificio y a 2 cm de este, aunque mucho más acentuada en el primer caso. Una vez acotado el rango frecuencial entre 500 y 550 Hz, se sigue evidenciando una marcada concentración de intensidad en la zona central de la superficie cuando el sensor hace el barrido directamente sobre el orificio y pasando a 2 cm de este. Esta intensidad se va disipando gradualmente a medida que el barrido de la sonda se aleja, aunque a 4 cm se puede intuir que en el centro de la chapa existe alguna anomalía. Vemos a su vez, que al tapar el agujero y hacer el barrido por encima de la perforación no se percibe ninguna diferencia clara con respecto a cuando no estaba tapado.

El análisis de los espectrogramas (*Figura 3-7*) muestra un pico en el rango de frecuencias entre 500 y 550 Hz que permite corroborar estas observaciones ilustradas en los mapas acústicos.

Es importante mencionar que para el orificio de 4 mm las mediciones solamente se llevan a cabo haciendo el barrido del sensor por encima del agujero además de a 2 cm y a 4 cm de distancia, junto con el orificio tapado. Por cuestiones de tiempo no fue posible realizar todas las mediciones que si se llevaron a cabo en los demás ensayos. En los orificios de mayor tamaño, se sigue un procedimiento más completo, registrando datos tanto con el agujero sin tapar como sellado y repitiendo las mediciones con la sonda haciendo el barrido por encima del orificio, a 2 cm, 4 cm y 8 cm.

3.3.2 Análisis orificio de 8 mm pasando a diferentes distancias (sin tapar)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-8 Mapas acústicos para el orificio de 8 mm sin tapar (Elaboración propia)

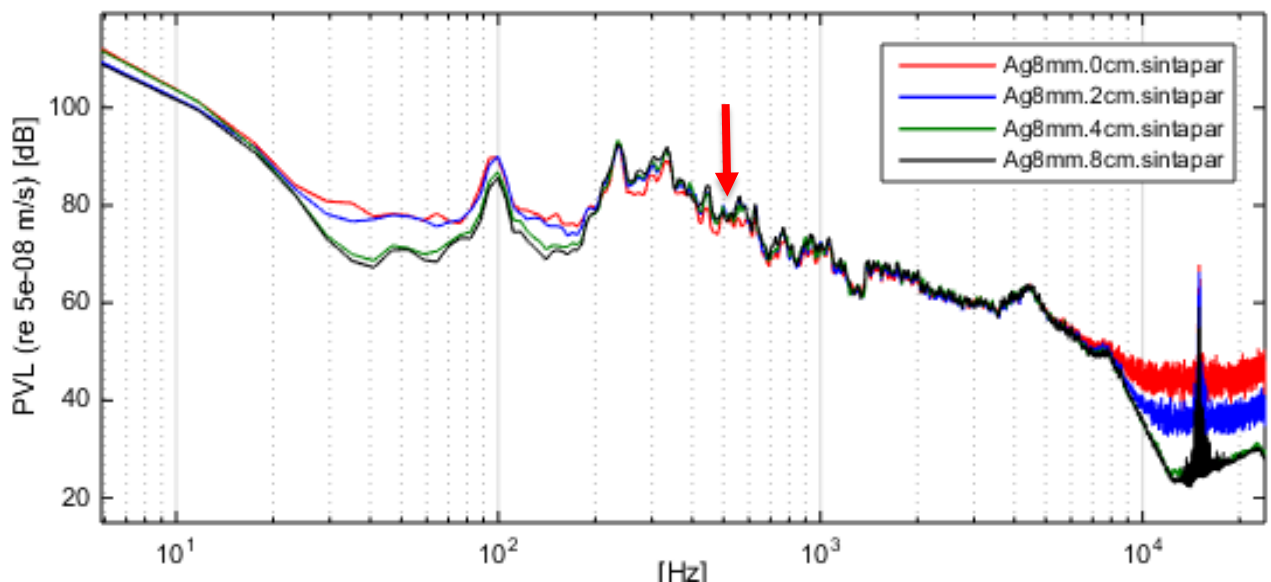


Figura 3-9 Espectrogramas para el orificio de 8 mm sin tapar (Elaboración propia)

En el análisis de los mapas acústicos del orificio de 8 mm sin tapar (*Figura 3-8*), se observan diferencias notables en la distribución de la energía acústica a medida que el barrido de la sonda se aleja del punto central. Cuando se analiza todo el espectro frecuencial se perciben con claridad los orificios cuando el barrido se hace directamente sobre el agujero y pasando a 2 cm de este, situación similar a la anterior, donde el orificio era de 4 mm de diámetro. Por el contrario, es prácticamente imposible detectar cualquier anomalía cuando la sonda hace el barrido alejándose a 4 y a 8 cm.

Cuando se examina el rango de 500 a 550 Hz, se aprecia un patrón similar, aunque con una focalización más clara en el centro, sobre todo en las mediciones donde la sonda se desplaza sobre el orificio y a 2 cm de distancia. Aunque no se aprecia con claridad, parece haber un pequeño indicio de anomalía cuando la sonda pasa a 4 cm del orificio. En cambio, al repetir el barrido a 8 cm, ya no se percibe nada fuera de lo normal. El espectrograma conjunto (*Figura 3-9*) muestra de nuevo la existencia de un pico frecuencial en torno a los 500 Hz.

3.3.3 Análisis orificio de 8 mm pasando a diferentes distancias (tapado)

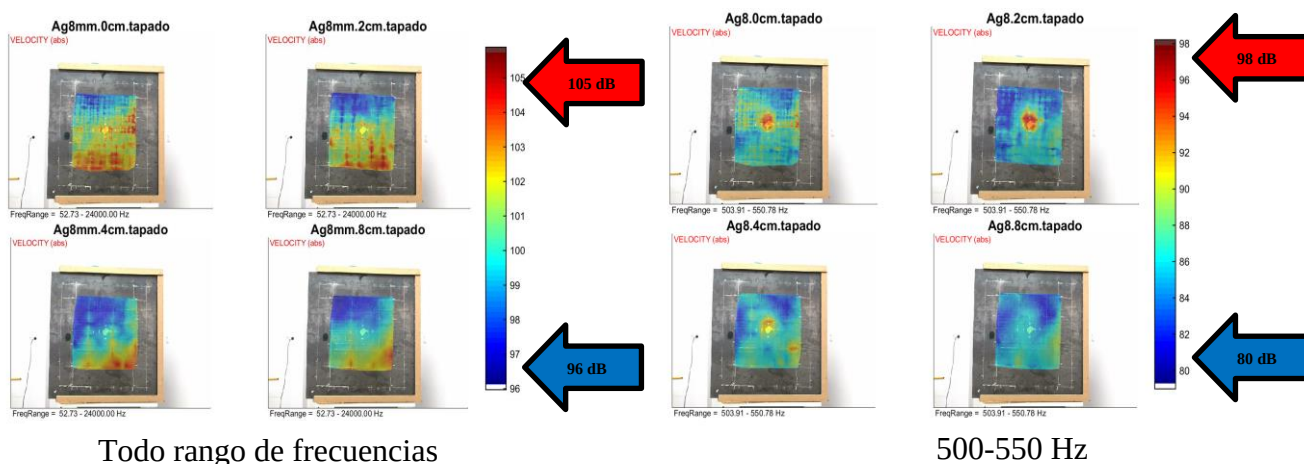


Figura 3-10 Mapas acústicos para el orificio de 8 mm tapado (Elaboración propia)

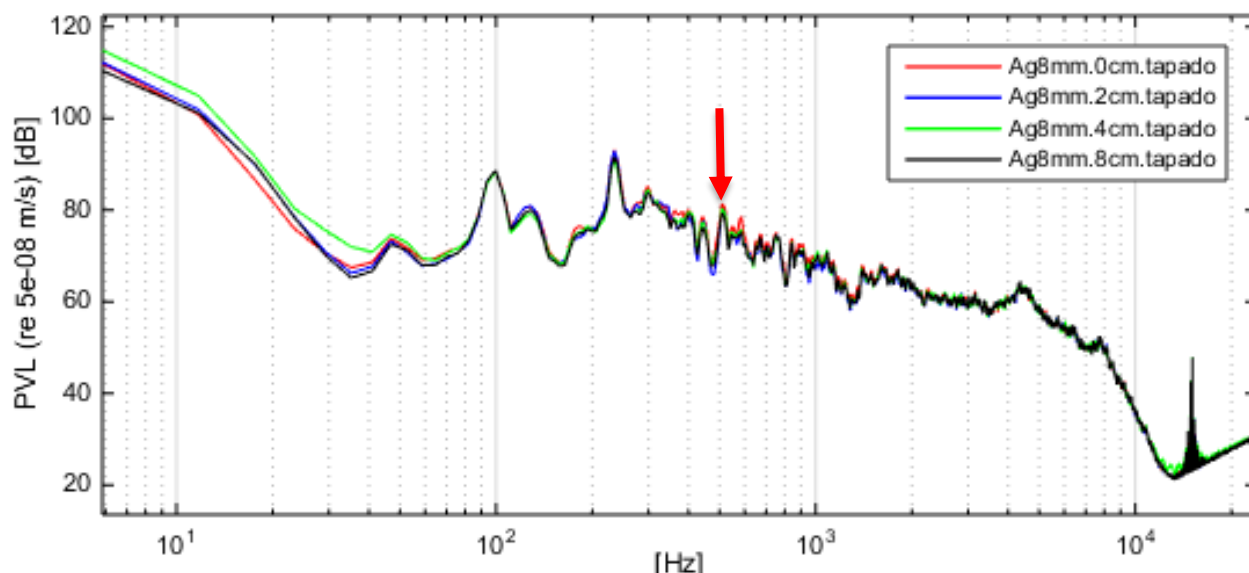
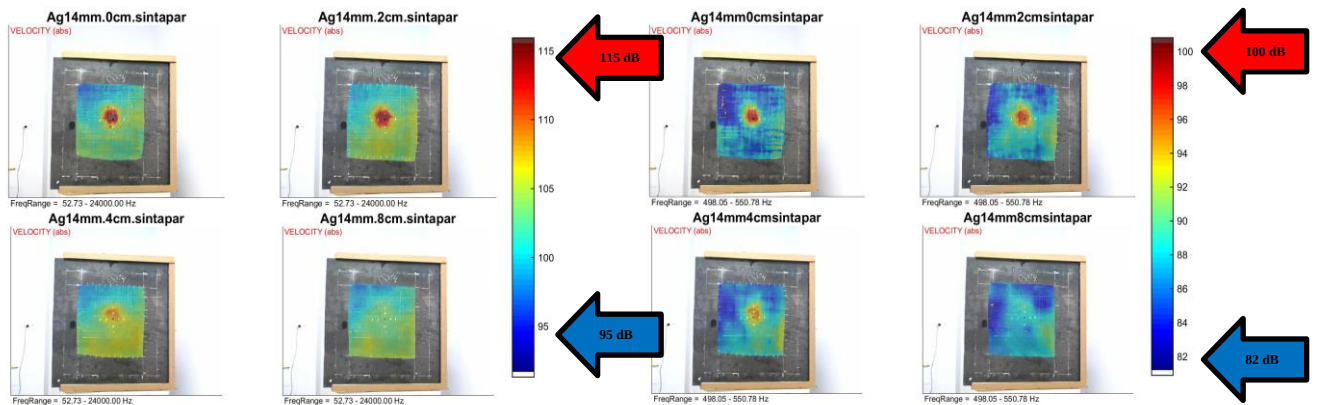


Figura 3-11 Espectrogramas para el orificio de 8 mm tapado (Elaboración propia)

El análisis de los mapas acústicos (*Figura 3-10*) revela una diferencia significativa en la distribución de la emisión entre el rango global de frecuencias y el intervalo específico de 500-550 Hz. En la primera imagen, la energía acústica se concentra mayoritariamente en la parte inferior, en lugar de focalizarse en el centro donde se ubica el orificio. Sin embargo, al observar el rango más acotado, la emisión se intensifica precisamente en la zona central. Esta diferencia sugiere que en el análisis global las distintas frecuencias activan modos vibratorios más amplios y dispersos. En cambio, en la banda de 500-550 Hz, parece que resalta de nuevo la presencia del agujero, a pesar de estar tapado se aprecia claramente la existencia del orificio cuando la sonda hace el barrido sobre el agujero y a 2cm. Puede intuirse que hay algo cuando el barrido se hace a 4cm, mientras que por el contrario cuando se hace a 8cm no hay nada claro.

El espectrograma (*Figura 3-11*) refuerza esta interpretación, mostrando de nuevo un pico que sobresale a la altura de los 500 Hz, donde la amplitud de la línea que corresponde al barrido más cercano al agujero es mayor que cuando es a distancias mayores, lo que corrobora lo visto antes en los mapas acústicos.

3.3.4 Análisis orificio de 14 mm pasando a diferentes distancias (sin tapar)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-12 Mapas acústicos para el orificio de 14 mm sin tapar (Elaboración propia)

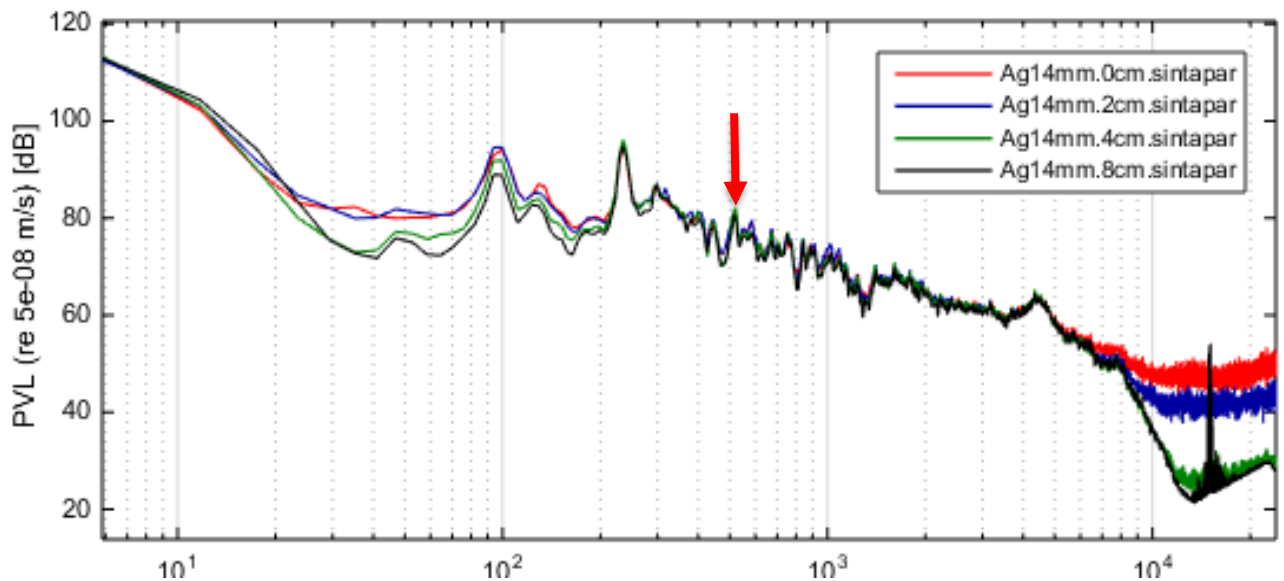
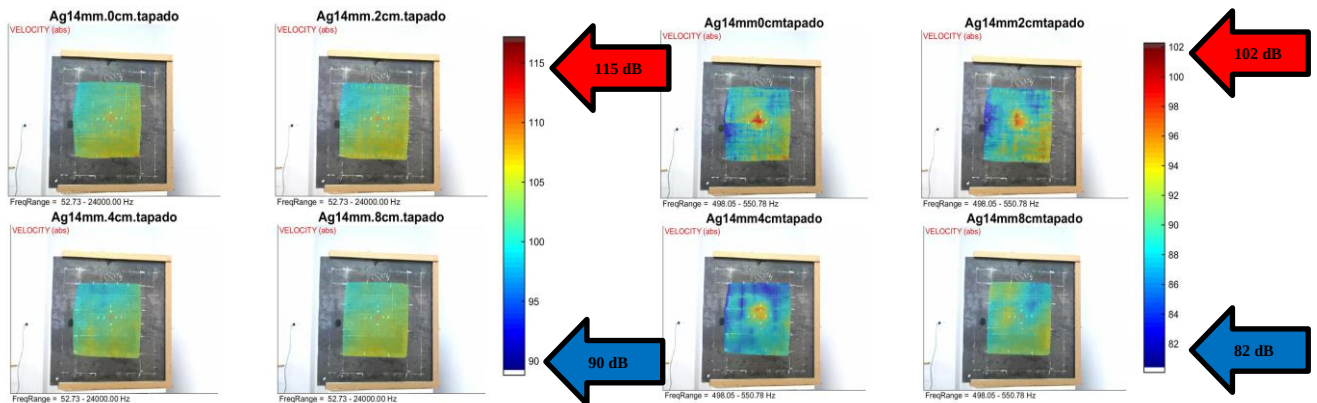


Figura 3-13 Espectrogramas para el orificio de 14 mm sin tapar (Elaboración propia)

En el análisis del orificio de 14 mm sin tapar, se aprecia con nitidez su presencia cuando la sonda hace el barrido justo encima o a una distancia de 2 cm. En estas posiciones, los mapas acústicos (*Figura 3-12*) evidencian una concentración notable en la zona central, con una energía destacada en el rango de 500-550 Hz. Sin embargo, al alejar la sonda y hacer el barrido a 4 cm, la intensidad comienza a disiparse y, al alcanzar los 8 cm, la señal se vuelve difusa, dificultando la identificación del agujero dentro del patrón acústico global. Esto sugiere que la capacidad de detección se reduce considerablemente a medida que aumenta la distancia de barrido.

El espectrograma (*Figura 3-13*) respalda esta tendencia, mostrando una señal bien definida alrededor de los 500 Hz, como venimos observando en los anteriores ensayos y comparativas.

3.3.5 Análisis orificio de 14 mm pasando a diferentes distancias (tapado)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-14 Mapas acústicos para el orificio de 14 mm tapado (Elaboración propia)

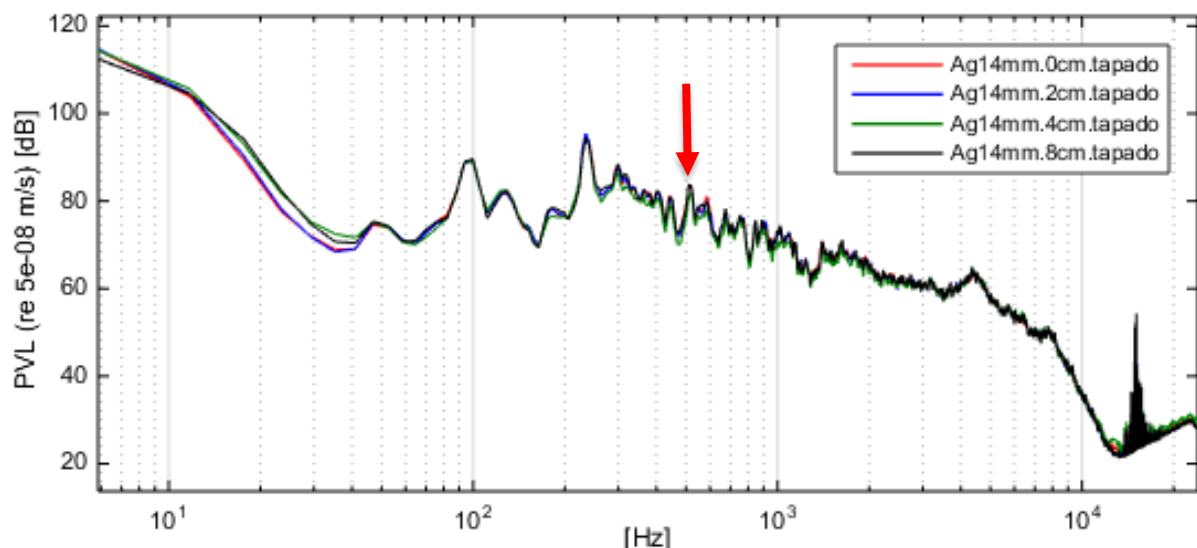
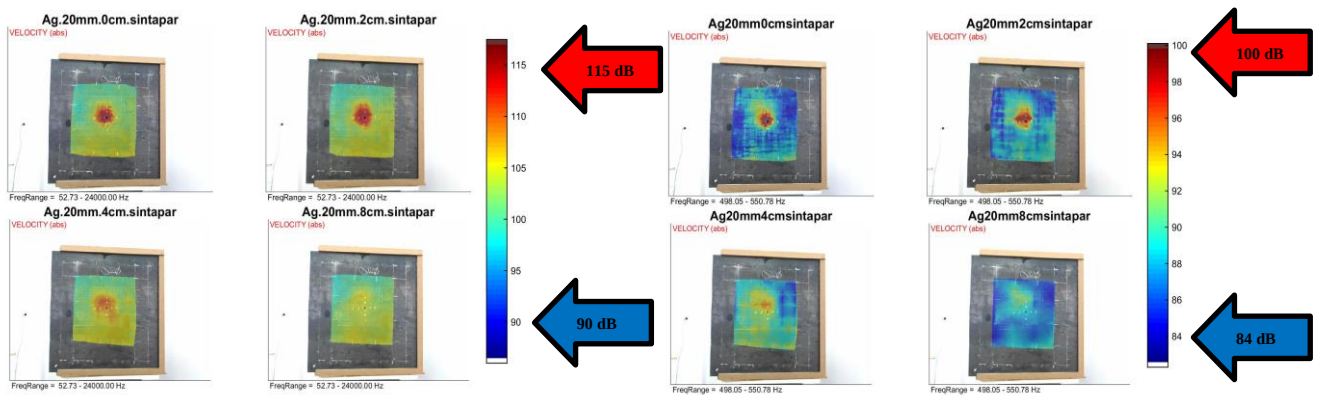


Figura 3-15 Espectrogramas para el orificio de 14 mm tapado (Elaboración propia)

En su estado sellado los mapas acústicos (Figura 3-14) de este orificio muestran una distribución de la energía mucho más homogénea en comparación con su condición abierta. En la imagen correspondiente al rango global de frecuencias, la presencia del agujero es prácticamente imperceptible, aunque el barrido se haga sobre el propio orificio. No se observa una focalización clara ni un patrón distintivo que permita identificarlo con facilidad, lo que sugiere que, al sellarse, su influencia en la propagación del sonido se diluye dentro del comportamiento general del material.

Sin embargo, al acotar el análisis al rango de 500-550 Hz, la presencia del orificio se hace más notoria, aunque con menor intensidad en comparación con su estado abierto. Cuando la sonda hace el barrido justo por encima del agujero y a 2 cm de distancia, es posible identificar una leve concentración de energía en la zona central. A partir de los 4 cm, esta señal empieza a desvanecerse, pero sigue siendo perceptible y a los 8 cm prácticamente desaparece dentro del ruido de fondo. El espectrograma (Figura 3-15) refuerza esta observación, ya que en torno a los 500 Hz vuelve a apreciarse un pico frecuencial que se traduce en el ruido entrando a través del agujero.

3.3.6 Análisis orificio de 20 mm pasando a diferentes distancias (sin tapar)



Todo rango de frecuencias

500.550 Hz

Figura 3-16 Mapas acústicos para el orificio de 20 mm sin tapar (Elaboración propia)

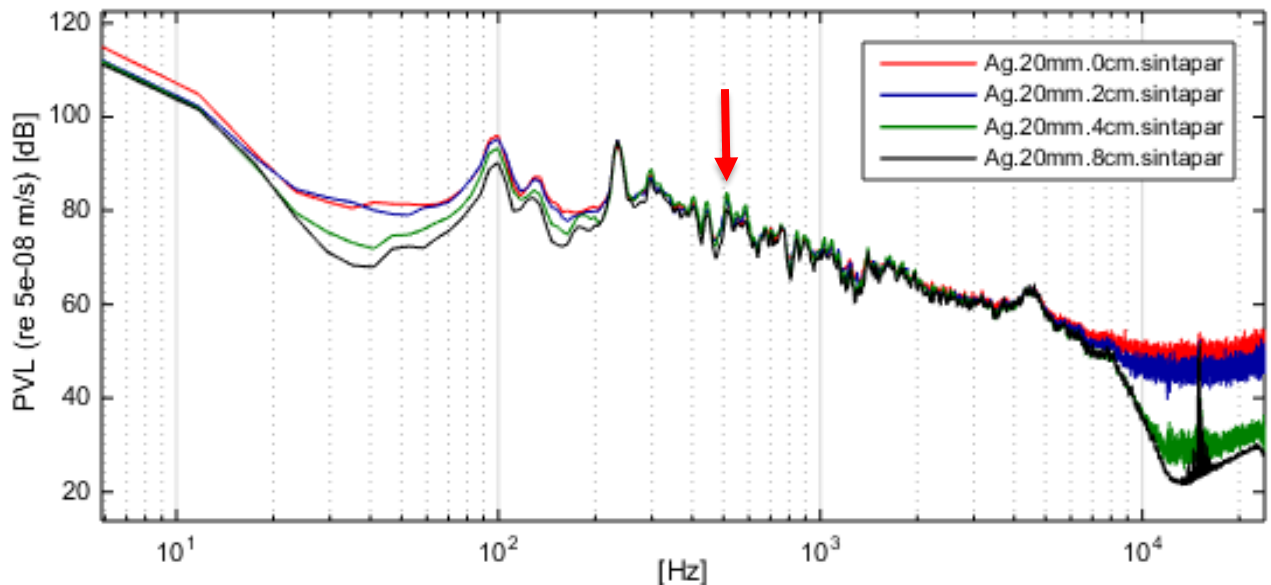


Figura 3-17 Espectrogramas para el orificio de 20 mm sin tapar (Elaboración propia)

Aquí, tanto en el mapa de frecuencias global como al acotarlo entre 500 y 550 Hz (Figura 3-16), se confirma que la presencia del orificio de 20 mm sin sellar es claramente identificable cuando la sonda hace el barrido sobre él y a 2 cm de distancia, aunque con mayor intensidad en dB cuando engloba todo el espectro frecuencial. En estas posiciones, la focalización acústica en la zona central se mantiene bien definida, con una emisión intensa que resalta frente al entorno. Sin embargo, cuando el sensor hace el barrido a 4 cm, la detección del agujero se vuelve más sutil; aunque aún es posible intuir su presencia. A los 8 cm es difícil detectar cualquier tipo de anomalía, pero al acotar el rango de frecuencias entre 500 y 550 Hz resalta un indicio de irregularidad en el centro de la superficie.

El espectrograma (Figura 3-17) confirma de nuevo la existencia de un pico frecuencial en torno a los 500 Hz. En esta zona, aunque es difícil de apreciar, la señal se presenta con mayor intensidad cuando el barrido se hace más cercano al agujero y va perdiendo claridad conforme aumenta la distancia.

3.3.7 Análisis orificio de 20 mm pasando a diferentes distancias (tapado)

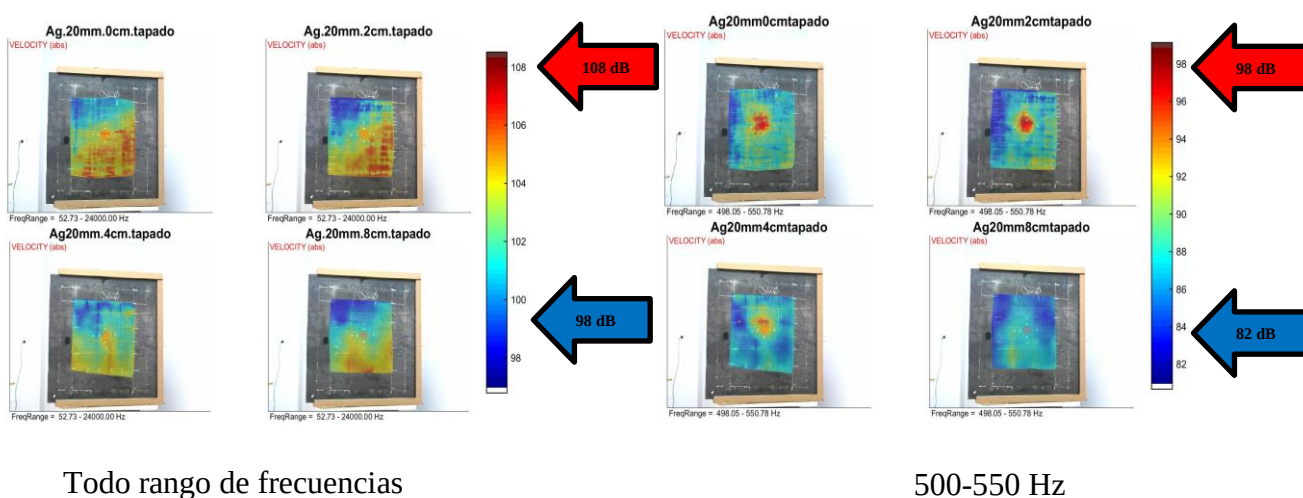


Figura 3-18 Mapas acústicos para el orificio de 20 mm tapado (Elaboración propia)

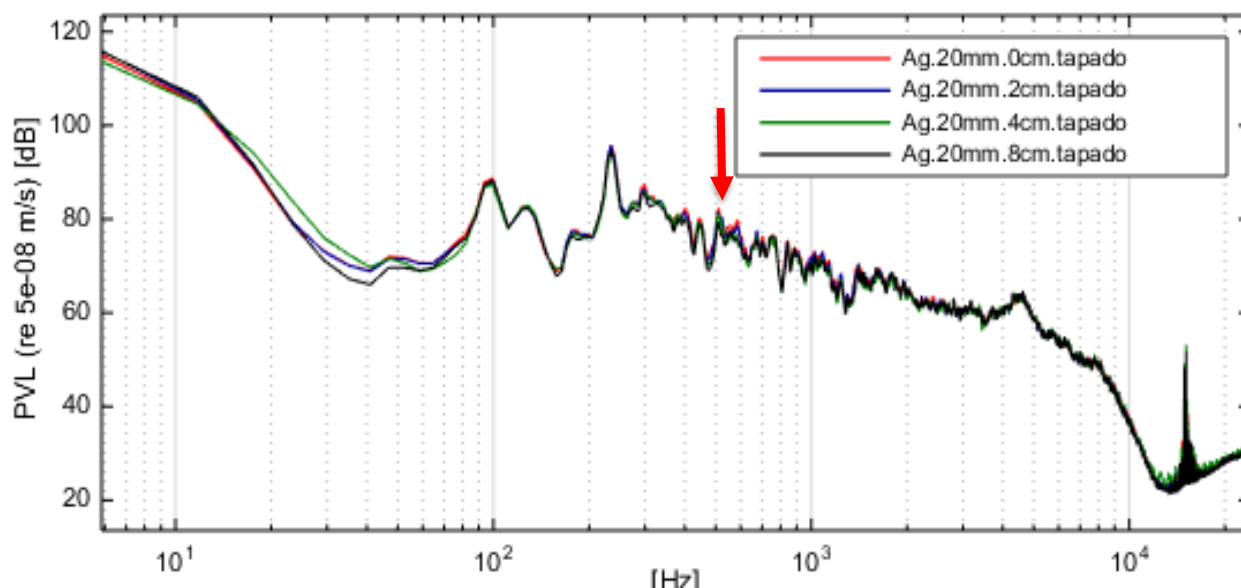


Figura 3-19 Espectrogramas para el orificio de 20 mm tapado (Elaboración propia)

En el análisis del orificio de 20 mm en su estado sellado, los mapas acústicos (*Figura 3-18*) muestran un comportamiento llamativo. En el rango global de frecuencias, el agujero prácticamente no se distingue, y la mayor parte de la emisión de sonido se concentra en la zona inferior de la imagen en lugar de en el centro, donde cabría esperar. Sin embargo, cuando se acota el análisis al rango de 500-550 Hz, la situación cambia. En esta banda, el agujero se hace claramente identificable cuando la sonda hace el barrido justo por encima de él y a 2 cm de distancia. Incluso a 4 cm, aunque con menor intensidad, se sigue percibiendo su influencia. A los 8 cm, sin embargo, la señal se disipa y deja de destacar.

El espectrograma (*Figura 3-19*) refuerza esta idea, mostrando otra vez la presencia de un pico frecuencial a la altura de 500 Hz. En comparación a cuando el orificio se encontraba sin tapar, se aprecia que la presencia del agujero sigue siendo detectable a corta distancia, aunque con una intensidad menor.

Después de examinar cómo varía el comportamiento acústico en un mismo orificio al modificar la distancia de paso de barrido de la sonda, ahora cambiamos el enfoque para analizar el efecto del tamaño del orificio manteniendo constante este barrido. Siguiendo la misma metodología, comparamos los mapas acústicos y espectrogramas, tanto en la condición de orificio abierto como en su versión sellada, con el objetivo de identificar tendencias y diferencias en la propagación del sonido según el diámetro del agujero.

3.3.8 Análisis del barrido de la sonda pasando sobre el orificio (sin tapar)

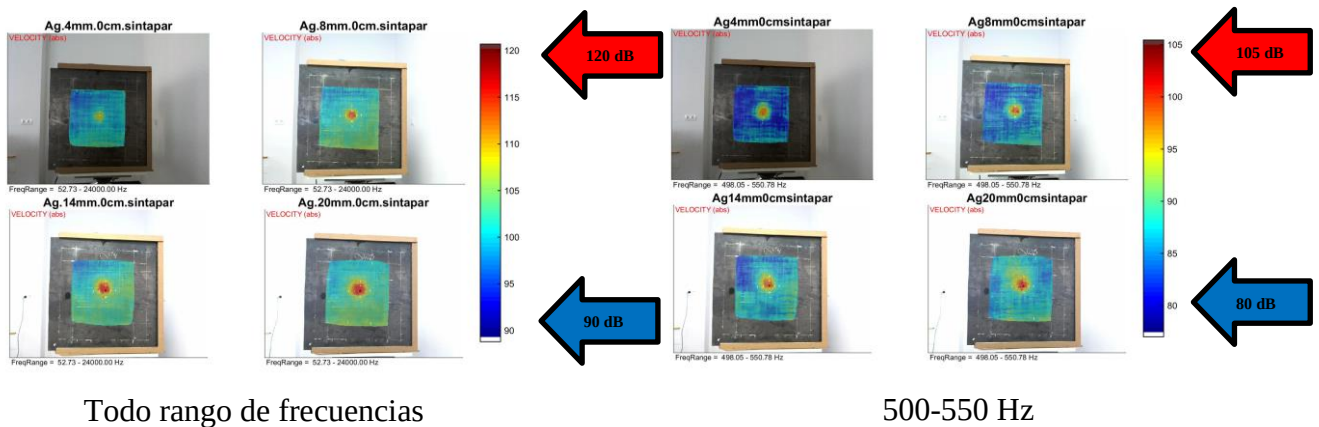


Figura 3-20 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del agujero sin tapar (Elaboración propia)

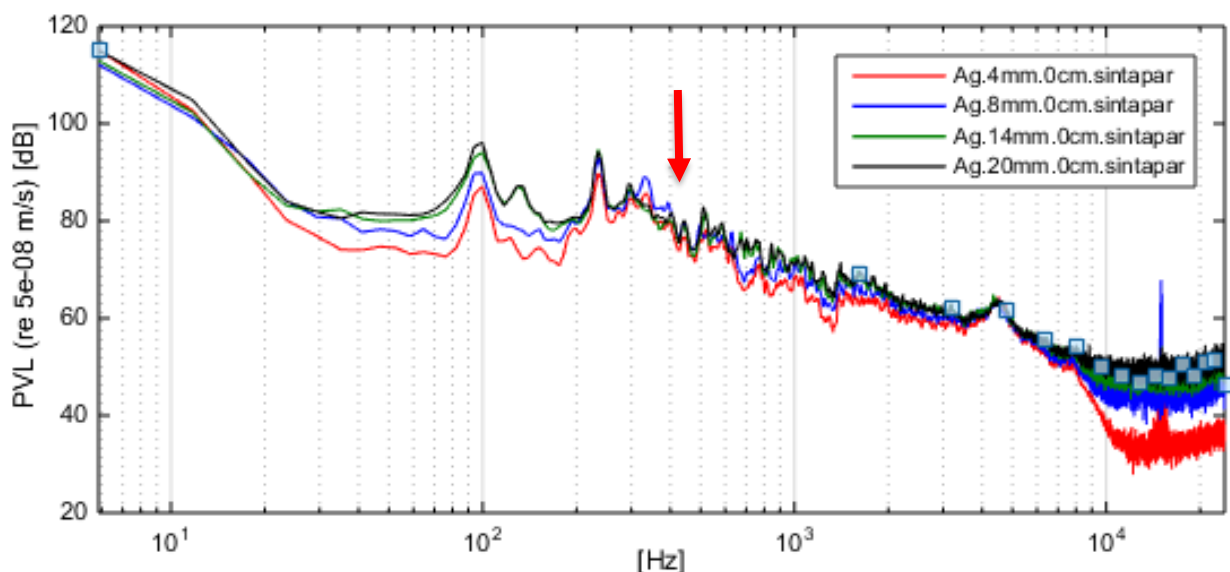
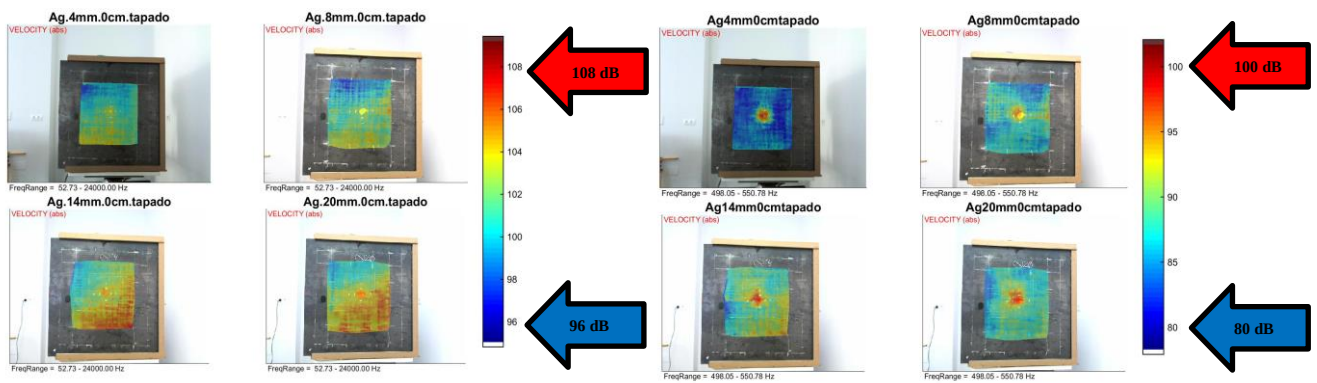


Figura 3-21 Espectrogramas con la sonda pasando por encima del agujero sin tapar (Elaboración propia)

Al observar los mapas acústicos (Figura 3-20) en el rango global de frecuencias, se aprecia con claridad cómo los orificios de mayor tamaño, como los de 20 mm, 14 mm y 8 mm, generan una respuesta más intensa y definida, mientras que el de 4 mm, aunque se puede llegar a distinguir, se hace con una señal mucho más tenue.

Cuando el análisis se centra en la franja de 500 a 550 Hz, la detección del orificio de menor diámetro mejora, aunque su intensidad sigue siendo notablemente inferior a la de los otros. El espectrograma (Figura 3-21) confirma esta tendencia, mostrando un pico claro en torno a los 500 Hz. Fijándose bien en este pico frecuencial, se aprecia como la amplitud de los agujeros de diámetros de mayor tamaño es significativamente mayor que los más pequeños.

3.3.9 Análisis del barrido de la sonda pasando sobre el orificio (tapado)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-22 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del agujero tapado (Elaboración propia)

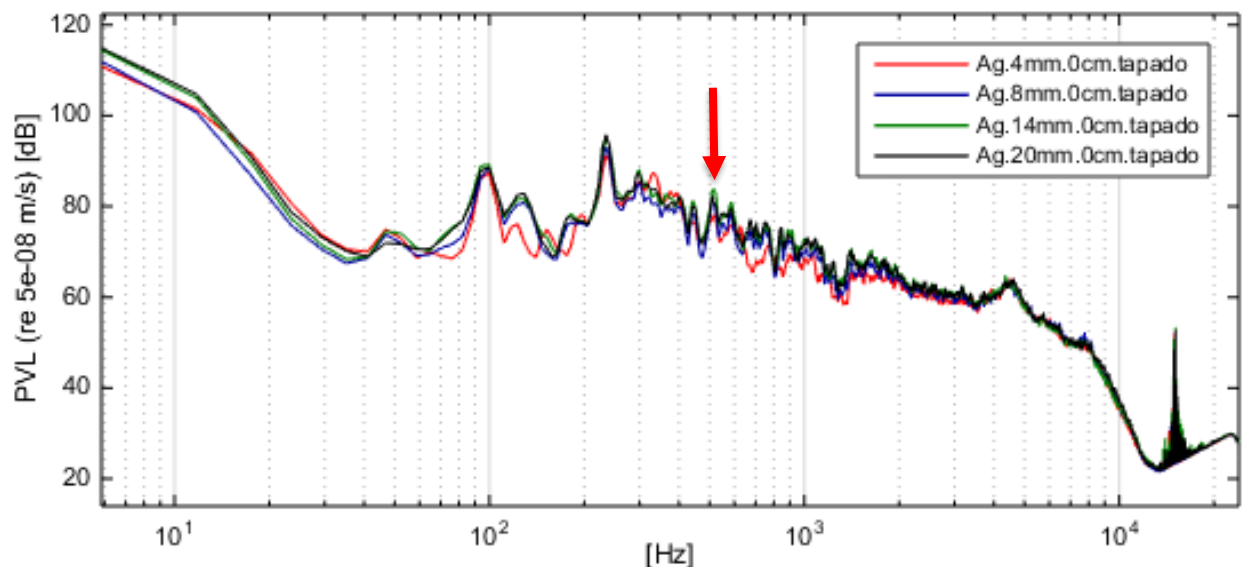


Figura 3-23 Espectrogramas con la sonda pasando por encima del agujero tapado (Elaboración propia)

En el rango global de frecuencias, los mapas acústicos (*Figura 3-22*) no muestran una focalización clara que permita identificar la presencia de los orificios sellados. De hecho, incluso en los de mayor tamaño, la mayor concentración de energía parece desplazarse hacia la parte inferior en lugar de centrarse en la zona del agujero. Esto puede deberse a una combinación de factores, como la forma en que el sellado afecta la propagación de la onda o posibles reflexiones en la estructura de la superficie de ensayo, que redirigen la energía hacia otras áreas.

Sin embargo, al acotar el análisis al intervalo entre 500 y 550 Hz, los resultados cambian drásticamente. En este caso, los cuatro orificios pueden identificarse con claridad, mostrando una mayor concentración de energía en su ubicación exacta. Aunque la intensidad de la señal es menor en comparación con los casos sin sellar, la presencia de estos sigue siendo evidente. Esto indica que, pese al sellado, la estructura del material sigue influyendo en la propagación del sonido dentro de este rango de frecuencias, permitiendo aún la detección de los agujeros, aunque con una respuesta más atenuada.

3.3.10 Análisis del barrido de la sonda pasando a 2 cm del orificio (sin tapar)

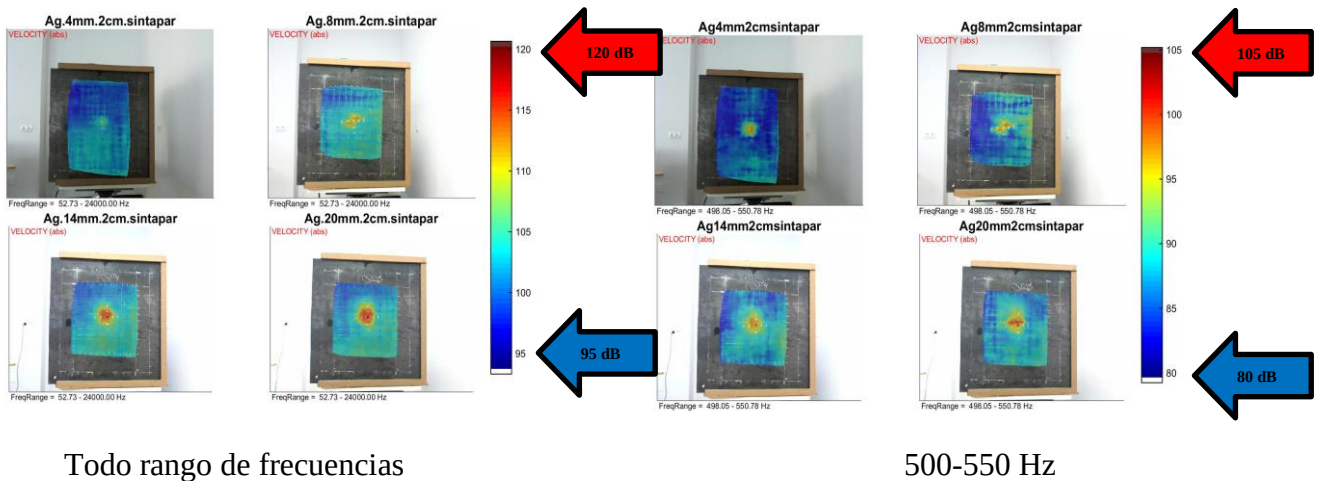


Figura 3-24 Mapas acústicos con la sonda pasando a 2 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)

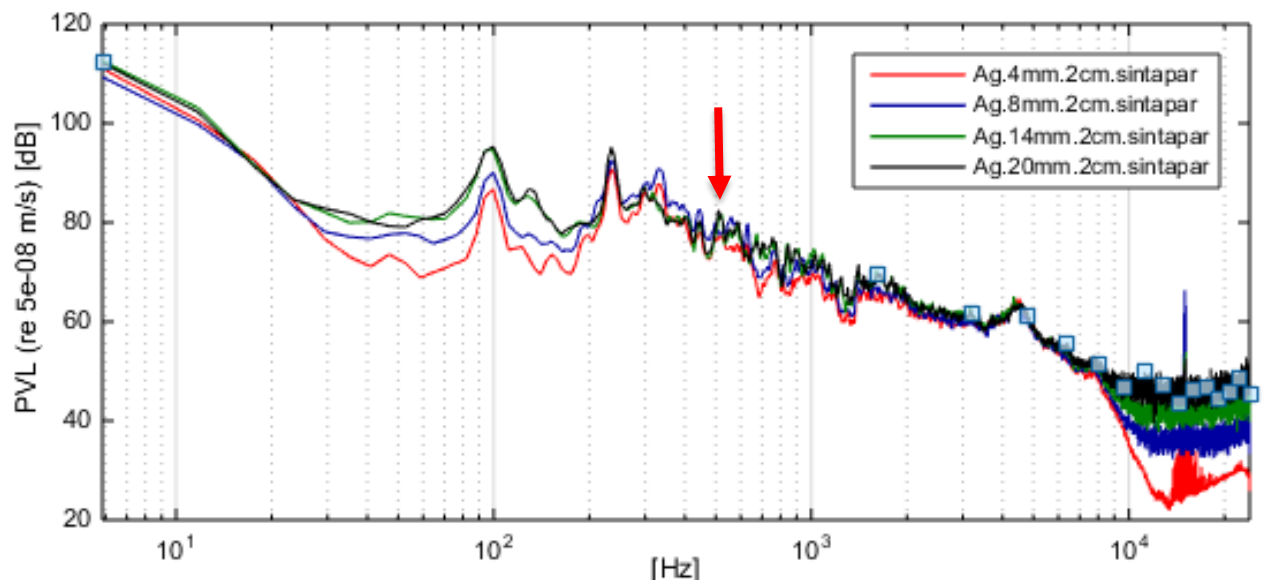
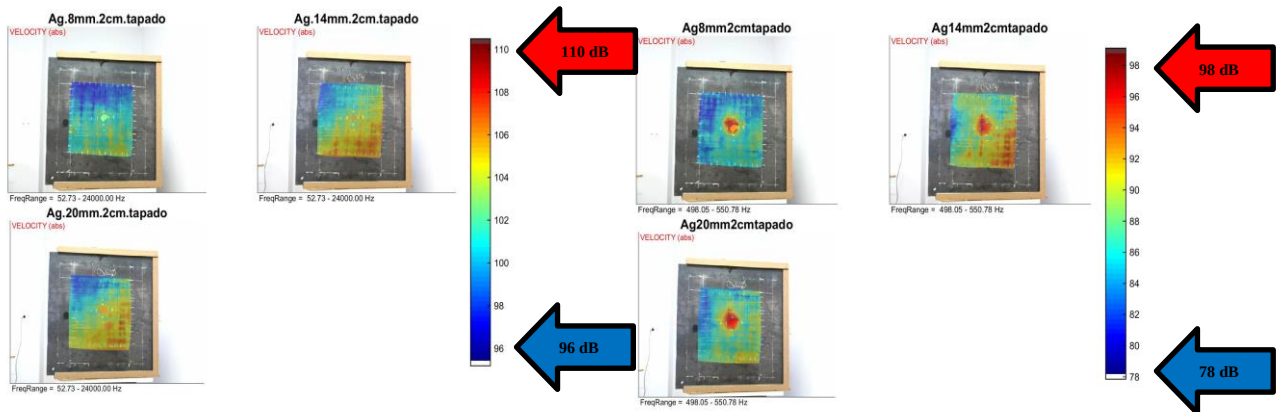


Figura 3-25 Espectrogramas con la sonda pasando a 2 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)

Aquí, los orificios de 20 mm, 14 mm y 8 mm, se detectan con claridad, mientras que el de 4 mm apenas deja una huella perceptible en el mapa acústico que engloba todo el espectro frecuencial (*Figura 3-24*). La intensidad de la respuesta acústica sigue la tendencia esperada: a mayor diámetro, mayor presencia en el mapa. Sin embargo, esta tendencia se hace aún más evidente cuando se acota la frecuencia entre 500 y 550 Hz, donde los cuatro orificios pueden identificarse sin ambigüedad, aunque con diferencias notables en la energía registrada. El de 4 mm se percibe con menor intensidad en comparación con los de mayor tamaño.

El espectrograma (*Figura 3-25*) respalda esta observación, reflejando un comportamiento coherente con los mapas acústicos. De nuevo, como en todos los casos anteriores, vuelve a apreciarse un pico frecuencial alrededor de los 500 Hz. Se trata de un caso similar a cuando la sonda hacia el barrido por encima del agujero sin tapar, donde los orificios de mayor tamaño tienen un pico frecuencial de mayor amplitud en comparación con los de 4 mm y 8 mm.

3.3.11 Análisis del barrido de la sonda pasando a 2 cm del orificio (tapado)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-26 Mapas acústicos con la sonda pasando a 2 cm del agujero tapado (Elaboración propia)

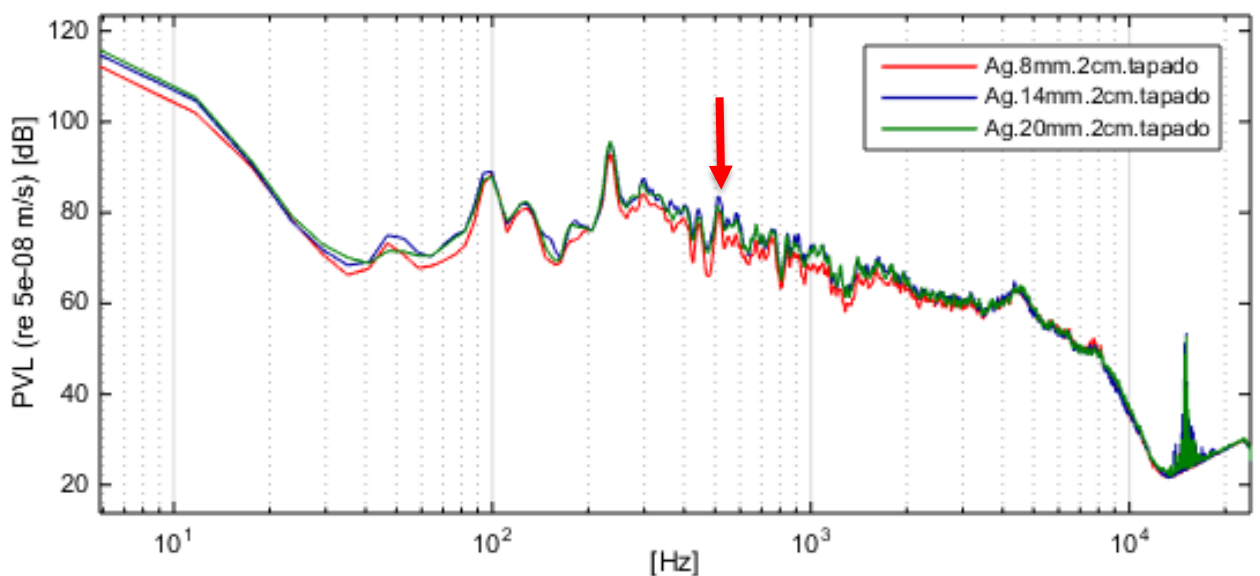


Figura 3-27 Espectrogramas con la sonda pasando a 2 cm del agujero tapado (Elaboración propia)

Con la sonda haciendo el barrido a 2 cm de los orificios sellados, los mapas acústicos (Figura 3-26) en el rango global de frecuencias no ofrecen una imagen clara de la presencia de los agujeros. En su lugar, se percibe una mayor acumulación de energía en la parte inferior y en el lateral derecho, sobre todo en los orificios de mayor diámetro, lo que puede deberse a reflejos o interferencias en la estructura.

Sin embargo, al acotar el análisis al rango de 500-550 Hz, la situación cambia drásticamente. En este intervalo, los tres orificios de 8 mm, 14 mm y 20 mm comienzan a diferenciarse con mayor claridad, aunque en el de 14 mm se sigue viendo una concentración de energía en el lateral derecho. El espectrograma (Figura 3-27), muestra como es habitual, un pico frecuencial notable en torno a los 500 Hz. A su vez, se puede ver una respuesta más marcada en los agujeros más grandes (14 mm y 20 mm), donde la amplitud del pico frecuencial es algo mayor.

3.3.12 Análisis del barrido de la sonda pasando a 4 cm del orificio (sin tapar)

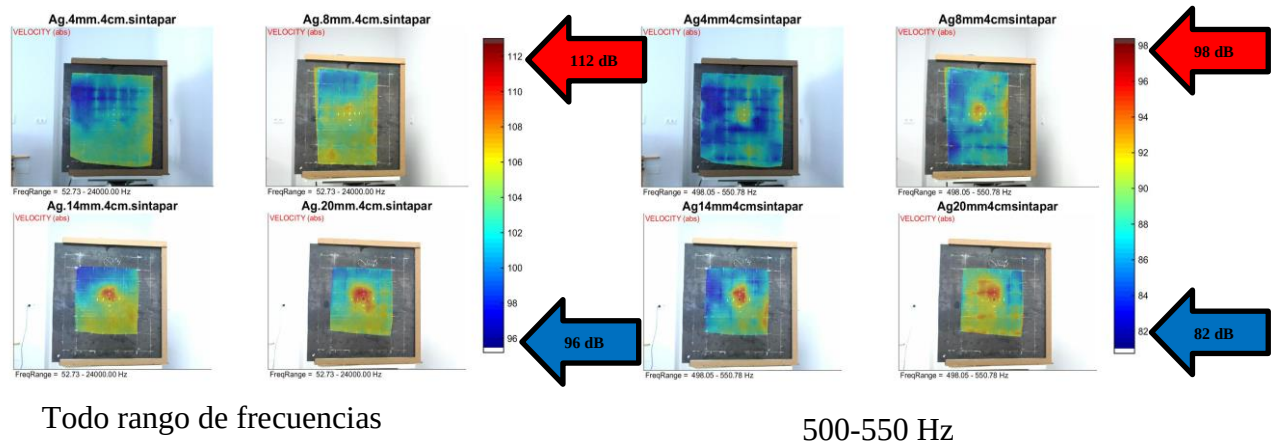


Figura 3-28 Mapas acústicos con la sonda pasando a 4 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)

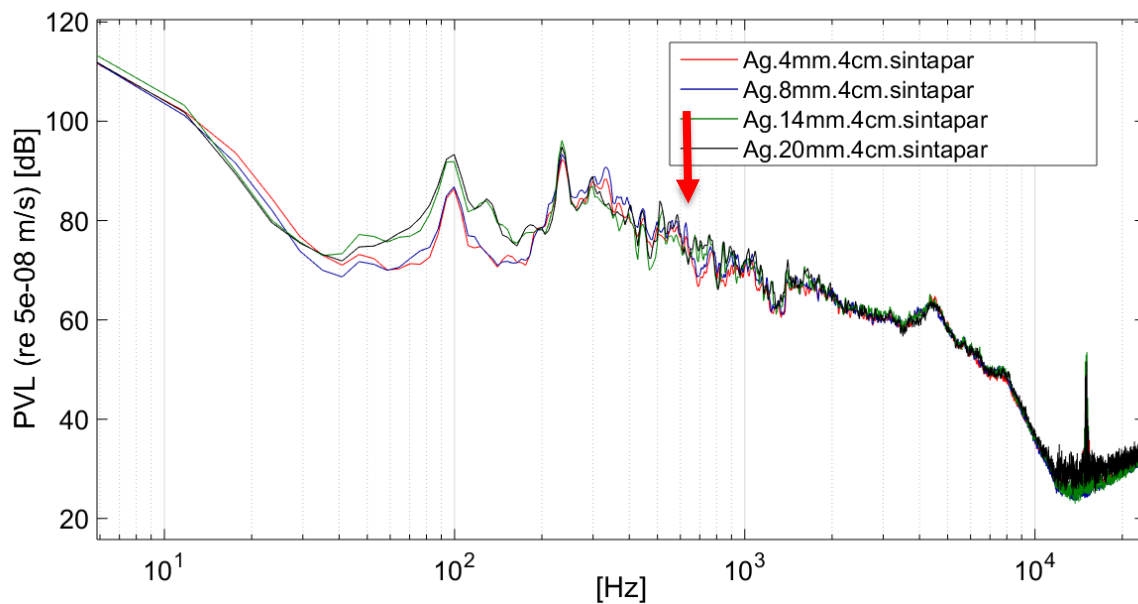
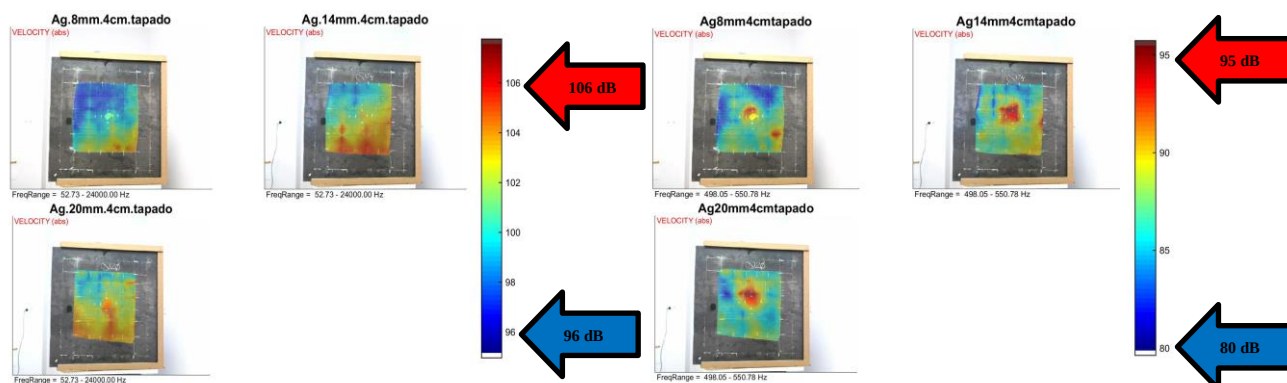


Figura 3-29 Espectrogramas con la sonda pasando a 4 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)

A medida que la distancia de paso de barrido de la sonda se incrementa a 4 cm, la identificación de los orificios en los mapas acústicos (Figura 3-28) se vuelve más difusa, aunque con ciertas particularidades. En el rango global de frecuencias, los orificios de 14 mm y 20 mm siguen siendo visibles. Por otro lado, los orificios de 8 mm y 4 mm apenas se perciben, siendo el más pequeño prácticamente imperceptible en este contexto.

Al acotar la frecuencia entre 500 y 550 Hz, la situación mejora ligeramente para el orificio de 8 mm, que empieza a reconocerse, aunque con una intensidad menor. Sin embargo, el de 4 mm sigue sin mostrarse con claridad. Este comportamiento es corroborado en el espectrograma (Figura 3-29), donde centrándonos otra vez en la zona acotada alrededor de los 500 Hz, se observa un pico frecuencial similar a los que venimos estudiando de antes. Es interesante notar que, aunque se espera que el orificio de 20 mm destaque más, la presencia de ruido en su entorno atenúa su definición en los mapas acústicos, sobre todo en el mapa acotado entre 500 y 550 Hz, donde sorprendentemente se detecta mejor el agujero de 14 mm.

3.3.13 Análisis del barrido de la sonda pasando a 4 cm del orificio (tapado)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-30 Mapas acústicos con la sonda pasando a 4 cm del agujero tapado (Elaboración propia)

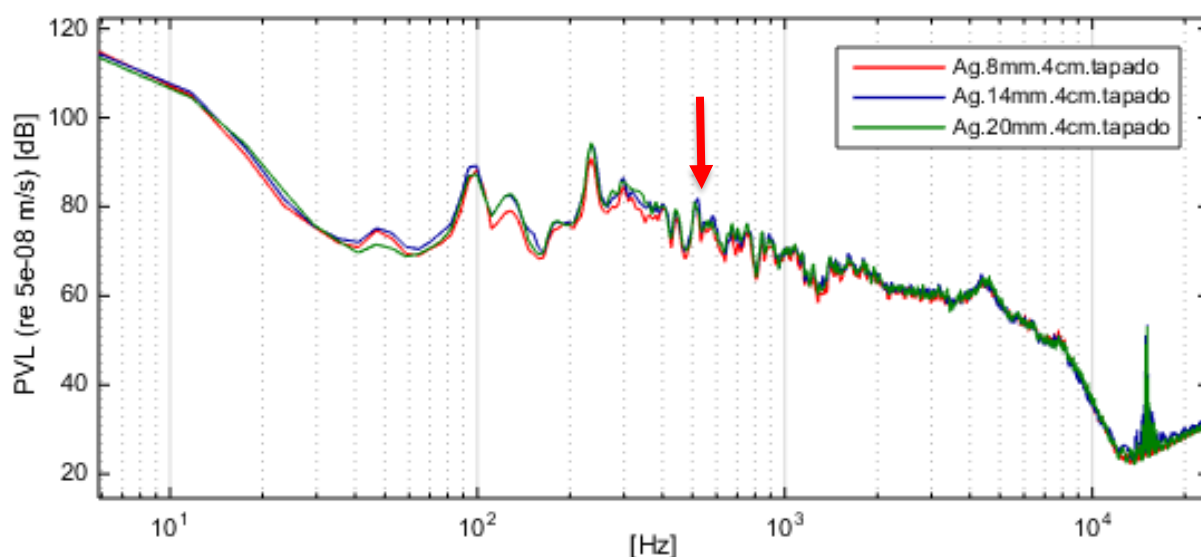
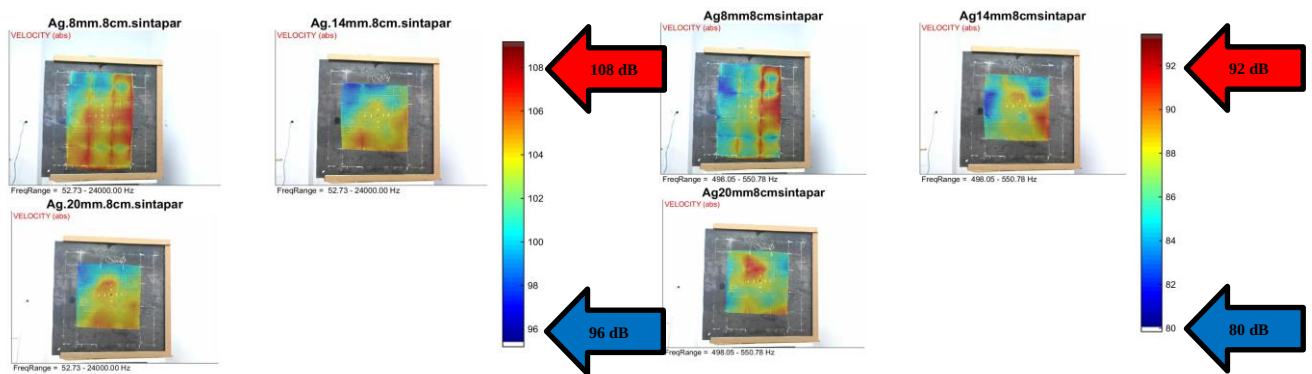


Figura 3-31 Espectrogramas con la sonda pasando a 4 cm del agujero tapado (Elaboración propia)

Al aumentar la distancia de paso de barrido de la sonda a 4 cm y con los orificios sellados, el comportamiento acústico presenta particularidades interesantes. En el mapa acústico (*Figura 3-30*) que engloba todo el espectro frecuencial, no se observa un foco claro de intensidad que permita identificar directamente la ubicación de los orificios. En cambio, el ruido parece concentrarse en la parte inferior y lateral derecho de la chapa, especialmente en los orificios de mayor tamaño, similar al comportamiento que se evidenció cuando el barrido se hacía a 2 cm sobre el orificio tapado.

Cuando se acotan las frecuencias entre 500 y 550 Hz, la imagen revela con mayor claridad la presencia de los orificios, aunque con intensidades diferenciadas. Los de mayor diámetro destacan con una intensidad más pronunciada, mientras que el de 8 mm, aunque perceptible, muestra una señal más débil. Curiosamente, en este último caso aparece un segundo punto de intensidad en la parte derecha de la chapa, lo que plantea la pregunta de si podría tratarse de una interferencia, una reflexión o algún otro fenómeno relacionado con la propagación del sonido en la superficie de la chapa. Finalmente, el espectrograma (*Figura 3-31*) refuerza la idea de que sigue existiendo un pico frecuencial en torno a los 500 Hz y donde la amplitud de estos es prácticamente idéntica en los tres casos.

3.3.14 Análisis del barrido de la sonda pasando a 8 cm del orificio (sin tapar)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-32 Mapas acústicos con la sonda pasando a 8 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)

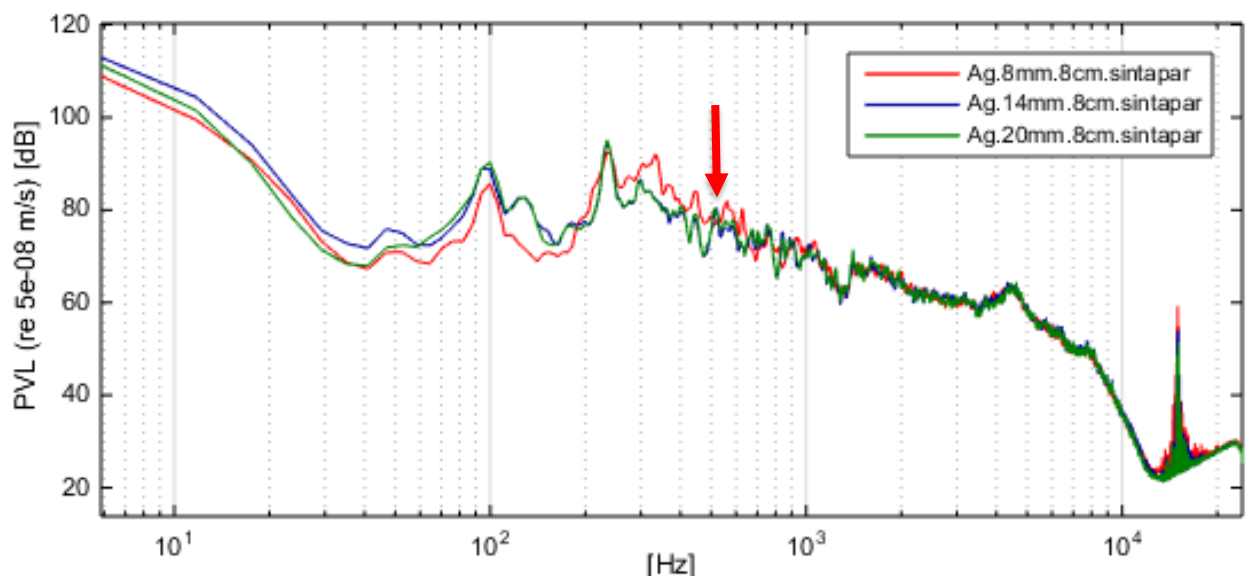
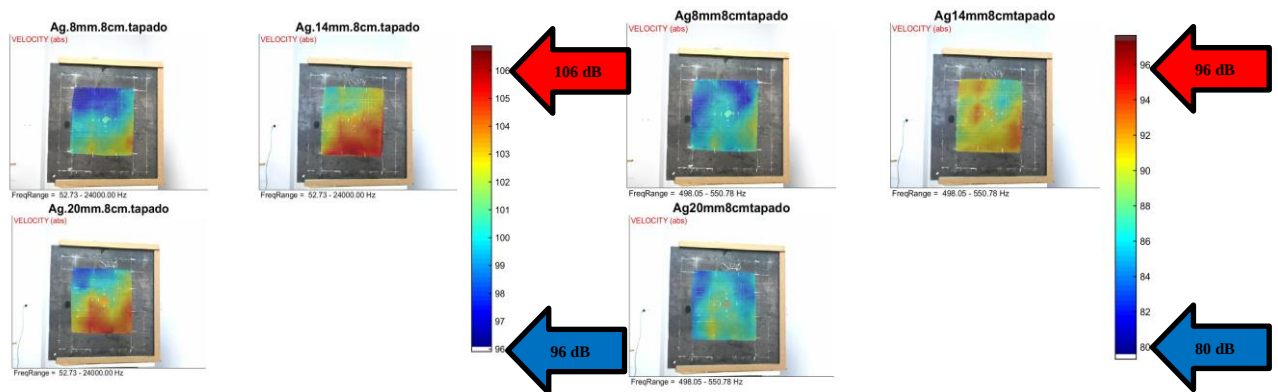


Figura 3-33 Espectrogramas con la sonda pasando a 8 cm del agujero sin tapar (Elaboración propia)

En esta medición con la sonda haciendo el barrido a 8 cm, el patrón acústico cambia notablemente con respecto a las distancias anteriores. En el análisis del rango global de frecuencias (*Figura 3-32*), los focos de los orificios prácticamente no existen, con una ligera excepción en el de 20 mm, donde se percibe algo más de intensidad, aunque sin una forma bien definida. Además, se observa una distribución de ruido bastante homogénea en toda la superficie de la chapa, siendo más pronunciada en el área del orificio de 8 mm.

Cuando se restringe el análisis al rango entre 500 y 550 Hz, si bien el orificio de 20 mm todavía genera un leve foco alrededor de la zona del orificio, los demás quedan prácticamente enmascarados por una distribución difusa de ruido, especialmente concentrada en la parte derecha de la chapa, situación recurrente en varios ensayos anteriores. Este fenómeno puede deberse a una vibración localizada o a la entrada de sonido desde ese extremo. En el espectrograma (*Figura 3-33*), se sigue apreciando un pico frecuencial en los orificios de 14 mm y 20 mm. Sin embargo, a diferencia de los espectrogramas anteriores, el pico del agujero de 8 mm se vuelve inexistente.

3.3.15 Análisis del barrido de la sonda pasando a 8 cm del orificio (tapado)



Todo rango de frecuencias

500-550 Hz

Figura 3-34 Mapas acústicos con la sonda pasando a 8 cm del agujero tapado (Elaboración propia)

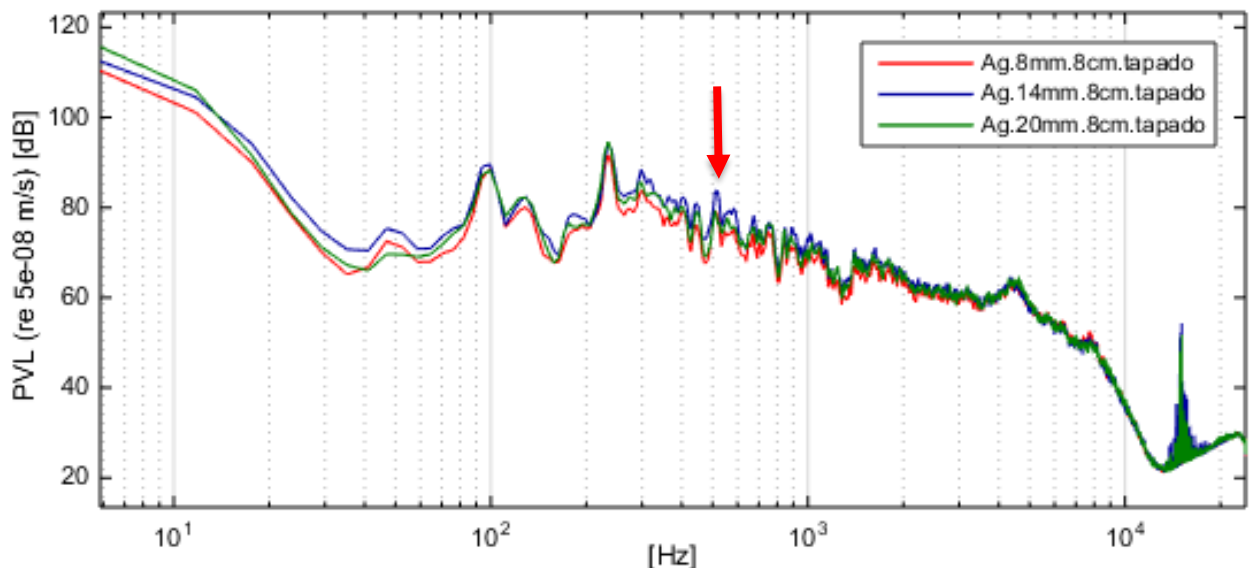


Figura 3-35 Espectrogramas con la sonda pasando a 8 cm del agujero tapado (Elaboración propia)

En el mapa global de frecuencias (*Figura 3-34*) se observa una mayor energía en la parte inferior y en la zona derecha de la chapa, un comportamiento recurrente que podría estar relacionado con una entrada de sonido o vibraciones estructurales en ese extremo. Sin embargo, la presencia de los orificios desaparece por completo, haciéndolos imposibles de detectar. En la imagen con la frecuencia acotada entre 500 y 550 Hz, no se consigue resaltar de manera contundente ningún agujero de manera nítida, aunque llama la atención que el orificio de 14 mm muestra una intensidad mayor que el de 20 mm, lo que sugiere que el sellado o la propia distribución de las ondas están generando una respuesta atípica en esa región. Finalmente, el espectrograma (*Figura 3-35*) refuerza la idea de que el orificio de 14 mm muestra una intensidad más contundente que los otros orificios, pues si se evidencia un pico frecuencial en la zona de interés, mientras que en los otros dos agujeros no se percibe.

Para seguir profundizando en el análisis, se compara cómo afecta el sellado del orificio a la propagación del sonido. Se mantienen constantes tanto el diámetro del agujero como la distancia de barrido de la sonda, de manera que cualquier diferencia observada puede atribuirse directamente al hecho de que el orificio esté abierto o tapado. Esto nos ayuda a detectar posibles patrones y evaluar si el sellado introduce cambios significativos en la respuesta acústica.

No se analizan todos los casos, sino una selección específica que resulta especialmente interesante para enriquecer el estudio. A su vez, solamente se estudian los mapas con el rango de frecuencias acotado entre 500 y 550 Hz, donde los mapas presentan unos resultados más visuales. La idea no es solo validar lo observado hasta ahora, sino también abrir nuevas líneas de interpretación que aporten más profundidad al desarrollo del TFG.

3.3.16 Análisis del barrido de la sonda pasando por encima del orificio de 8 mm (tapado y sin tapar)

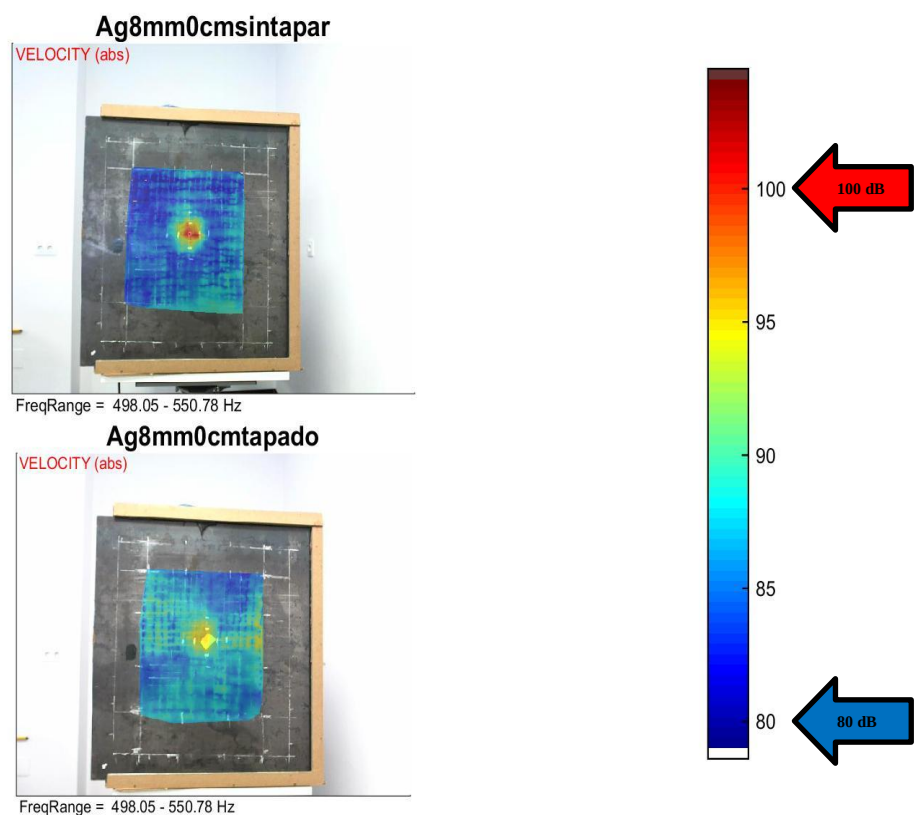


Figura 3-36 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del orificio de 8 mm (Elaboración propia)

En esta comparación (*Figura 3-36*), se aprecia con claridad el impacto del sellado en la propagación del sonido. En la imagen superior, correspondiente al orificio de 8 mm abierto, la señal acústica se concentra de manera evidente en el centro, con una intensidad pronunciada que permite identificar con precisión la ubicación del agujero. Sin embargo, al observar la imagen inferior, donde el orificio ha sido sellado, la intensidad cambia significativamente. Aunque se puede intuir su presencia en la zona central, la energía se reparte de manera más homogénea a lo largo de la chapa, lo que sugiere una mayor dispersión y menor focalización del sonido en un único punto. Esta diferencia puede deberse a la forma en que el material del sellado altera la transmisión y reflexión de las ondas, suavizando el contraste acústico que antes resaltaba la abertura.

3.3.17 Análisis del barrido de la sonda pasando por encima del orificio de 14 mm (tapado y sin tapar)

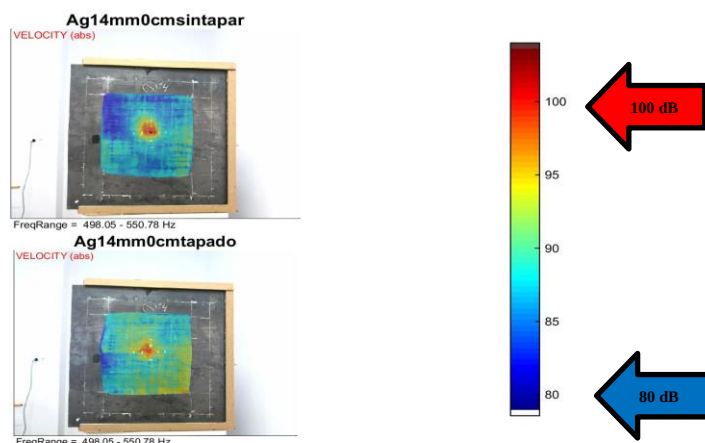


Figura 3-37 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del orificio de 14 mm (Elaboración propia)

En la *Figura 3-37* el orificio de 14 mm muestra un comportamiento que, a primera vista, parece seguir la misma tendencia observada en el de 8 mm, pero con algunas diferencias sutiles. Cuando el orificio está sin tapar, se detecta el agujero claramente localizado en el centro. Sin embargo, en la imagen inferior, donde el orificio está sellado, aunque la ubicación sigue siendo perceptible, la distribución de la energía sonora es más difusa y se propaga de manera menos focalizada por la chapa.

En este caso, la diferencia de intensidad entre el orificio abierto y sellado no es tan pronunciada como en el de 8 mm. Esto sugiere que, cuanto mayor es el diámetro del orificio, más difícil resulta anular por completo su efecto sobre la propagación del sonido, incluso cuando está tapado.

3.3.18 Análisis del barrido de la sonda pasando por encima del orificio de 20 mm (tapado y sin tapar)

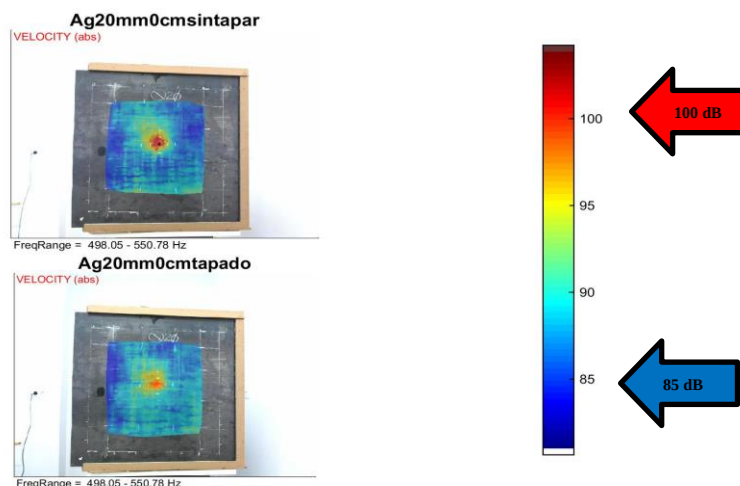


Figura 3-38 Mapas acústicos con la sonda pasando por encima del orificio de 20 mm (Elaboración propia)

Como podemos observar en la *Figura 3-38*, incluso con el orificio sellado, la presencia del orificio sigue siendo perceptible, aunque con menor intensidad que cuando está abierto. En la imagen superior, el agujero de 20 mm se distingue con claridad, concentrando la energía en su centro. Al taparlo, la intensidad se atenúa, pero no desaparece del todo. Esto confirma la tendencia observada: a mayor diámetro, más difícil es anular completamente su efecto, incluso cuando la apertura está cubierta.

3.4 Tendencias observadas

Tras el estudio de los mapas acústicos y espectrogramas, se ha elaborado una representación gráfica que sintetiza los resultados obtenidos en relación con la distancia máxima a la que ha sido posible detectar los distintos orificios.

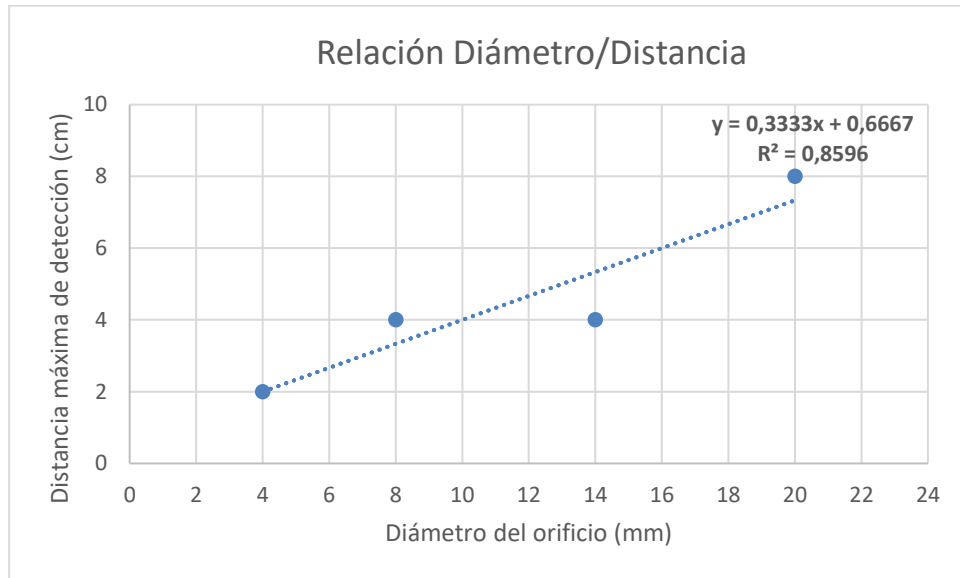


Figura 3-39 Relación aproximada entre el diámetro del orificio y la distancia de barrido máxima a la que puede ser detectado (Elaboración propia)

Como ilustra la *Figura 3-39* existe una tendencia positiva entre el diámetro del orificio y la distancia de barrido máxima a la que se logra detectarlo. Esta correlación diámetro-distancia proporciona un patrón claro: a mayor diámetro de la perforación, mayor es su huella acústica detectable. La línea de tendencia que acompaña los datos reales presenta una ecuación: $y = 0,333x + 0,6667$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,8596$, lo que indica una fuerte correlación lineal entre ambas variables. Esta aproximación no solo permite interpretar mejor los resultados experimentales, sino que ofrece también un marco predictivo: por ejemplo, extrapolando la ecuación, podría estimarse que un orificio de 30 mm sería detectado haciendo el barrido a 10,7 cm del orificio.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo confirman la viabilidad de identificar acústicamente orificios en una superficie metálica mediante el software *Scan & Paint*. A través de los mapas acústicos y espectrogramas generados, se puede detectar la presencia y ubicación de agujeros de distintos diámetros en la chapa de ensayo. En particular, los orificios abiertos muestran zonas focalizadas de alta energía justo en la posición del orificio, tanto para cuando se analiza todo el espectro frecuencial como cuando se acota entre 500 y 550 Hz. Por el contrario, al tapar los orificios, estas anomalías sonoras prácticamente desaparecen cuando se analiza todo el espectro de frecuencias, dando lugar a mapas mucho más homogéneos y sin picos destacables. En resumen, *Scan & Paint* demuestra ser una herramienta efectiva para la detección acústica de defectos tipo orificio en chapas metálicas, cumpliendo el primer objetivo del proyecto.

En cuanto a la influencia de las variables de estudio, los experimentos revelan tendencias coherentes. El diámetro del orificio tiene un impacto directo en la detectabilidad acústica: los agujeros de mayor diámetro producen emisiones sonoras más intensas y fáciles de captar, mientras que los de menor diámetro generan señales más débiles. Esta observación se refleja en los mapas acústicos, donde los orificios grandes muestran zonas de alta intensidad más amplias y niveles de velocidad de partícula superiores en comparación con agujeros pequeños.

Otro factor crítico que se analiza es la distancia lateral de barrido de la sonda respecto al orificio. Los ensayos muestran que existe una distancia límite a partir de la cual el orificio deja de ser visible acústicamente. Cuando la sonda hace el barrido directamente sobre el agujero, la detección es óptima para todos los diámetros, revelando claramente la presencia del orificio. A medida que aumentamos la separación lateral entre la trayectoria de la sonda y el agujero, la intensidad de la señal asociada a este disminuye gradualmente. Por encima de cierta distancia, la influencia del agujero queda enmascarada por el ruido de fondo y las resonancias de la propia chapa. En resumen, cuanto más lejos haga el barrido el sensor, más difícil resulta detectar el orificio, especialmente para diámetros pequeños. Gracias a esta tendencia identificada, se cumple con otro de los objetivos del trabajo, ya que ahora se dispone de criterios que ayudan a predecir la distancia máxima de barrido de la sonda para identificar un agujero en función de su diámetro.

En términos globales, las conclusiones respaldan la efectividad del software *Scan & Paint*. Se ha verificado experimentalmente que incluso perforaciones milimétricas pueden llegar a detectarse acústicamente, siempre que se utilice un barrido adecuado y un análisis espectral focalizado. Cabe destacar que el uso combinado de mapas acústicos y espectrogramas ha sido clave para alcanzar estos hallazgos.

4.2 Líneas futuras

A partir del trabajo desarrollado, surgen diversas líneas futuras que permitirían seguir profundizando en las capacidades del software *Scan & Paint*, así como en su aplicación en contextos reales dentro del ámbito naval.

- Una primera línea, de carácter más práctico y aplicado, consistiría en trasladar la metodología empleada a un entorno operativo, realizando pruebas a bordo de buques reales o en instalaciones navales como astilleros o unidades en mantenimiento. Evaluar el rendimiento del sistema en condiciones reales permitiría validar su utilidad frente a situaciones más complejas y desafiantes que las del entorno controlado de laboratorio: geometrías irregulares, interferencias acústicas, vibraciones propias del buque o incluso factores meteorológicos. En este contexto, sería muy interesante observar cómo se comporta la detección acústica en chapas curvadas, remachadas o con múltiples capas, así como en presencia de recubrimientos o pintura naval, que podrían amortiguar parte de la señal.
- Una segunda propuesta, sería en una línea más orientada a la mejora tecnológica y al tratamiento de datos, donde se podría avanzar hacia el desarrollo de herramientas de procesamiento automático que acompañen al uso del software *Scan & Paint*. Actualmente, la interpretación de los mapas acústicos es visual y requiere cierto grado de criterio ingenieril, pero sería perfectamente viable aplicar técnicas de procesamiento de imagen, inteligencia artificial o aprendizaje automático para identificar patrones anómalos en los mapas y generar alertas automáticas. Algoritmos entrenados con datos experimentales, como los obtenidos en este trabajo, podrían aprender a diferenciar entre ruido estructural y señales relevantes, mejorando así la precisión y reduciendo el margen de error humano.
- Otra mejora futura razonable sería crear una interfaz o módulo adicional que, una vez detectada una anomalía, proponga una estimación del tamaño aproximado del orificio, basándose en la intensidad acústica y en la distancia de barrido. La gráfica de tendencia incluida en las conclusiones de este trabajo podría servir como punto de partida para ello. Asimismo, integrar *Scan & Paint* dentro de un sistema más amplio de mantenimiento predictivo digital que combine datos acústicos con parámetros estructurales o históricos de fallos supondría un salto cualitativo en la gestión inteligente del mantenimiento naval.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Kenaston, «Navegar en toda comodidad gracias a los detectores de defectos para reparaciones y monitorización de yates | Blog Post | Olympus IMS». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ims.evidentscientific.com/es/insights/smooth-sailing-with-a-flaw-detector-for-yacht-repair-and-surveys>
- [2] U. de Guanajuato, «Clase digital 7. Definición y propagación de ondas sonoras. Velocidad de propagación del sonido», Recursos Educativos Abiertos. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-7-definicion-y-propagacion-de-ondas-sonoras-velocidad-de-propagacion-del-sonido/>
- [3] Universidad del Pais Vasco, «Características del sonido: Intensidad, tono, timbre y duración». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ehu.eus/acustica/bachillerato/casoes/casoes.html?>
- [4] J. M. Suárez A., «La amplitud», La amplitud. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://iapmjmsa.blogspot.com/2023/11/la-amplitud.html>
- [5] Universidad del Pais Vasco, «Acústica básica». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ehu.eus/acustica/espanol/basico/basico.html>
- [6] «Relación entre frecuencia y longitud de onda | Apuntes de Física | Docsity». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.docsity.com/es/docs/relacion-entre-frecuencia-y-longitud-de-onda/8463507/>
- [7] D. F. Comesaña, «Scan-Based Sound Visualisation Methods Using Sound Pressure and Particle Velocity», Faculty of Engineering and the Environment, Univ. of Southampton, Southampton, UK, 2014.
- [8] D. Fernández Comesaña, D. García Escribano, H.-E. de Bree, y K. Holland, «Evaluación y detección de pérdidas de aislamiento acústico en edificación», presentado en Tecniacústica, 2011.
- [9] F. A. Everest y K. C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015.
- [10] Universidad Pública de Navarra, «Aislamiento acústico». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.unavarra.es/organiza/acustica/Aislamiento_acustico/2.htm
- [11] CEDEX, «Conceptos Básicos del Ruido Ambiental», Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://sicaweb.cedex.es/wp-content/uploads/2021/08/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>

- [12] T. D. Rossing, *The Science of Sound*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2014.
- [13] Caruso Acoustic, «Primera clase de acústica: la onda sonora», Caruso Acoustic Magazine. Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://carusoacoustic.com/es/magazine/primera-clase-de-acustica-la-onda-sonora/>
- [14] F. J. Rodríguez Rodríguez, *Guía Acústica de la Construcción*, 2ª edición.
- [15] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 6th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [16] H. Fastl y E. Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models*, 3rd ed. Springer, 2007.
- [17] Cigna Healthcare, «Niveles de ruido perjudiciales | Cigna». Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/niveles-de-ruido-perjudiciales-tf4173>
- [18] Studio 22, «Curvas Fletcher-Munson», Studio 22 Blog. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.studio-22.com/blog/enciclopedia/curvas-fletcher-munson>
- [19] Doctor ProAudio, «Ponderaciones (weightings) en frecuencia : A, B, C y Z», Doctor ProAudio. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.doctorproaudio.com/content.php?145-ponderaciones-weightings-frecuencia-ABC>
- [20] W. A. Montano Rodríguez, «Reconstruyendo la historia de la Acústica en España durante los siglos XVIII y XIX», *Revista de Acústica*, vol. 55, n.º 3 y 4, pp. 23-24, 2024.
- [21] «Qué es el ruido blanco y cuán efectivo puede ser para ayudarte a dormir», *BBC News Mundo*. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40637592>
- [22] «Los colores del ruido: ¿Qué son y qué significan? | Cirrus Research plc». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cirrusresearch.com/es/los-colores-del-ruido/>
- [23] «Diferencias entre los distintos tipos de ruido», eMastered. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://emastered.com/es/blog/different-types-of-noise>
- [24] «White, Brown, Pink and Green Noise: Benefits of Each», Soundly. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.soundly.com/blog/white-noise-and-alternatives>
- [25] J. J. Torán Sierra, «Elaboración de documentación técnica para el desarrollo del alcance establecido en un protocolo para el mantenimiento de la Flota de la Armada basado en un equipo de acústica avanzada», Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, 2019.
- [26] D. Fernandez Comesaña, S. Steltenpool, G. Carrillo Pousa, H.-E. de Bree, y K. R. Holland, «Scan and Paint: theory and practice of a sound field visualization method», *Microflown*, 2013. Accedido: 28 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/resources/scientific-papers/scan-and-paint-theory-and-practice>
- [27] M. Guiot, D. F. Comesaña, M. Korbasiewicz, y G. C. Pousa, «TURBO-COMPRESSOR AND PIPING NOISE ASSESSMENT USING A PARTICLE VELOCITY BASED SOUND EMISSION METHOD».
- [28] H.-E. de Bree, «Scan and Paint Principles». ISRN Acoustics, 2013.
- [29] «PU regular», Microflown. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/standard-probes/pu-regular>
- [30] «Sound Intensity Probes», Microflown. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/standard-probes>
- [31] D. Navy, «Scan & Paint Measurement Report», Microflown Technologies, 2018.

- [32] M. Viscardi, A. Sestieri, F. Pompoli, y M. Garai, *Measurement of damping properties in viscoelastic foams using Scan & Paint*, vol. 132. Applied Acoustics, 2018.
- [33] «MFPA-2», Microflown. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/pre-amplifiers-frontends/mfpa-2>
- [34] «Scout V2», Microflown. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/pre-amplifiers-frontends/data-acquisition-scoutv2>
- [35] «Scan & Paint 2D & 3D - Warkwyn». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://warkwyn.com/microflown-sales-support/microflown-scan-paint/>
- [36] A. Grosso, H.-E. de Bree, S. Steltepool, y E. Tijs, «Scan & paint for acoustic leakage inside the car».
- [37] ARMADA ESPAÑOLA, «D-CP-01 MANUAL DOCTRINAL DE SEGURIDAD INTERIOR A BORDO». noviembre de 2021.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

En el plano social y de la seguridad, garantizar la integridad estructural de los buques es una responsabilidad ineludible. Una pequeña perforación no detectada a tiempo en el casco puede comprometer la resistencia estructural y derivar en accidentes que pongan en riesgo a la dotación. La detección temprana de estas anomalías permite prevenir incidentes mayores que pondrían en peligro vidas humanas y el medioambiente. Además, el uso de técnicas de acústica avanzada permite realizar evaluaciones sin interrumpir la operatividad del buque y reduce la exposición de los inspectores a entornos de riesgo, protegiendo así su salud.

En términos económicos e industriales, este trabajo destaca la importancia del mantenimiento predictivo frente al correctivo. Identificar un defecto con antelación evita reparaciones de emergencia mucho más costosas y reduce los tiempos de inactividad no programados. Un enfoque predictivo apoyado por herramientas como *Scan & Paint* optimiza la planificación de las tareas de astillero: en lugar de enfrentarse a averías inesperadas en plena operación con el consiguiente coste de inmovilización en puerto y retrasos, se pueden programar intervenciones en momentos oportunos. De este modo se ahorran recursos y se prolonga la vida útil de las estructuras. Todo ello redunda en beneficios económicos: se minimizan costos, la naviera mejora su eficiencia logística y el conjunto de la industria naval eleva sus estándares de fiabilidad y competitividad.

En el plano ambiental, el mantenimiento proactivo del buque minimiza el riesgo de vertidos o emisiones contaminantes derivados de fallos estructurales repentinos. Además, optimizar la detección y reparar únicamente donde es necesario evita un mantenimiento excesivo, disminuyendo la generación de residuos y el consumo de materiales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Durante la realización de este Trabajo Fin de Grado, centrado en la detección de orificios mediante técnicas de acústica avanzada, se plantea una mirada que va más allá del componente técnico. Aunque el foco principal está en el uso del software *Scan & Paint* para identificar de forma precisa pequeñas aberturas en superficies metálicas, especialmente pensadas en el contexto naval, el trasfondo del proyecto toca de lleno aspectos que involucran la seguridad, la responsabilidad profesional y la dimensión social de la ingeniería.

Poder localizar de forma temprana un orificio en una estructura sumergida, como podría ser el casco de un buque, no es un simple logro técnico. Implica, en realidad, prevenir riesgos potenciales que pueden derivar en consecuencias graves: desde inundaciones parciales hasta fallos estructurales que comprometan la estabilidad de la embarcación o incluso la vida de quienes están a bordo. Esa es la clave de la reflexión ética en este trabajo: entender que detrás de cada mapa acústico hay un posible escenario real, y que lo que se decide en un laboratorio puede tener un reflejo directo en la mar.

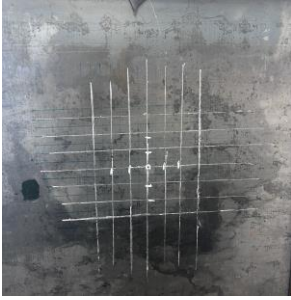
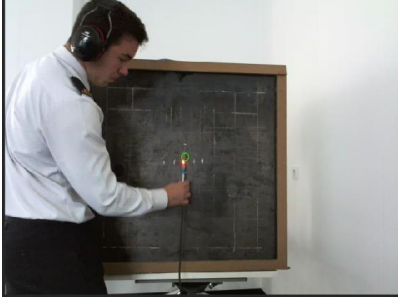
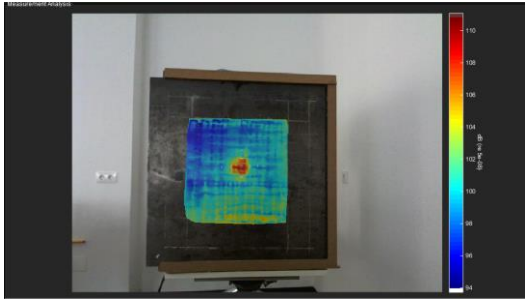
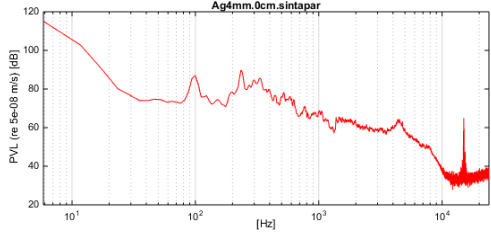
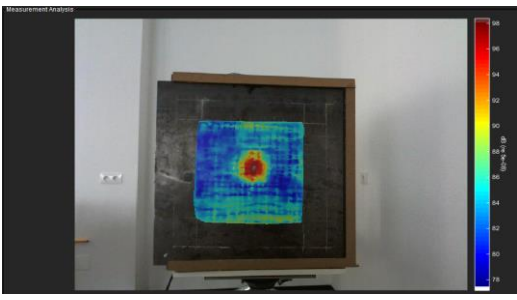
Además, el uso de este tipo de herramientas permite plantear nuevos enfoques en los procedimientos de mantenimiento, abriendo la puerta a sistemas de inspección más rápidos y menos costosos. En el plano social, esto se traduce en una mejora de las condiciones de trabajo, mayor tranquilidad para las dotaciones embarcadas y una reducción del impacto de fallos estructurales imprevistos.

ANEXO III: FICHAS DE ENSAYOS

En este anexo se recogen todas las fichas correspondientes a los ensayos realizados durante la fase experimental en el laboratorio. Para facilitar su consulta y organización, se diseña una matriz en la que se integran todas las pruebas efectuadas, agrupando cada una de ellas según el diámetro del orificio, su condición (abierto o tapado) y la distancia de barrido de la sonda. Esta matriz permite tener una visión global del conjunto de ensayos realizados.

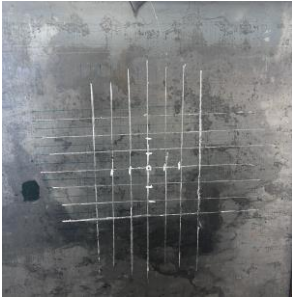
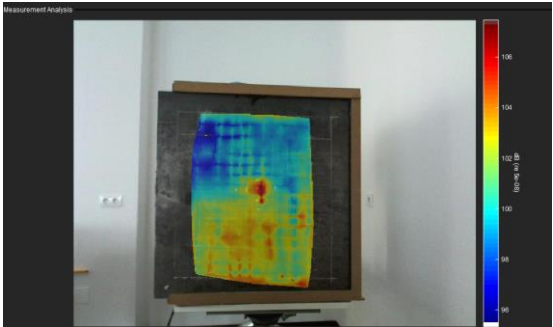
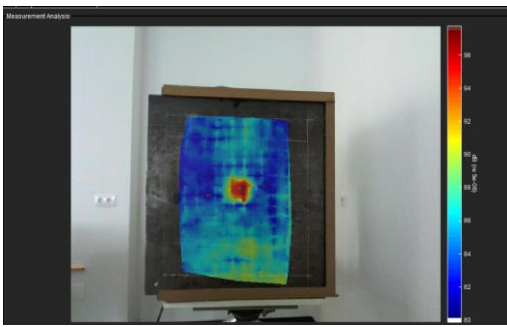
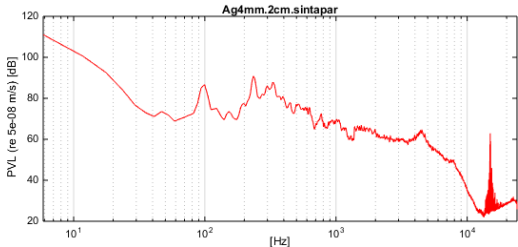
Distancia + Estado/ Tamaño Agujero	4mm	8mm	14mm	20mm
0cm / Sin Tapar	EN01	EN05	EN13	EN21
2cm / Sin Tapar	EN02	EN06	EN14	EN22
4cm / Sin Tapar	EN03	EN07	EN15	EN23
8cm / Sin Tapar	-	EN08	EN16	EN24
0cm / Tapado	EN04	EN09	EN17	EN25
2cm / Tapado	-	EN10	EN18	EN26
4cm / Tapado	-	EN11	EN19	EN27
8cm / Tapado	-	EN12	EN20	EN28

Tabla A3- 1 Matriz de ensayos (Elaboración propia)

CÓDIGO ENSAYO: EN01 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 4mm SIN TAPAR A 0cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 1 Chapa metálica con orificio de 4 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 2 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa detrás de la superficie. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura A3- 3 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 5 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 4 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

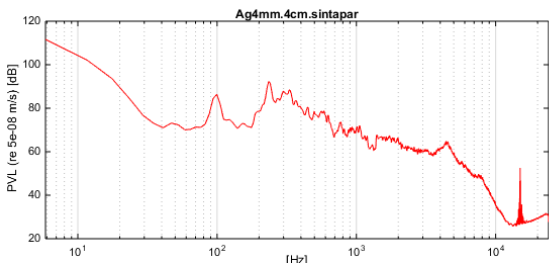
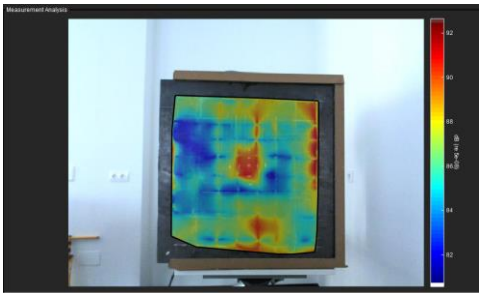
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial abarca desde el valor mínimo (94 dB) hasta el valor máximo (110 dB), es decir superior a 15 dB.

Por otro lado, en el mapa acotado entre 500 y 550 Hz, es más amplio aún, la diferencia entre 78 dB y 98 dB es igual a 20 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN02 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 4mm SIN TAPAR A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 6 Chapa metálica con orificio de 4 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 7 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm pasando a 2cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Medición acústica sobre la chapa perforada con un orificio de 4 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 2 cm del agujero, registrando las variaciones en la propagación del sonido y posibles fugas acústicas.
 Figura A3- 8 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 9 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 10 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

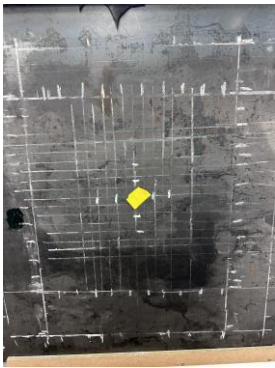
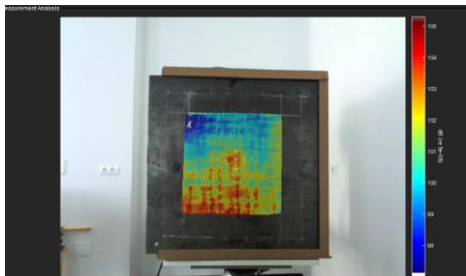
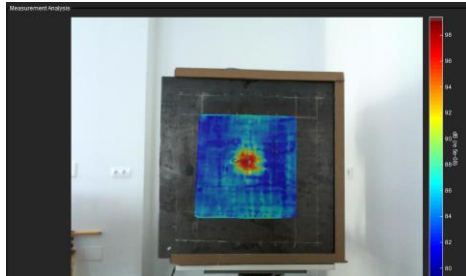
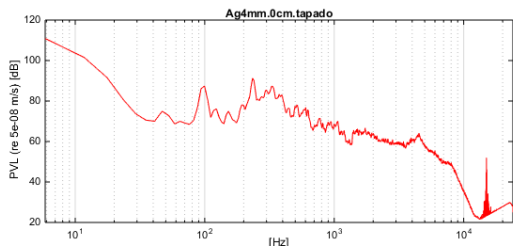
En este caso, la diferencia entre los valores extremos dentro del espectro completo alcanza los 10 dB, oscilando entre los 96 dB y los 106 dB.

El mapa acotado en la banda de 500–550 Hz presenta un rango dinámico más amplio, con una variación de 16 dB entre el punto de mínima intensidad (80 dB) y el máximo registrado (96 dB).

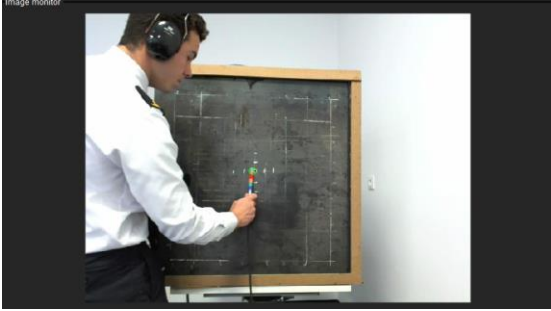
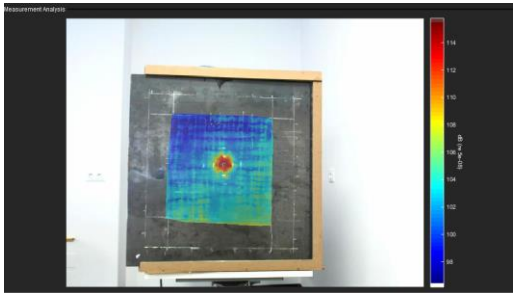
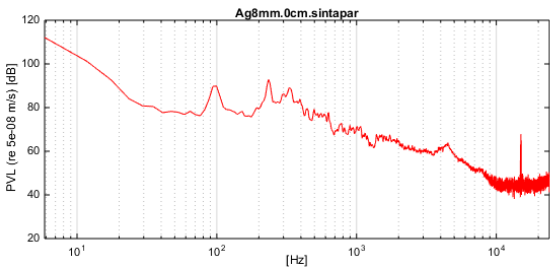
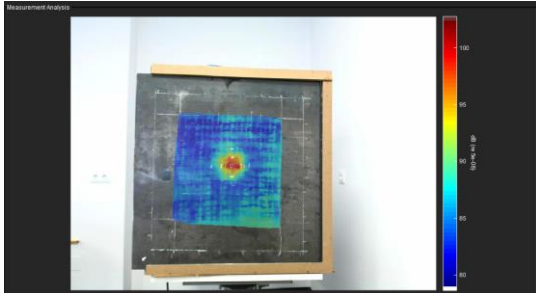
CÓDIGO ENSAYO: EN03 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 4mm SIN TAPAR A 4cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 11 Chapa metálica con orificio de 4 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 12 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm pasando a 4cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En esta medición, la sonda PU se sitúa a 4 cm del orificio de 4 mm, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte trasera de la chapa.
 Figura A3- 13 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 15 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 14 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

En el análisis del espectro completo, los niveles de velocidad de partícula fluctúan en una horquilla de aproximadamente 10 dB, con registros comprendidos entre los 97 y los 107 dB.

El análisis restringido a la banda de interés revela una dinámica similar: desde los 82 dB hasta picos de 92 dB, lo que arroja una diferencia de 10 dB en el mapa, idéntica al mapa que engloba todo el espectro frecuencial.

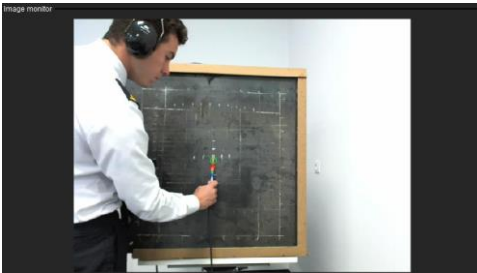
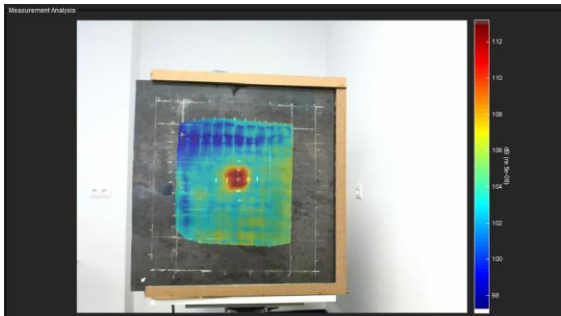
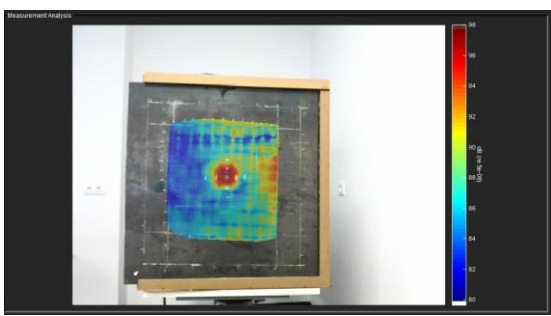
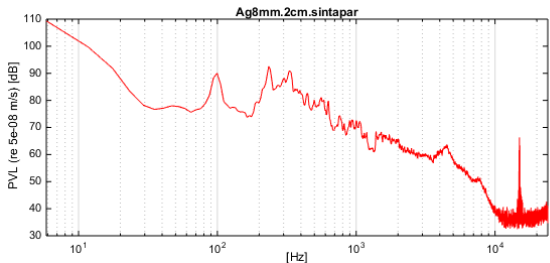
CÓDIGO ENSAYO: EN04 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 4mm TAPADO A 0cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 16 Chapa metálica con orificio de 4 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 17 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 4 mm tapado pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En esta prueba, el orificio de 4 mm está tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte trasera de la chapa. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero, registrando cómo afecta el sellado a la propagación del sonido y comparándolo con mediciones previas.
 Figura A3- 18 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 19 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 20 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

En el espectro completo, el rango dinámico no sobrepasa los 8 dB, mientras que en el mapa filtrado dicha diferencia se amplía notablemente, alcanzando los 18 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN05 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 0cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 21 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 22 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura A3- 23 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 25 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 24 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

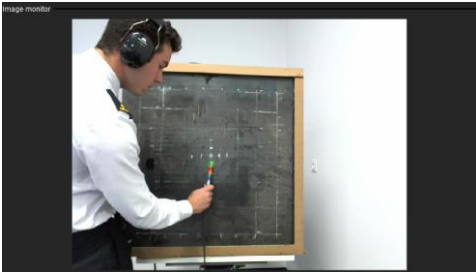
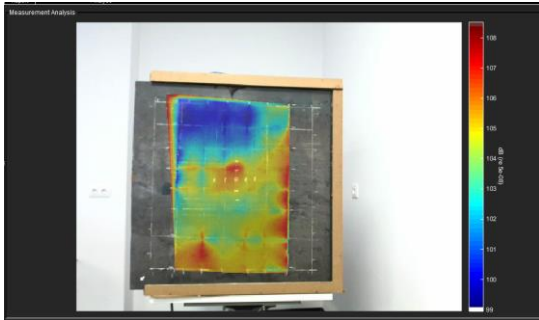
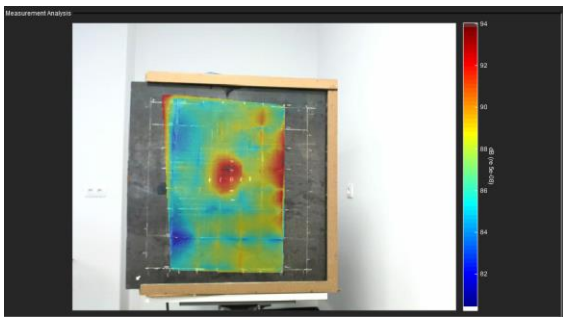
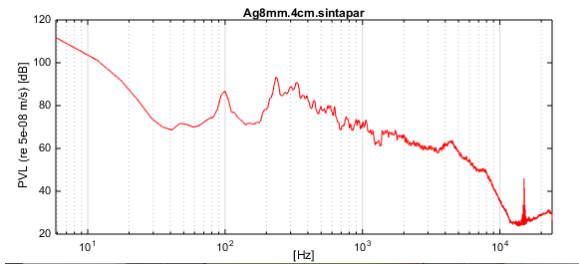
El rango dinámico observado en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial alcanza los 16 dB, desde un mínimo de 98 dB hasta un máximo de 114 dB.

En el mapa acotado el rango dinámico del parámetro velocidad de partícula se sitúa en 20 dB, reflejando una clara diferencia entre las zonas con mayor y menor actividad sonora.

CÓDIGO ENSAYO: EN06 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 26 Chapa metálica con orificio de 8mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 27 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece abierto, mientras el altavoz emite ruido rosa desde detrás de la chapa. La sonda PU se sitúa a 2 cm del agujero.
 Figura A3- 28 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 29 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 30 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

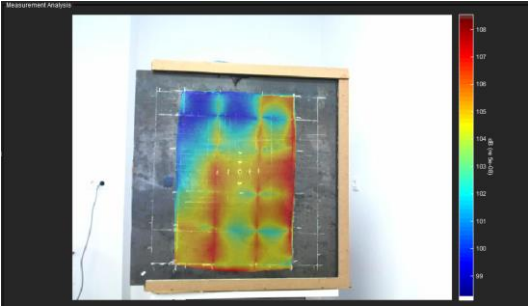
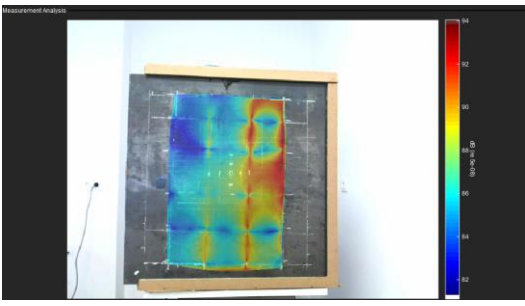
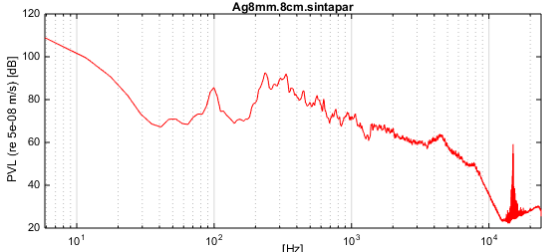
Con una amplitud que va de los 98 dB a los 112 dB, el rango dinámico alcanza los 14 dB, en el mapa que abarca todo el rango de frecuencias.

Al observar el mapa acústico filtrado entre 500 y 550 Hz, se aprecia un rango dinámico de 18 dB, con un mínimo de 80 dB y un máximo de 98 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN07 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 4cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 31 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 32 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando a 4cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En esta medición, la sonda PU se sitúa a 4 cm del orificio de 8 mm, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte trasera de la chapa.
 Figura A3- 33 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 34 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 35 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

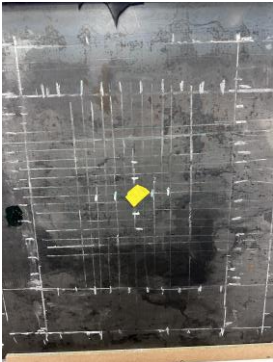
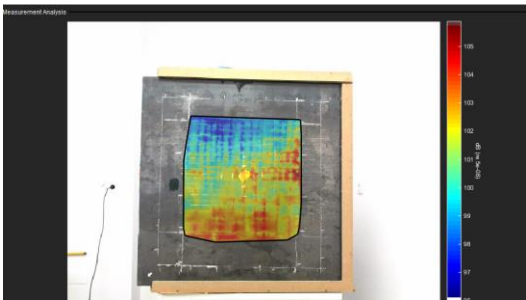
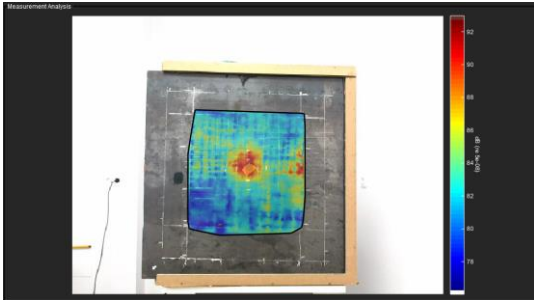
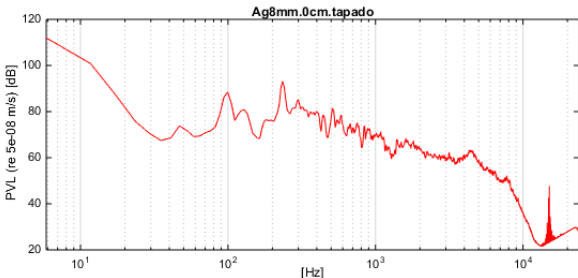
En el mapa correspondiente al espectro completo, el rango dinámico se extiende desde los 99 dB hasta los 108 dB, evidenciando una diferencia de 9 dB.

El mapa acotado en la banda de 500–550 Hz revela un rango dinámico mayor, desde 82 dB hasta 94 dB, alcanzando los 12 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN08 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 8cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 36 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 37 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa. La sonda PU se desplaza a 8cm del agujero.
 Figura A3- 38 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 39 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 40 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

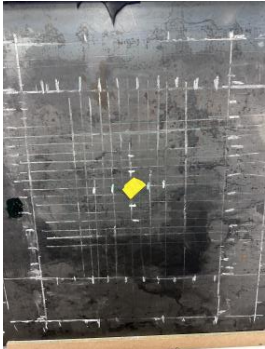
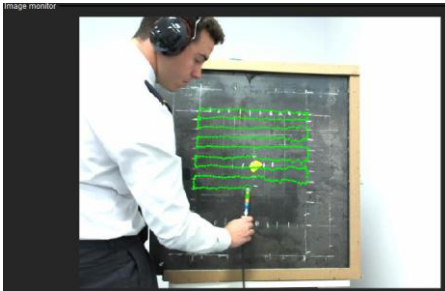
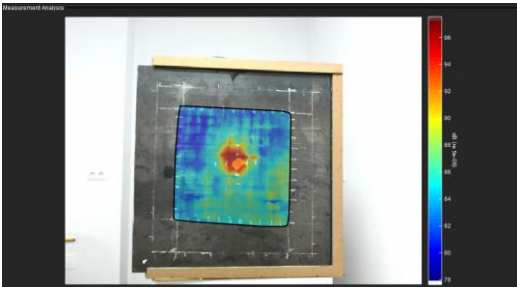
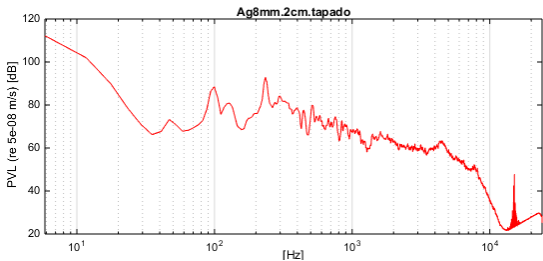
En el análisis sin filtrado, el rango dinámico queda limitado a 9 dB, con una distribución de valores entre 99 dB y 108 dB.

El mapa acotado muestra un salto significativo, con un rango dinámico que oscila entre 82 dB y 94 dB, es decir, 12 dB de diferencia.

CÓDIGO ENSAYO: EN09 Volver a la matriz TÍTULO: AGUJERO 8mm TAPADO A 0cm	
MUESTRA ENSAYADA	
	
Figura A3- 41 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	Figura A3- 42 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando justo por encima del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En esta prueba, el orificio de 8 mm está tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte trasera de la chapa. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero, registrando cómo afecta el sellado a la propagación del sonido y comparándolo con mediciones previas.
	
Figura A3- 43 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	Figura A3- 44 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
	
Figura A3- 45 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

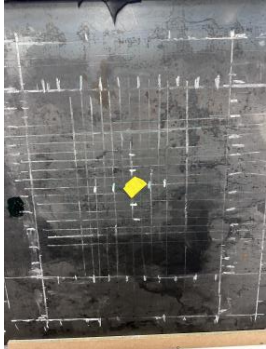
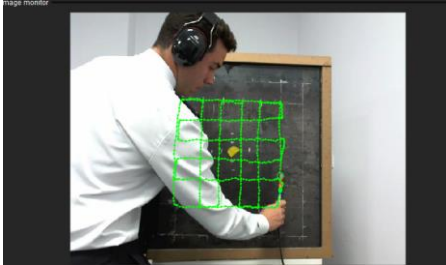
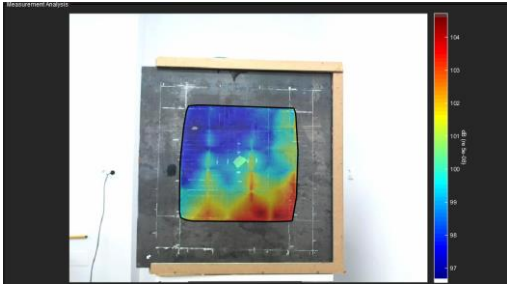
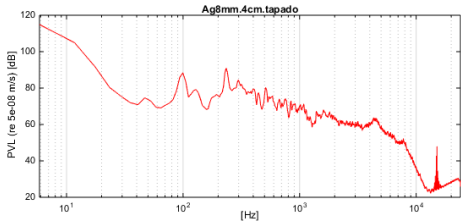
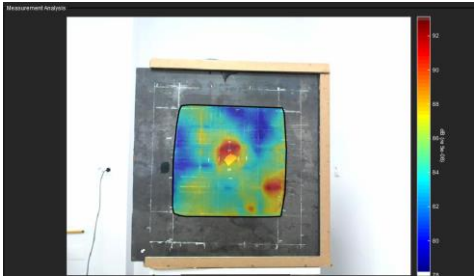
En la representación global, el rango dinámico abarca desde los 96 dB hasta los 105 dB, estableciendo un contraste de 9 dB.

Con el filtrado aplicado, el mapa acústico entre 500–550 Hz alcanza un rango dinámico notable, desde 78 dB hasta 92 dB, lo que implica 14 dB de diferencia.

CÓDIGO ENSAYO: EN10 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm TAPADO A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 46 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 47 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 2cm del agujero.
 Figura A3- 48 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 49 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 50 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

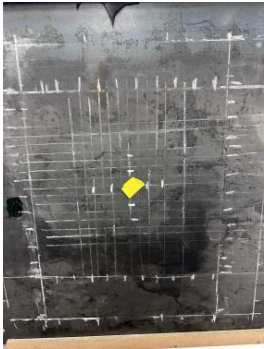
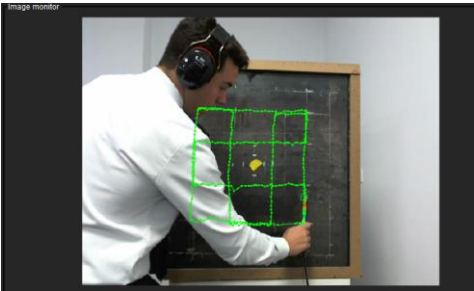
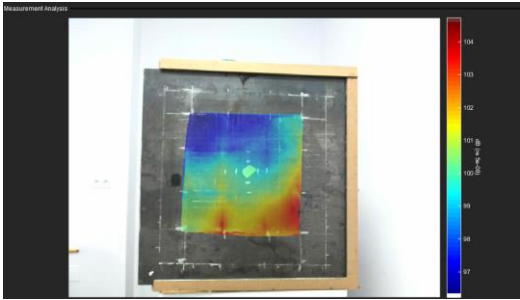
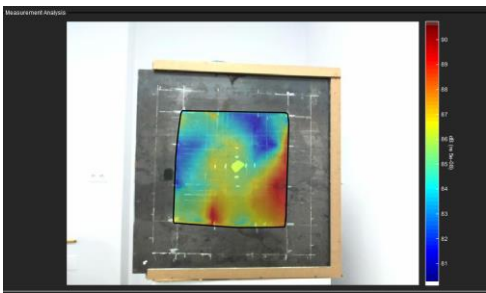
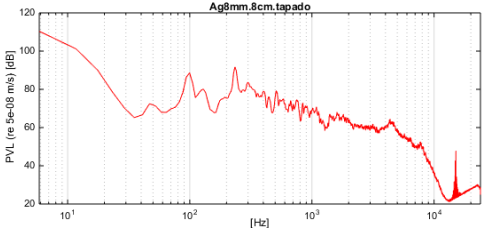
En el mapa que incluye todo el espectro frecuencial, los niveles van de 65 dB a 90 dB, dando como resultado un rango dinámico muy amplio de 25 dB.

El mapa acotado destaca con un rango dinámico de 18 dB, también amplio, con valores que se sitúan entre 78 dB y 96 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN11 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm TAPADO A 4cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 51 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 52 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando a 4cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 4cm del agujero.
 Figura A3- 53 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 55 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 54 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

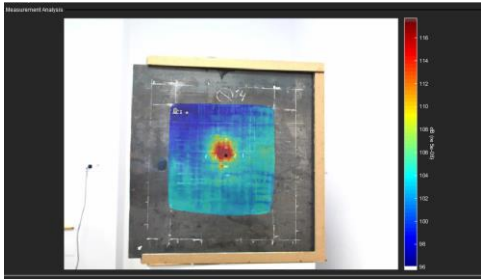
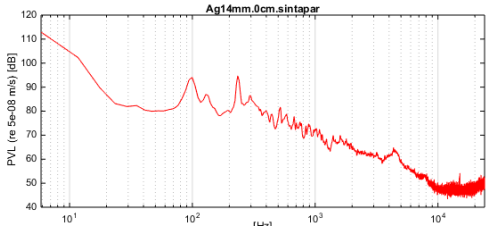
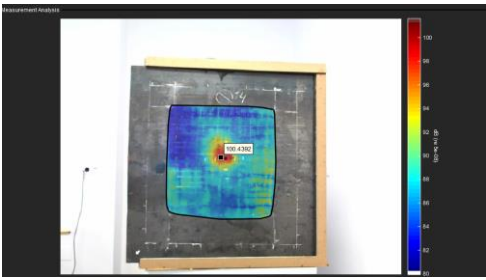
El rango dinámico en el mapa general está en torno a en 7 dB, fluctuando entre los 97 dB y los 104 dB.

La versión acotada revela un rango dinámico de 14 dB, con un mínimo de 78 dB y un pico en 92 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN12 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm TAPADO A 8cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 56 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 57 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 8cm del agujero.
 Figura A3- 58 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 59 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 60 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

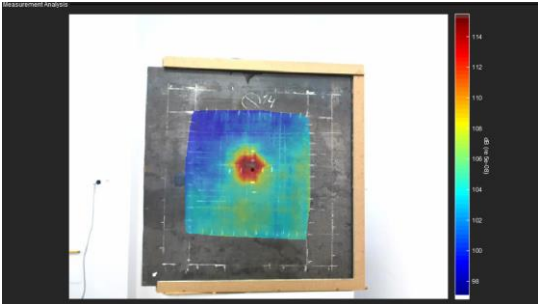
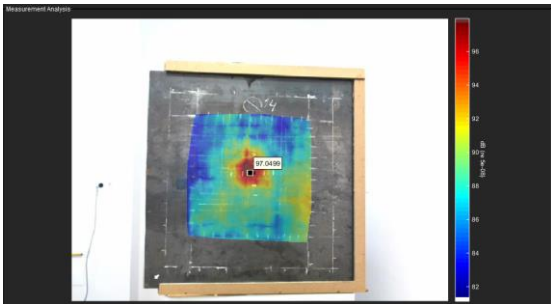
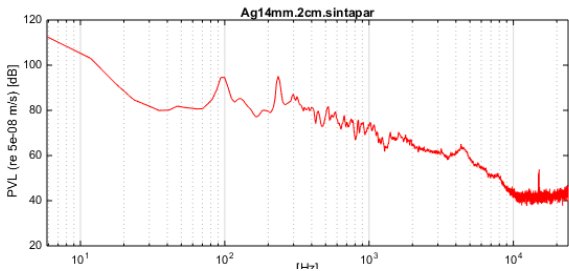
La dispersión sonora en el mapa global se traduce en un rango dinámico de 7 dB, comprendido entre 97 dB y 104 dB.

En el mapa filtrado, se incrementa, al obtenerse un rango dinámico de 9 dB, desde 81 dB hasta 90 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN13 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 14mm SIN TAPAR A 0cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 61 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 62 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 14 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura A3- 63 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 65 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 64 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

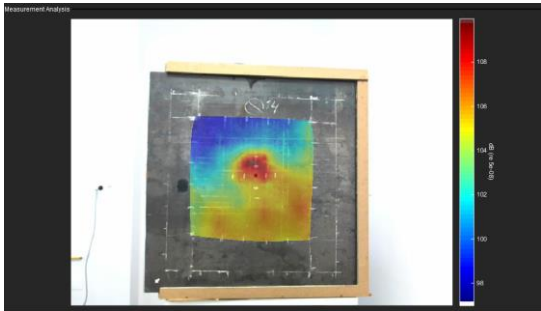
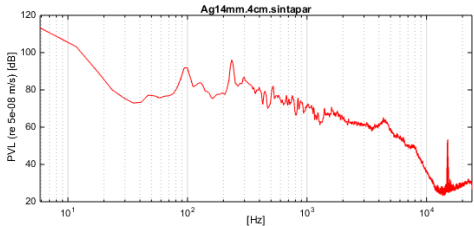
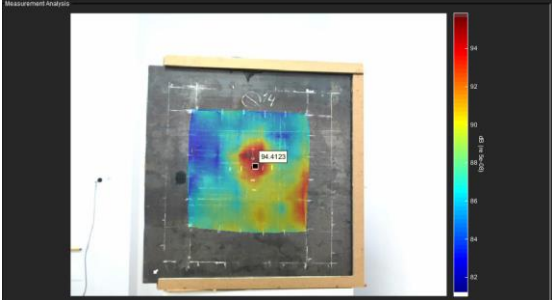
En el análisis completo del espectro, los valores extremos se sitúan en 96 dB y 116 dB, generando un rango dinámico amplio de 20 dB.

Con el filtrado de frecuencias aplicado, se consigue un rango dinámico idéntico de 20 dB, al registrar un mínimo de 80 dB y un máximo de 100 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN14 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 14mm SIN TAPAR A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 66 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 67 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece abierto, mientras el altavoz emite ruido rosa desde detrás de la chapa. La sonda PU se sitúa a 2 cm del agujero.
 Figura A3- 68 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 69 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
 Figura A3- 70 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

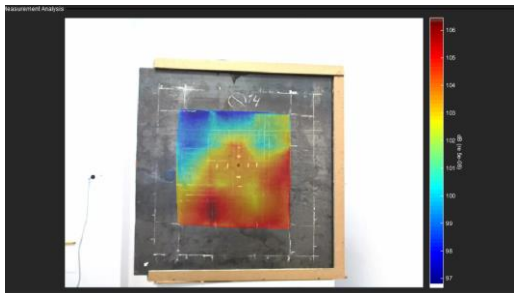
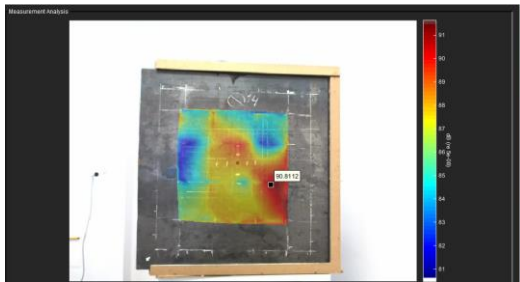
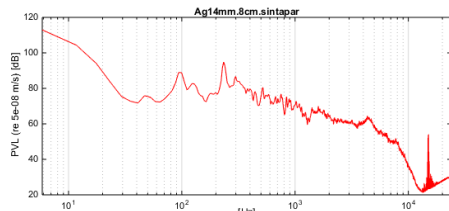
El mapa no filtrado evidencia un rango dinámico de 16 dB, determinado por valores de 98 dB a 114 dB.

Al limitar la banda de análisis, el mapa acústico acotado muestra un rango dinámico de 14 dB, entre 82 dB y 96dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN15 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 14mm SIN TAPAR A 4cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 71 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 72 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece abierto, mientras el altavoz emite ruido rosa desde detrás de la chapa. La sonda PU se sitúa a 4 cm del agujero.
 Figura A3- 73 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 75 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 74 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

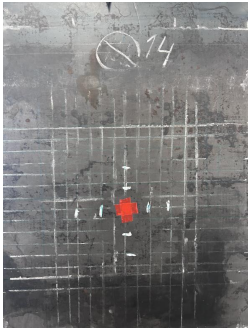
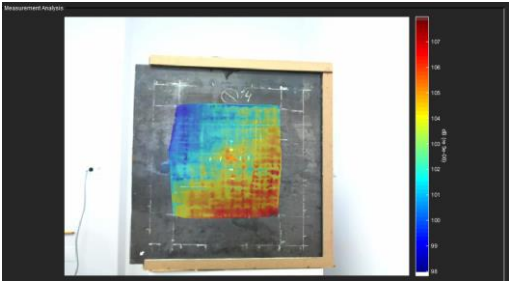
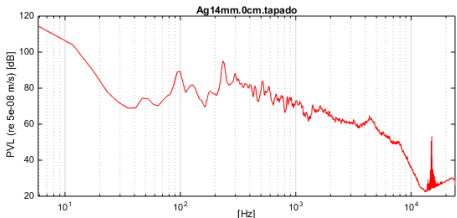
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial abarca desde el valor mínimo (98 dB) hasta el valor máximo (108 dB), es decir 10 dB.

Por otro lado, en el mapa acotado entre 500 y 550 Hz, es un poco más amplio, la diferencia entre 82 dB y 94 dB es igual a 12 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN16 Volver a la matriz		TÍTULO: AGUJERO 14mm SIN TAPAR A 8cm
MUESTRA ENSAYADA		
 Figura A3- 76 Chapa metálica con orificio de 14 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 77 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)	
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece abierto, mientras el altavoz emite ruido rosa desde detrás de la chapa. La sonda PU se sitúa a 8 cm del agujero.	
 Figura A3- 78 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 79 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)	
 Figura A3- 80 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)		

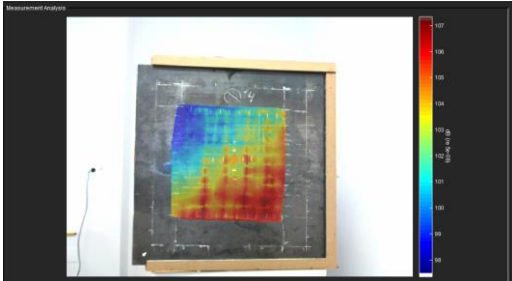
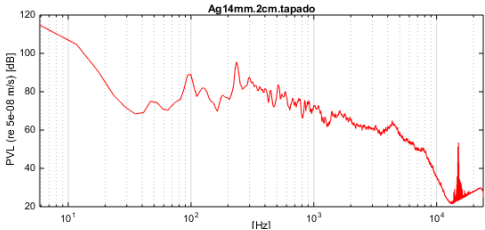
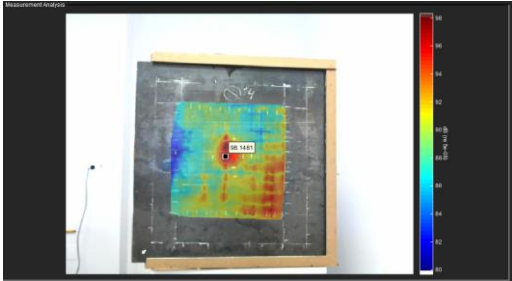
En este caso, la diferencia entre los valores extremos dentro del espectro completo alcanza los 9 dB, oscilando entre los 97 dB y los 106 dB.

El mapa acotado en la banda de 500–550 Hz presenta un rango dinámico con una variación de 10 dB entre el punto de mínima intensidad (81 dB) y el máximo registrado (91 dB).

CÓDIGO ENSAYO: EN17 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 14mm TAPADO A 0cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 81 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 82 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En esta prueba, el orificio de 14 mm está tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte trasera de la chapa. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero, registrando cómo afecta el sellado a la propagación del sonido y comparándolo con mediciones previas.
 Figura A3- 83 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 85 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 84 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

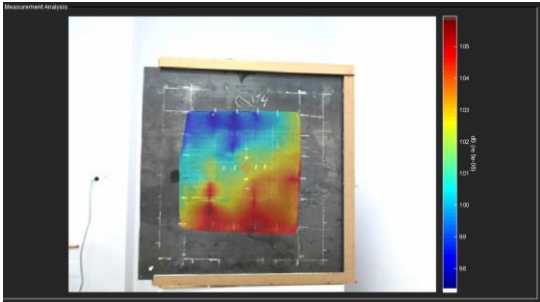
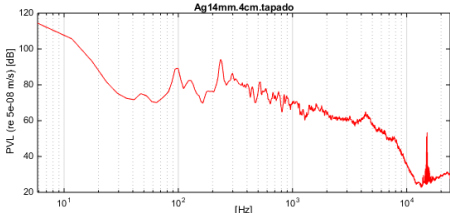
En el análisis del espectro completo, los niveles de velocidad de partícula fluctúan en una horquilla de aproximadamente 10 dB, con registros comprendidos entre los 98 y los 107 dB.

El análisis restringido a la banda de interés revela un rango dinámico más amplio: desde los 82 dB hasta picos de 100 dB, lo que arroja una diferencia de 18 dB en el mapa.

CÓDIGO ENSAYO: EN18 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 14mm TAPADO A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 86 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 87 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 2 cm del agujero.
 Figura A3- 88 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 90 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 89 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

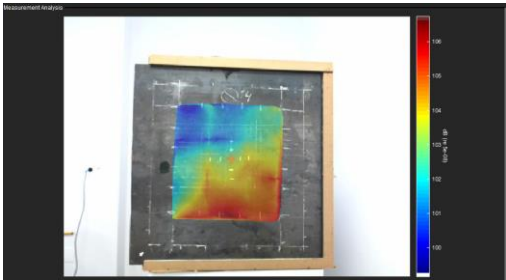
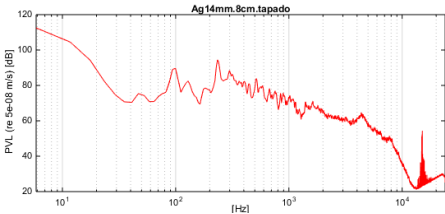
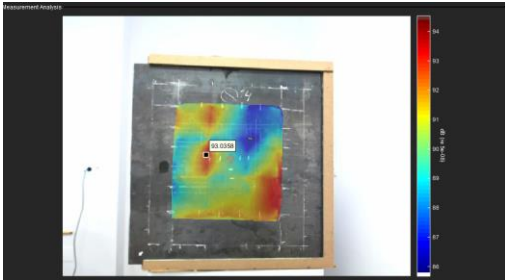
El rango dinámico observado en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial alcanza los 9 dB, desde un mínimo de 98 dB hasta un máximo de 107 dB.

En el mapa acotado el rango dinámico del parámetro velocidad de partícula se sitúa en 18 dB, reflejando una clara diferencia entre las zonas con mayor y menor actividad sonora.

CÓDIGO ENSAYO: EN19 Volver a la matriz TÍTULO: AGUJERO 14mm TAPADO A 4cm	
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 91 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 92 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 4 cm del agujero.
 Figura A3- 93 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 94 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
 Figura A3- 95 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

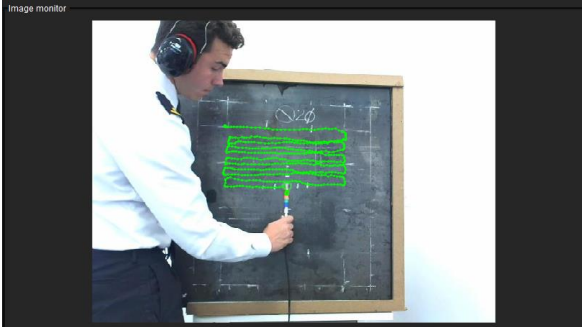
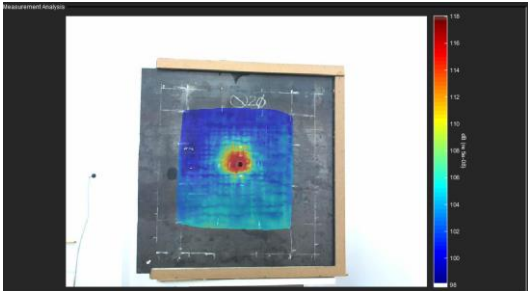
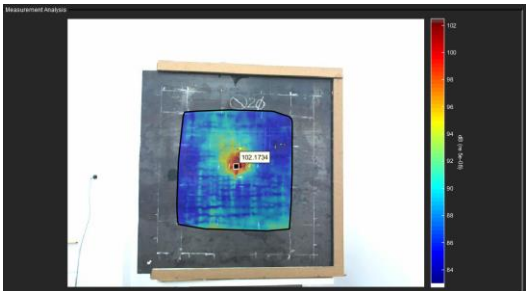
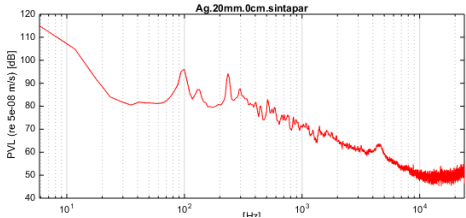
Con una amplitud que va de los 98 dB a los 105 dB, el rango dinámico alcanza los 7 dB, en el mapa que abarca todo el rango de frecuencias.

Al observar el mapa acústico filtrado entre 500 y 550 Hz, se aprecia un rango dinámico de 14 dB, con un mínimo de 82 dB y un máximo de 96 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN20 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 14mm TAPADO A 8cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 96 Chapa metálica con orificio de 14 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 97 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 14 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)
 Figura A3- 98 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 100 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 99 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

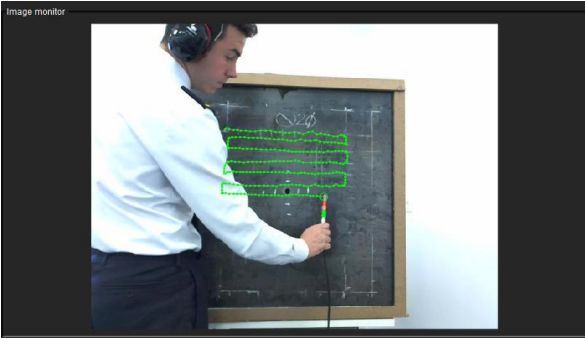
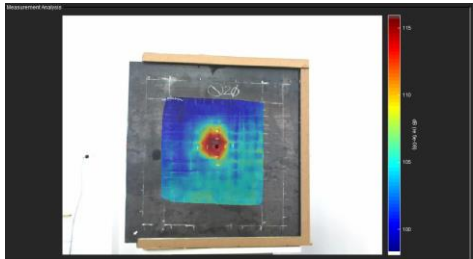
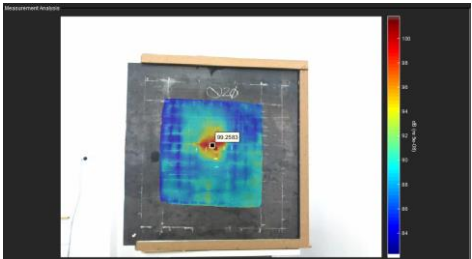
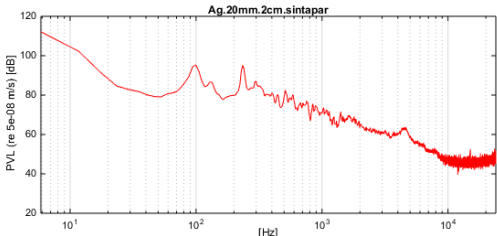
En el mapa correspondiente al espectro completo, el rango dinámico se extiende desde los 100 dB hasta los 106 dB, evidenciando una diferencia mínima de 6 dB.

El mapa acotado en la banda de 500–550 Hz revela un rango dinámico mayor, desde 86 dB hasta 94 dB, alcanzando los 8 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN21 Volver a la matriz TÍTULO: AGUJERO 20mm SIN TAPAR A 0cm	
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 101 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 102 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza por encima del agujero.
 Figura A3- 103 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 104 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
 Figura A3- 105 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

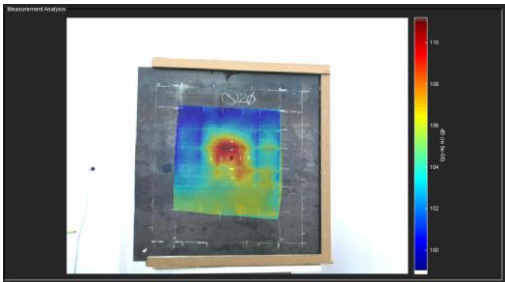
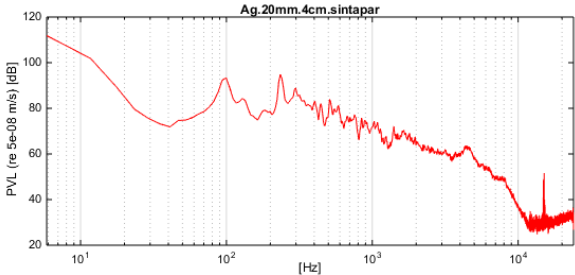
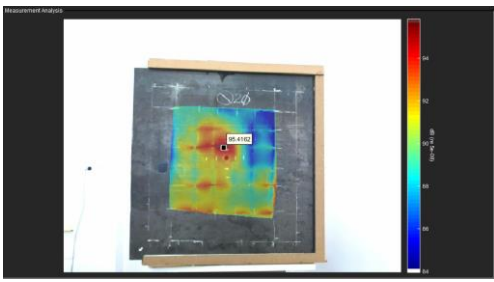
En la representación global, el rango dinámico abarca desde los 98 dB hasta los 118 dB, estableciendo una diferencia de 20 dB.

Con el filtrado aplicado, el mapa acústico entre 500–550 Hz alcanza un rango dinámico notable, desde 84 dB hasta 102 dB, lo que implica 18 dB de diferencia.

CÓDIGO ENSAYO: EN22 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 20mm SIN TAPAR A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 106 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 107 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 2 cm del agujero.
 Figura A3- 108 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 109 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 110 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

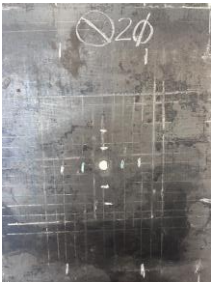
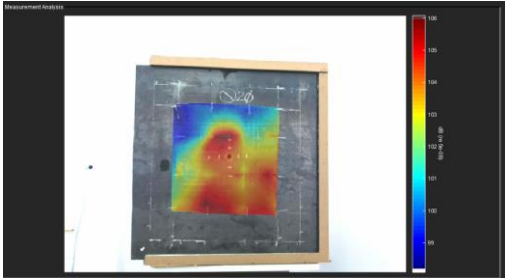
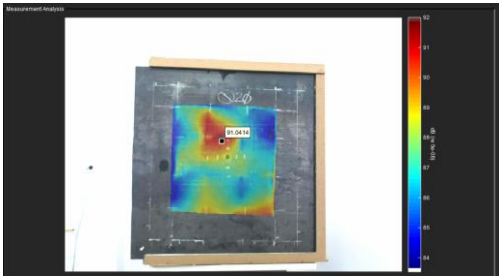
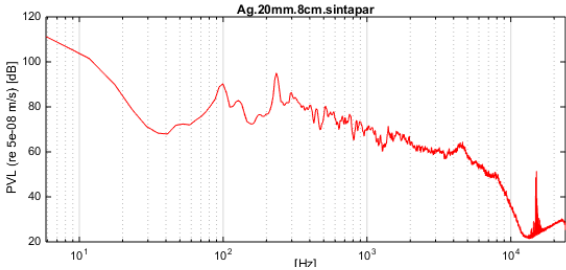
En el mapa que incluye todo el espectro frecuencial, los niveles van de 100 dB a 115 dB, dando como resultado un rango dinámico de 15 dB.

El mapa acotado destaca con un rango dinámico de 16 dB, ligeramente mayor que el anterior, con valores que se sitúan entre 84 dB y 100 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN23 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 20mm SIN TAPAR A 4cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 111 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 112 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 4 cm del agujero.
 Figura A3- 113 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 115 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 114 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

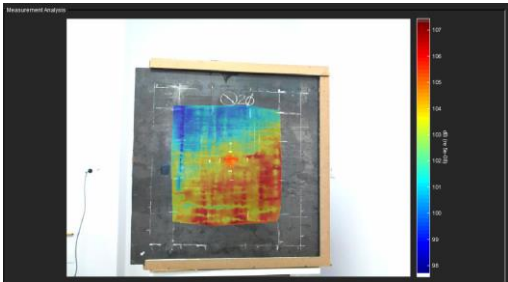
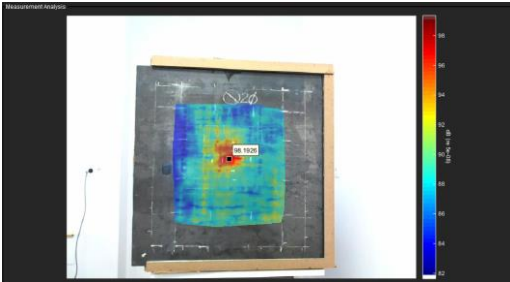
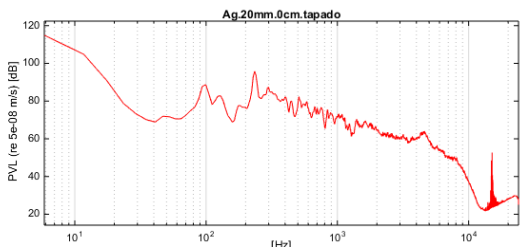
El rango dinámico en el mapa general está en torno a en 10 dB, fluctuando entre los 100 dB y los 110 dB.

La versión acotada entre 500 y 550 Hz revela un rango dinámico similar de 10 dB, con un mínimo de 84 dB y un pico en 94 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN24 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 20mm SIN TAPAR A 8cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 116 Chapa metálica con orificio de 20 mm en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 117 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 8 cm del agujero.
 Figura A3- 118 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 119 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)  Figura A3- 120 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

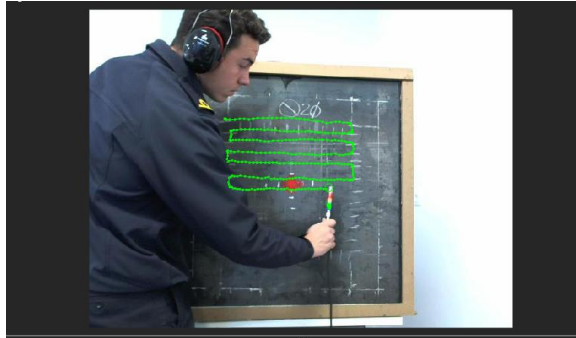
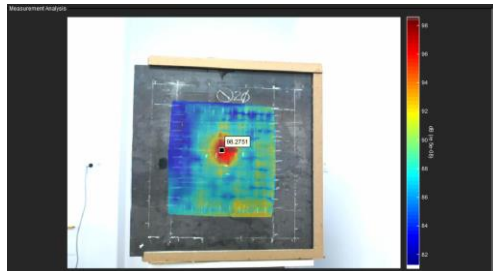
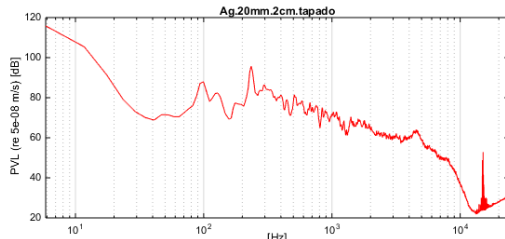
La dispersión sonora en el mapa global se traduce en un rango dinámico de 7 dB, comprendido entre 99 dB y 106 dB.

En el mapa filtrado, se incrementa, pero de forma mínima, al obtenerse un rango dinámico de 8 dB, desde 84 dB hasta 92 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN25 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 20mm TAPADO A 0cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 121 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 122 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando por encima del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En esta prueba, el orificio de 20 mm está tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte trasera de la chapa. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero, registrando cómo afecta el sellado a la propagación del sonido y comparándolo con mediciones previas.
 Figura A3- 123 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 124 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
 Figura A3- 125 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

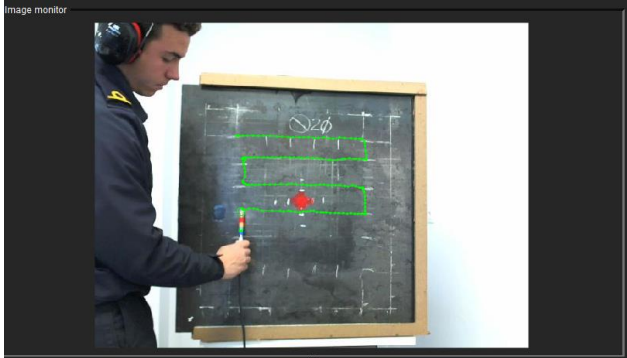
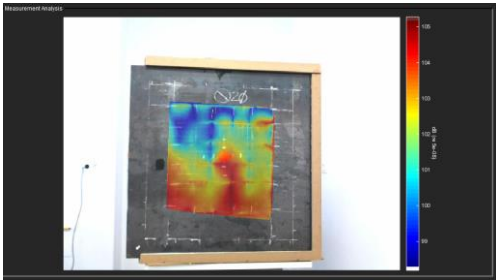
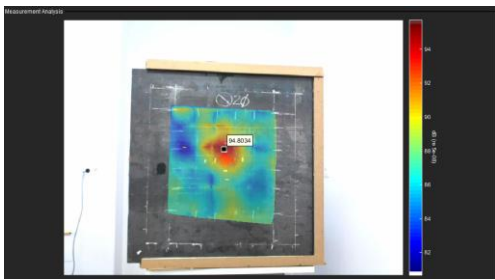
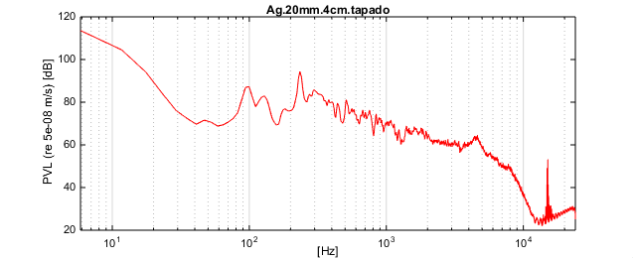
En el análisis completo del espectro, los valores extremos se sitúan en 98 dB y 107 dB, generando un rango dinámico de 9 dB.

Con el filtrado de frecuencias aplicado, se consigue un rango dinámico más amplio de 16 dB, al registrar un mínimo de 82 dB y un máximo de 98 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN26 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 20mm TAPADO A 2cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 126 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 127 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando a 2 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 2 cm del agujero.
 Figura A3- 128 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 129 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
 Figura A3- 130 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

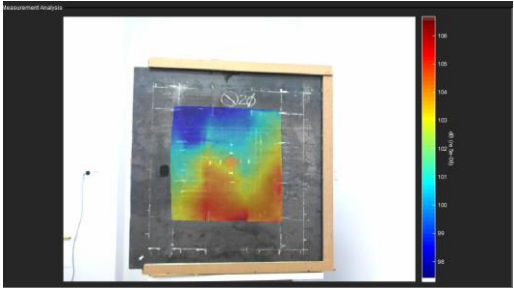
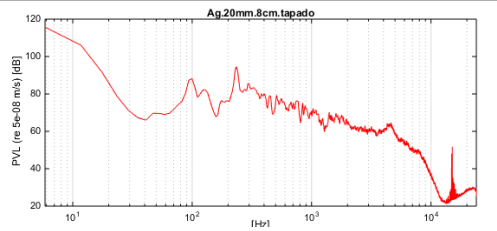
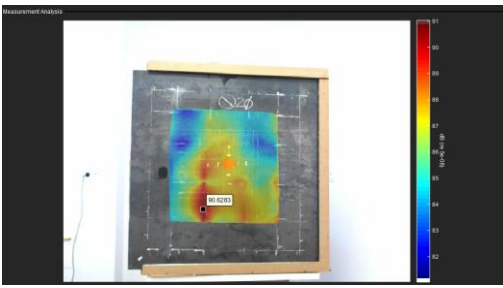
El mapa no filtrado evidencia un rango dinámico de 9 dB, determinado por valores de 98 dB a 107 dB.

Al limitar la banda de análisis entre 500 y 550 Hz, el mapa acústico acotado muestra un rango dinámico de 16 dB, entre 82 dB y 98dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN27 Volver a la matriz TÍTULO: AGUJERO 20mm TAPADO A 4cm	
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 131 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 132 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando a 4 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 4 cm del agujero.
 Figura A3- 133 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura A3- 134 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)
 Figura A3- 135 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

Sin aplicar filtrado, el mapa acústico indica un rango dinámico mínimo de 6 dB entre 99 dB y 105 dB.

Aplicando el filtrado entre 500–550 Hz, el rango dinámico se extiende hasta los 12 dB, desde un mínimo de 82 dB hasta un máximo de 94 dB.

CÓDIGO ENSAYO: EN28 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 20mm TAPADO A 8cm
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura A3- 136 Chapa metálica con orificio de 20 mm tapado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura A3- 137 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado pasando a 8 cm del agujero. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 20 mm tapado, con el altavoz emitiendo ruido rosa desde la parte trasera. La sonda PU se desplaza a 8 cm del agujero.
 Figura A3- 138 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura A3- 140 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura A3- 139 Mapa Acústico entre 500-550 Hz (Elaboración propia)

Este ensayo, en su versión de mapa global, presenta un rango dinámico entre los 98 dB y los 106 dB, es decir, una diferencia de 8 dB.

El mapa acotado en la banda de 500–550 Hz revela un rango dinámico no muy amplio, desde 82 dB hasta 91 dB, alcanzando solamente los 9 dB.