



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo y validación de un método híbrido basado en
ultrasonidos y velocidad de partícula acústica para la detección de
poros y pérdidas de espesor en chapas navales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Seoane Benjumeda

DIRECTORES: Gerardo González-Cela Echevarría
Francisco Javier Rodríguez Rodríguez

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo y validación de un método híbrido basado en
ultrasonidos y velocidad de partícula acústica para la detección de
poros y pérdidas de espesor en chapas navales*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

La detección de defectos localizados en chapas metálicas constituye un reto relevante dentro del mantenimiento predictivo de buques, dado su posible impacto en la estanqueidad y en la seguridad estructural. En la actualidad, las inspecciones rutinarias en elementos metálicos se apoyan en ensayos por ultrasonidos (UT), una técnica de probada eficacia, pero de naturaleza discreta, que solo identifica anomalías cuando el transductor coincide con su posición exacta.

El actual proyecto de investigación financiado por el CUD-ENM “*Estudio del empleo de técnicas de acústica avanzada para la identificación y caracterización de pérdidas de espesor y poros en la obra viva de buques (EspTAA)*” está explorando la capacidad de estas técnicas, basadas en la medición directa del parámetro *velocidad de partícula*, para detectar anomalías superficiales mediante un barrido continuo de alta resolución espacial.

El presente Trabajo Fin de Grado se plantea como una ampliación experimental de dicha línea de investigación, evaluando en laboratorio la viabilidad del empleo conjunto de técnicas ultrasónicas y de *velocidad de partícula acústica* sobre un cajón de ensayos de acero con defectos artificiales. Para ello, se desarrolla una campaña de ensayos orientada a comparar la respuesta obtenida mediante mapas acústicos realizados con las técnicas de acústica avanzada *Scan & Paint* y medidas ultrasónicas con el equipo de medida *CARGO-SAFE*, estudiando su complementariedad dentro de un enfoque híbrido de inspección no destructiva. De este modo, el trabajo busca establecer una base experimental que permita valorar el interés de ambas técnicas como herramientas complementarias para la detección y localización de defectos (poros y pérdidas de espesor) en chapas navales.

PALABRAS CLAVE

Inspección no destructiva, Ultrasonidos, Velocidad de partícula, Scan & Paint, CARGO-SAFE.

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar dando gracias a Dios, porque sin su ayuda no habría tenido la fuerza ni la perseverancia necesarias para llegar hasta aquí y terminar esta etapa.

A mis padres y a mis hermanos, gracias de corazón por haber estado siempre a mi lado. Por vuestro apoyo constante, por vuestra paciencia, por los ánimos en los momentos de más agobio y por confiar en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Haber contado con vosotros ha sido fundamental durante todo este camino.

A mis amigos, gracias por el interés que habéis mostrado en todo momento, por preocuparos por cómo iba saliendo el trabajo y por hacer que este proceso haya sido mucho más llevadero. Muchas veces, un comentario, una conversación o simplemente estar ahí vale más de lo que parece.

A mis tutores, gracias por la ayuda, la orientación y la disposición que habéis tenido durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado. Agradezco sinceramente vuestro tiempo, vuestro interés y el acompañamiento prestado en cada fase del trabajo.

Por último, gracias a todas las personas que, de una manera u otra, han aportado algo durante esta etapa y han hecho posible que este trabajo salga adelante.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	13
1 Motivación y objetivos	14
1.1 Justificación y motivación del trabajo	14
1.2 Objetivos del trabajo de fin de grado	15
1.2.1 Objetivo general.....	15
1.2.2 Objetivos secundarios.....	15
1.3 Estructura del trabajo	15
2 Integridad estructural y técnicas de inspección navales	17
2.1 Problemática de los poros y pérdidas de espesor.....	17
2.2 Requisitos de estanqueidad y seguridad estructural en buques.....	17
2.3 Inspección no destructiva (END) en el ámbito naval	18
2.4 Mantenimiento predictivo y gestión del riesgo estructural	19
3 Técnicas de ultrasonidos aplicadas a la inspección naval	21
3.1 Fundamentos físicos de los ensayos por ultrasonidos.....	21
3.2 Ventajas y limitaciones de los ensayos por ultrasonidos	23
3.3 Aplicaciones actuales en la Armada	24
4 Técnicas de acústica avanzada basadas en <i>velocidad de partícula</i>	26
4.1 Fundamentos de la acústica aplicada a estructuras	26
4.1.1 Generación de una onda acústica.....	26
4.1.2 Características de la onda sonora.....	27
4.1.3 Magnitudes fundamentales del sonido.....	30
4.1.4 Tipos de ruido	33
4.2 <i>Velocidad de partícula acústica</i> como parámetro diagnóstico	35
4.3 Tecnología <i>Scan & Paint</i>	36
4.3.1 Componentes del sistema	36
4.3.2 Generación de mapas acústicos	39
4.4 Ventajas frente a técnicas acústicas tradicionales	43
4.5 Aplicaciones previas en el sector industrial y naval	44
5 Metodología experimental y desarrollo del método híbrido	46
5.1 Planteamiento del método híbrido UT – Técnicas de Acústica Avanzada	46
5.2 Descripción de las chapas ensayadas y poros artificiales	46

5.3 Configuración de los ensayos por ultrasonidos.....	47
5.4 Configuración de los ensayos acústicos <i>Scan & Paint</i>	49
5.5 Procedimiento experimental y adquisición de datos.....	50
5.6 Criterios de comparación e integración de resultados	51
6 Resultados experimentales y validación.....	53
6.1 Resultados de los ensayos por ultrasonidos	53
6.2 Resultados de los mapas acústicos de <i>velocidad de partícula</i>	56
6.2.1 Análisis orificio de 1,5mm sin tapar a 95dB	56
6.2.2 Análisis orificio de 1,5mm sin tapar a 100dB	56
6.2.3 Análisis orificio de 1,5mm sin tapar a 105dB	57
6.2.4 Análisis orificio de 5mm sin tapar a 95dB	58
6.2.5 Análisis orificio de 5mm sin tapar a 100dB	59
6.2.6 Análisis orificio de 5mm sin tapar a 105dB	59
6.2.7 Análisis orificio de 8mm sin tapar a 95dB	60
6.2.8 Análisis orificio de 8mm sin tapar a 100dB	61
6.2.9 Análisis orificio de 8mm sin tapar a 105dB	62
6.2.10 Análisis orificio de 10mm sin tapar a 95dB	62
6.2.11 Análisis del orificio de 10mm sin tapar a 100dB	63
6.2.12 Análisis orificio de 10mm sin tapar a 105dB	64
6.2.13 Análisis orificio de 1,5mm Tapado a 105dB	65
6.2.14 Análisis orificio de 5mm Tapado a 105dB	65
6.2.15 Análisis orificio de 8mm tapado a 105dB	66
6.2.16 Análisis orificio de 10mm tapado a 105dB	67
6.3 Correlación entre imágenes y mapas acústicos.....	67
6.4 Evaluación comparativa de detectabilidad y resolución espacial	68
6.4.1 Detectabilidad de los poros.....	68
6.4.2 Resolución espacial de las técnicas	69
6.4.3 Comparación entre Scan & Paint y CARGO-SAFE.....	69
6.5 Análisis del tiempo de inspección y eficiencia operativa	70
7 Discusión y aplicabilidad operativa.....	72
7.1 Ventajas del método híbrido propuesto	72
7.2 Limitaciones del estudio	73
7.3 Aplicación potencial en inspecciones reales de buques.....	73
7.4 Integración en protocolos de mantenimiento de la Armada	74
8 Conclusiones y líneas futuras	75
8.1 Conclusiones generales.....	75

8.2 Grado de cumplimiento de los objetivos.....	76
8.3 Aportaciones del Trabajo Fin de Grado	77
8.4 Líneas futuras de investigación y mejora del método	77
9 Bibliografía.....	79
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	82
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	84
Anexo III: Fichas de ensayo	85
Anexo IV: Declaración de uso de Inteligencia Artificial	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1 Generación onda acústica [18].....	27
Figura 4-2 Amplitud de una onda sonora [21]	28
Figura 4-3 Relación entre frecuencia y longitud de onda [21].....	29
Figura 4-4 Propagación esférica del sonido desde una fuente puntual [25].....	30
Figura 4-5 Rango de niveles sonoros percibidos por el ser humano [25]	31
Figura 4-6 curvas isofónicas según la norma ISO 226:2023 [13].....	32
Figura 4-7 Curvas de ponderación [25].....	33
Figura 4-8 Espectro de frecuencia del ruido rosa [27]	33
Figura 4-9 Espectro de frecuencia del ruido blanco [27]	34
Figura 4-10 Espectro de frecuencia del ruido marrón [27]	34
Figura 4-11 Sonda Microflown, estructura interna y filamentos de platino [31].....	37
Figura 4-12 Diagrama polar de los sensores de velocidad de partícula [30].....	37
Figura 4-13 Acondicionador de señal MFPA-2 [34].....	38
Figura 4-14 Frontend Scout V2 [34]	38
Figura 4-15 WebCam Pro 9000. (Elaboración propia).	39
Figura 4-16 Método de medición [32]	39
Figura 4-17 Proceso de discretización espacial [33]	40
Figura 4-18 División de la superficie en celdas para el análisis acústico [32].....	41
Figura 4-19 Aplicación del método de cuadrícula en Scan & Paint con celdas de 20 cm. (Elaboración propia).	41
Figura 4-20 técnicas acústicas tradicionales frente a Scan & Paint [35].....	44
Figura 4-21 Localización de fuentes acústicas en la sala de máquinas de un buque mediante <i>Scan & Paint 2D</i> . [33]	44
Figura 4-22 Mapeo acústico de un gran compresor de gas en entorno industrial mediante <i>Scan & Paint 2D</i> . [36]	45
Figura 4-23 Detección de fugas acústicas en el interior de un vehículo mediante <i>Scan & Paint</i> [37].	45
Figura 5-1 Obtención del valor de escotilla abierta (OHV). (Elaboración propia).	48
Figura 5-2 Proceso de medición con <i>CARGO-SAFE</i> . Elaboración propia).	48
Figura 5-3 Montaje del equipo <i>Scan & Paint</i> . (Elaboración propia).	50
Figura 6-1 Variación de la lectura ultrasónica respecto a la distancia para orificios sin tapar. (Elaboración propia).	54
Figura 6-2 Variación de la lectura ultrasónica respecto a la distancia para orificios tapados. (Elaboración propia).	55
Figura 6-3 Comparación de la lectura ultrasónica entre orificios abiertos y tapados a 0 cm. (Elaboración propia).	55
Figura 6-4 Mapa Acústico del orificio de 1,5mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).	56

Figura 6-5 Mapa Acústico del orificio de 1,5mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).	56
Figura 6-6 Mapas Acústicos del orificio de 1,5mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).	57
Figura 6-7 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	57
Figura 6-8 Mapas Acústicos del orificio de 5mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).	58
Figura 6-9 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	58
Figura 6-10 Mapas Acústicos del orificio de 5mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).	59
Figura 6-11 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	59
Figura 6-12 Mapas Acústicos del orificio de 5mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).	60
Figura 6-13 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	60
Figura 6-14 Mapas Acústicos del orificio de 8mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).	60
Figura 6-15 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	60
Figura 6-16 Mapas Acústicos del orificio de 8mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).	61
Figura 6-17 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	61
Figura 6-18 Mapas Acústicos del orificio de 8mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).	62
Figura 6-19 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	62
Figura 6-20 Mapas Acústicos del orificio de 10mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).	63
Figura 6-21 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	63
Figura 6-22 Mapas Acústicos del orificio de 10mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).	63
Figura 6-23 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	63
Figura 6-24 Mapas Acústicos del orificio de 10mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).	64
Figura 6-25 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	64
Figura 6-26 Mapa Acústico del orificio de 1,5mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).	65
Figura 6-27 Mapas Acústicos del orificio de 5mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).	65
Figura 6-28 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	65
Figura 6-29 Mapas Acústicos del orificio de 8mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).	66
Figura 6-30 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	66
Figura 6-31 Mapas Acústicos del orificio de 10mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).	67
Figura 6-32 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).	67
Figura 0-1 Chapa metálica con orificio de 1,5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	86
Figura 0-2 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	86
Figura 0-3 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	86
Figura 0-4 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	86
Figura 0-5 Chapa metálica con orificio de 1,5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	87
Figura 0-6 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	87

Figura 0-7 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	87
Figura 0-8 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	87
Figura 0-9 Chapa metálica con orificio de 1,5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)...	88
Figura 0-10 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	88
Figura 0-11 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	88
Figura 0-12 Mapa Acústico entre 8700-8800 Hz (Elaboración propia).....	88
Figura 0-13 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	88
Figura 0-14 Chapa metálica con orificio de 5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)....	89
Figura 0-15 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm pasando por encima. (Elaboración propia).	89
Figura 0-16 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	89
Figura 0-17 Mapa Acústico entre 200-230 Hz (Elaboración propia).....	89
Figura 0-18 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	89
Figura 0-19 Chapa metálica con orificio de 5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)....	90
Figura 0-20 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	90
Figura 0-21 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	90
Figura 0-22 Mapa Acústico entre 200-240 Hz (Elaboración propia).....	90
Figura 0-23 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	90
Figura 0-24 Chapa metálica con orificio de 5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)....	91
Figura 0-25 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	91
Figura 0-26 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	91
Figura 0-27 Mapa Acústico entre 200-240 Hz (Elaboración propia).....	91
Figura 0-28 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	91
Figura 0-29 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)....	92
Figura 0-30 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm pasando por encima. (Elaboración propia)	92
Figura 0-31 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	92
Figura 0-32 Mapa Acústico entre 416-463 Hz (Elaboración propia).....	92
Figura 0-33 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	92
Figura 0-34 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)....	93
Figura 0-35 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm pasando por encima. (Elaboración propia)	93
Figura 0-36 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	93
Figura 0-37 Mapa Acústico entre 430-480 Hz (Elaboración propia).....	93
Figura 0-38 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).....	93

Figura 0-39 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)....	94
Figura 0-40 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm pasando por encima. (Elaboración propia)	94
Figura 0-41 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	94
Figura 0-42 Mapa Acústico entre 808-855 Hz (Elaboración propia).....	94
Figura 0-43 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	94
Figura 0-44 Chapa metálica con orificio de 10 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)..	95
Figura 0-45 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10mm pasando por encima. (Elaboración propia)	95
Figura 0-46 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia).....	95
Figura 0-47 Mapa Acústico entre 662-709 Hz (Elaboración propia).....	95
Figura 0-48 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	95
Figura 0-49 Chapa metálica con orificio de 10 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)..	96
Figura 0-50 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	96
Figura 0-51 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	96
Figura 0-52 Mapa Acústico entre 879-926 Hz (Elaboración propia).....	96
Figura 0-53 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	96
Figura 0-54 Chapa metálica con orificio de 10 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)..	97
Figura 0-55 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10 mm pasando por encima. (Elaboración propia)	97
Figura 0-56 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	97
Figura 0-57 Mapa Acústico entre 1277-1324 Hz (Elaboración propia).....	97
Figura 0-58 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	97
Figura 0-59 Chapa metálica con orificio de 1,5mm tapado. (Elaboración propia)	98
Figura 0-60 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	98
Figura 0-61 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	98
Figura 0-62 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	98
Figura 0-63 Chapa metálica con orificio de 5 mm tapado. (Elaboración propia)	99
Figura 0-64 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	99
Figura 0-65 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	99
Figura 0-66 Mapa Acústico entre 300-330 Hz (Elaboración propia).....	99
Figura 0-67 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	99
Figura 0-68 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado. (Elaboración propia)	100
Figura 0-69 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	100

Figura 0-70 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	100
Figura 0-71 Mapa Acústico entre 4710-4810 Hz (Elaboración propia).....	100
Figura 0-72 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	100
Figura 0-73 Chapa metálica con orificio de 10 mm tapado. (Elaboración propia)	101
Figura 0-74 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	101
Figura 0-75 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	101
Figura 0-76 Mapa Acústico entre 1927-1974 Hz (Elaboración propia).....	101
Figura 0-77 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	101
Figura 0-78 Chapa metálica con orificio de 1,5mm sin tapar. (Elaboración propia)	102
Figura 0-79 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm sin tapar pasando por encima. (Elaboración propia)	102
Figura 0-80 Chapa metálica con orificio de 1,5mm tapado. (Elaboración propia)	103
Figura 0-81 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	103
Figura 0-82 Chapa metálica con orificio de 5mm sin tapar. (Elaboración propia)	104
Figura 0-83 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	104
Figura 0-84 Chapa metálica con orificio de 5mm tapado. (Elaboración propia)	105
Figura 0-85 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	105
Figura 0-86 Chapa metálica con orificio de 8mm sin tapar. (Elaboración propia)	106
Figura 0-87 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm sin tapar pasando por encima. (Elaboración propia)	106
Figura 0-88 Chapa metálica con orificio de 8mm tapado. (Elaboración propia)	107
Figura 0-89 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	107
Figura 0-90 Chapa metálica con orificio de 10mm sin tapar. (Elaboración propia)	108
Figura 0-91 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10mm sin tapar pasando por encima. (Elaboración propia)	108
Figura 0-92 Chapa metálica con orificio de 10mm tapado. (Elaboración propia)	109
Figura 0-93 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas de los ensayos por ultrasonidos [6]	23
Tabla 2 Limitaciones de los ensayos por ultrasonidos [10]	24
Tabla 3 Ventajas del software Scan & Paint. [35]	43
Tabla 4 Comparación entre Scan & Paint y CARGO-SAFE. (Elaboración propia).	70
Tabla 5 Matriz de ensayos Scan & Paint. (Elaboración propia).....	85
Tabla 6 Matriz de ensayos CARGO-SAFE (BASE = 30% OHV). (Elaboración propia).	85

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación y motivación del trabajo

La integridad estructural de los cascos metálicos de los buques constituye un factor crítico para garantizar la seguridad, la estanqueidad y la operatividad de las unidades navales. La aparición de poros, pérdidas de espesor y fenómenos de corrosión en la obra viva puede comprometer gravemente estas condiciones, incrementando el riesgo de inundaciones, reduciendo la vida útil de las estructuras y elevando de forma significativa los costes de mantenimiento y reparación. En este contexto, el mantenimiento predictivo adquiere un papel fundamental, al permitir la detección temprana de defectos estructurales y la planificación óptima de las intervenciones antes de que se produzcan fallos críticos.

En la actualidad, las inspecciones de chapas navales se apoyan principalmente en técnicas de inspección no destructiva (END), siendo los ensayos por ultrasonidos (UT) una de las metodologías más extendidas debido a su fiabilidad y precisión en la medición de espesores. Sin embargo, pese a su eficacia, los ensayos por ultrasonidos presentan limitaciones relevantes desde el punto de vista operativo. Su carácter discreto, basado en mediciones punto a punto, hace que la probabilidad de detección de defectos dependa de que el transductor coincida exactamente con la ubicación del daño, lo que puede dar lugar a inspecciones prolongadas y a la posible omisión de defectos localizados entre puntos de medida.

Paralelamente, en los últimos años se han desarrollado técnicas de acústica avanzada basadas en la medición directa de la velocidad de partícula acústica, capaces de generar mapas continuos de alta resolución espacial mediante barridos sobre la superficie inspeccionada. Estas técnicas permiten obtener una visión global del comportamiento acústico de la estructura, facilitando la identificación de anomalías superficiales asociadas a poros y pérdidas de espesor, y reduciendo la dependencia del muestreo puntual característico de los métodos convencionales.

En este contexto, el proyecto de investigación *EspTAA*, financiado por el CUD-ENM está explorando la aplicación de estas técnicas de acústica avanzada para la identificación y caracterización de pérdidas de espesor y poros en chapas navales. No obstante, para que estas metodologías puedan ser incorporadas de forma efectiva a los protocolos de mantenimiento de la Armada, resulta necesario evaluar su complementariedad con técnicas END consolidadas como los ultrasonidos.

Por todo ello, el presente Trabajo Fin de Grado se justifica como una ampliación directa de la línea de investigación previamente desarrollada, proponiendo el estudio conjunto de los ensayos por ultrasonidos y de las técnicas de acústica avanzada basadas en velocidad de partícula acústica. El enfoque híbrido planteado pretende combinar las ventajas de ambas metodologías, incrementando la probabilidad de detección de poros, optimizando los tiempos de inspección y proporcionando una herramienta

innovadora y operativamente viable para el mantenimiento predictivo y la mejora de la seguridad estructural de los buques de la Armada.

1.2 Objetivos del trabajo de fin de grado

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar y validar un método híbrido de inspección no destructiva basado en la combinación de ensayos por ultrasonidos y técnicas de acústica avanzada fundamentadas en la medición de la velocidad de partícula acústica, orientado a la detección de poros y pérdidas de espesor en chapas navales.

1.2.2 Objetivos secundarios

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- i) Analizar la problemática asociada a la aparición de poros localizados, pérdidas de estanqueidad y degradaciones en chapas metálicas de interés naval.
- ii) Diseñar y ejecutar una campaña experimental de ensayos en laboratorio sobre un cajón de ensayos metálico con poros controlados.
- iii) Obtener y analizar mapas acústicos de velocidad de partícula mediante la técnica *Scan & Paint* y medidas ultrasónicas mediante *CARGO-SAFE*.
- iv) Estudiar la correlación entre los resultados obtenidos por ambas técnicas, evaluando su complementariedad y coherencia diagnóstica.
- v) Realizar una evaluación comparativa de la detectabilidad, la resolución espacial y el tiempo de inspección de ambas técnicas.

1.3 Estructura del trabajo

Este Trabajo de Fin de Grado se organiza en varias partes con el objetivo de presentar de forma clara el problema estudiado, las técnicas empleadas, la metodología experimental desarrollada y los resultados obtenidos.

En primer lugar, se aborda la importancia de la integridad estructural y de la estanqueidad en chapas metálicas de interés naval, así como la necesidad de contar con técnicas de inspección que permitan detectar poros de forma temprana. En este contexto, se introduce el interés de combinar técnicas de inspección no destructiva ya consolidadas, como los ultrasonidos, con herramientas más recientes basadas en acústica avanzada. También se exponen la motivación del trabajo y los objetivos planteados.

A continuación, se presentan los fundamentos teóricos necesarios para comprender el estudio. Por un lado, se describen los principios básicos de los ensayos por ultrasonidos, sus ventajas, sus limitaciones y su interés dentro de la inspección naval. Por otro, se desarrollan los conceptos acústicos que sustentan el trabajo, como la generación de ondas sonoras, sus características principales y las magnitudes fundamentales del sonido. Dentro de este bloque se presta especial atención al parámetro de velocidad de partícula acústica, ya que constituye la base de la técnica empleada en los ensayos con *Scan & Paint*.

Seguidamente, se describe la tecnología *Scan & Paint*, explicando su principio de funcionamiento, los componentes del sistema y la forma en que permite generar mapas acústicos sobre la superficie ensayada. Además, se comentan sus principales ventajas frente a otras técnicas acústicas tradicionales y se recogen algunas aplicaciones previas en el ámbito industrial y naval, con el fin de situar el trabajo dentro de una línea de investigación ya existente.

Después, se expone la metodología experimental desarrollada en laboratorio. En esta parte se describe el cajón de ensayos utilizado, los poros artificiales practicados y la forma en que se configuraron los ensayos realizados con *Scan & Paint* y con *CARGO-SAFE*. También se detalla el procedimiento

seguido para la adquisición de datos y los criterios empleados para comparar ambas técnicas dentro del enfoque híbrido planteado.

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos durante la campaña experimental. Por una parte, se estudia la respuesta registrada con *CARGO-SAFE* en función del tamaño del defecto, su estado abierto o tapado y la distancia de medida. Por otra, se analizan los mapas acústicos de velocidad de partícula obtenidos con *Scan & Paint*, valorando la claridad con la que el defecto aparece en cada configuración ensayada. Finalmente, se comparan ambas respuestas para estudiar su correlación, su capacidad de detectabilidad y su comportamiento desde un punto de vista operativo.

Por último, se recogen las conclusiones más relevantes del trabajo, valorando qué se ha podido demostrar experimentalmente y cuáles son las principales limitaciones del estudio. También se plantean posibles líneas futuras de mejora, orientadas a seguir desarrollando el método sobre configuraciones más representativas y a reforzar su interés como herramienta complementaria de inspección.

El documento se completa con varios anexos en los que se incluyen las fichas correspondientes a los ensayos realizados, de modo que pueda consultarse de forma ordenada la información experimental generada durante el trabajo.

2 INTEGRIDAD ESTRUCTURAL Y TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NAVALES

2.1 Problemática de los poros y pérdidas de espesor

La integridad estructural de los cascos metálicos de los buques es un aspecto decisivo para garantizar la seguridad, la estanqueidad y su capacidad operativa. No es un detalle menor, de ella depende en gran medida, que el buque pueda seguir cumpliendo su misión con fiabilidad y sin comprometer a la dotación. Con el paso del tiempo, las chapas del casco sufren el desgaste propio del servicio y de la exposición continua al medio marino. La corrosión, junto con otros procesos de degradación, puede ir debilitando el material poco a poco, provocando pérdidas de espesor e incluso la aparición de poros o pequeñas perforaciones. Estos defectos, ya se trate de poros milimétricos causados por corrosión localizada o de un adelgazamiento más generalizado de la chapa, representan uno de los problemas de mantenimiento más delicados en los buques, precisamente por su efecto directo sobre la estanqueidad y sobre la seguridad estructural del conjunto. [1], [2]

La aparición de poros o de zonas con un adelgazamiento acusado puede comprometer seriamente la seguridad del buque. No solo aumenta el riesgo de vías de agua e inundaciones, sino que además acorta la vida útil de la estructura y eleva, a veces de forma muy considerable, los costes de mantenimiento y reparación. De hecho, incluso una perforación pequeña, si pasa desapercibida durante demasiado tiempo, puede ir debilitando la resistencia del casco hasta desembocar en situaciones peligrosas para la dotación y para la propia embarcación. Por eso resulta tan importante detectar estas anomalías en una fase temprana, antes de que evolucionen y terminen convirtiéndose en fallos de mayor entidad. Ahora bien, localizarlas no siempre es tan sencillo. En muchos casos se trata de defectos internos o de dimensiones muy reducidas, casi imperceptibles, lo que complica su identificación mediante inspecciones rutinarias.[1], [2]

2.2 Requisitos de estanqueidad y seguridad estructural en buques

Desde el punto de vista de la seguridad estructural y de la operación del buque, los requisitos de estanqueidad no dependen solo de una buena práctica constructiva, sino de un marco normativo muy definido. Ese marco, recogido en normas internacionales incorporadas al ordenamiento español, establece cómo debe diseñarse, construirse, inspeccionarse y mantenerse la estructura para que el casco pueda soportar daños sin comprometer la seguridad del buque ni la de su tripulación. En esa línea, el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS), y en particular su Capítulo II-1, fija una serie de obligaciones destinadas a garantizar tanto la resistencia mecánica del casco como su capacidad para conservar la estanqueidad cuando se produce una avería o una entrada de agua no prevista. Estas exigencias no son orientativas ni teóricas, son de obligado cumplimiento para

los buques civiles registrados bajo pabellón español y para aquellas unidades sometidas a inspección y certificación por la Dirección General de la Marina Mercante, de acuerdo con el marco legal vigente en España. [3], [4]

Las normas de SOLAS exigen que las embarcaciones estén divididas en compartimentos estancos mediante mamparos y estructuras selladas capaces de frenar la propagación del agua en caso de avería o de daño en el casco. La idea de fondo es clara, si se produce un accidente estructural, la entrada de agua no debe extenderse libremente por el interior del buque hasta comprometer de forma crítica su estabilidad o su capacidad de mantenerse a flote. Dicho de una manera más directa, el casco debe estar diseñado y construido para que, incluso después de un impacto o de un fallo que provoque una vía de agua, el buque conserve todavía la flotabilidad y la estabilidad necesarias para seguir operando con un margen razonable de seguridad. [3], [4]

Un elemento especialmente importante dentro de esa estanqueidad lo forman las puertas estancas y los sistemas de cierre de aberturas en mamparos y cubiertas. No basta con que existan, deben responder a unas especificaciones técnicas muy concretas de diseño y funcionamiento que aseguren un cierre realmente eficaz frente al paso del agua. Además, tienen que estar correctamente señalizados, disponer de sistemas de control que permitan conocer su estado cuando sea necesario (abiertos o cerrados) y poder accionarse con fiabilidad incluso cuando el buque presenta cierto grado de escora. A esto se suma otra exigencia fundamental: muchos reglamentos obligan a comprobar periódicamente su funcionamiento, ya sea someténdolos a presiones equivalentes a la carga hidrostática que podrían soportar en una situación de daño, o mediante maniobras regulares de cierre y ensayos funcionales semanales que permitan verificar su eficacia en condiciones reales de servicio.[3], [4]

En este contexto, la seguridad estructural y la estanqueidad en los buques no se entienden como cualidades aisladas ni como algo que dependa solo del diseño geométrico del casco. Más bien, se conciben como requisitos normativos que enlazan de forma directa el diseño, la fabricación, la inspección técnica y el mantenimiento continuo de los elementos estructurales y de cierre. En definitiva, la integridad del casco no debe depender únicamente de cómo está construido sobre el papel, sino de su capacidad real para resistir daños y limitar tanto la entrada como la propagación del agua en situaciones operativas reales. [3], [4]

2.3 Inspección no destructiva (END) en el ámbito naval

Para detectar y evaluar los defectos descritos sin dañar la estructura, se recurre a técnicas de Inspección No Destructiva (END) adaptadas al ámbito naval. Hoy en día, la inspección de chapas en buques se apoya sobre todo en este tipo de métodos, y entre ellos los ensayos por ultrasonidos (UT) ocupan un lugar central por su fiabilidad y por la precisión con la que permiten medir espesores o revelar corrosión oculta. En una inspección ultrasónica típica, se coloca un transductor sobre la superficie de la chapa y se emiten pulsos de sonido de alta frecuencia, a partir del eco reflejado, es posible estimar el espesor restante del material o detectar discontinuidades internas. Gracias a ello, esta técnica permite identificar pérdidas de espesor por corrosión interna incluso cuando no existe ninguna señal visible en el exterior. [5], [6]

Junto a los ultrasonidos, también se emplean con frecuencia otros métodos, como la inspección visual realizada por buzos, robots submarinos o personal especializado durante las varadas en dique seco y técnicas como las partículas magnéticas, los líquidos penetrantes o la radiografía industrial, según el tipo de defecto que se quiera estudiar. Cada técnica aporta información complementaria sobre el estado del casco sin requerir cortes ni daños en el material. [6], [7]

Ahora bien, pese a su utilidad, las técnicas END convencionales también arrastran limitaciones operativas importantes. Los ultrasonidos, por ejemplo, son eficaces, sí, pero trabajan de forma discreta ya que el transductor inspecciona punto a punto, de modo que solo detectará el defecto si se coloca exactamente sobre él. Esto hace que la probabilidad de detección dependa mucho de la cobertura del barrido realizado y obliga, en superficies amplias, a tomar una gran cantidad de medidas puntuales, con

el consiguiente aumento del tiempo de inspección. Algo parecido ocurre con la inspección visual tradicional, cuyo alcance es más limitado de lo que a veces parece, ya que solo permite descubrir daños superficiales o aberturas claramente visibles, dejando fuera de su campo de acción defectos internos o todavía incipientes. En conjunto, los métodos actuales pueden resultar laboriosos, costosos y, en ciertos casos, insuficientes para identificar a tiempo las anomalías más pequeñas o escondidas dentro de la estructura. [8], [9]

Precisamente por estas limitaciones, en los últimos años ha crecido el interés por desarrollar técnicas END más avanzadas que permitan inspeccionar las chapas con mayor rapidez y con una cobertura más continua. Dentro de esa línea han aparecido métodos de acústica avanzada basados en la medición directa de la velocidad de partícula acústica, capaces de generar mapas continuos de alta resolución espacial mediante un barrido dinámico de la superficie. Un ejemplo especialmente representativo es la tecnología *Scan & Paint*, que utiliza una sonda acústica en movimiento para cartografiar el campo sonoro sobre la estructura. Este tipo de herramientas ha mostrado un potencial muy prometedor para detectar anomalías superficiales, como fugas, poros o cambios locales de espesor, precisamente porque ofrecen una visión global del comportamiento acústico del casco y reducen la dependencia del muestreo puntual. Aunque todavía se encuentran en una fase de estudio y desarrollo, estas técnicas de inspección continua podrían llegar a complementar de manera muy valiosa a los ultrasonidos y al resto de métodos END tradicionales, aumentando la probabilidad de detección, reduciendo los tiempos de inspección y ofreciendo un diagnóstico más completo del estado estructural del buque. [10]

2.4 Mantenimiento predictivo y gestión del riesgo estructural

La detección eficaz de defectos no debe entenderse como una acción aislada, sino como parte de una visión más amplia de conservación, la del mantenimiento predictivo. Tradicionalmente, el mantenimiento naval se ha apoyado sobre todo en dos enfoques bien conocidos: el correctivo, que actúa cuando la avería ya se ha producido, y el preventivo programado, basado en inspecciones y sustituciones realizadas a intervalos fijos con el fin de evitar fallos. De hecho, en muchas unidades, la Armada ha recurrido de forma mayoritaria a este mantenimiento preventivo. Sin embargo, en los últimos años ha ido ganando peso otro planteamiento, más ajustado a la realidad del sistema y, en cierto modo, también más inteligente, el enfoque predictivo, que se basa en la condición actual de los componentes y no únicamente en el paso del tiempo. [11] [12]

El mantenimiento predictivo consiste, en esencia, en adquirir, procesar y analizar datos que reflejen el estado real de los elementos estructurales a partir de mediciones periódicas y sistemas de monitorización continua. A través de esa información es posible evaluar la condición de los componentes, detectar tendencias de degradación y anticipar la aparición de fallos antes de que lleguen a materializarse. Frente a los modelos más tradicionales, esta estrategia introduce una lógica claramente proactiva, ya que permite programar las intervenciones de mantenimiento según criterios objetivos de deterioro y en función de las necesidades reales de la estructura. Esta filosofía resulta especialmente valiosa en el caso del casco de los buques, donde el uso de técnicas avanzadas de inspección y monitorización ofrece la posibilidad de detectar degradaciones con la antelación suficiente como para planificar las acciones correctivas necesarias y preservar la integridad estructural a lo largo de toda la vida útil de la embarcación. [9], [11]

Las ventajas de este enfoque predictivo en la gestión del riesgo estructural del buque son, además, especialmente relevantes. Detectar un defecto en el casco con tiempo permite corregirlo en dique seco o durante una parada planificada, evitando así reparaciones de emergencia mucho más costosas y reduciendo los periodos de inactividad no previstos de la unidad. En lugar de tener que reaccionar ante una avería inesperada en plena operación, con todo lo que eso implica en términos de inmovilización, retrasos y tensión operativa, la planificación predictiva permite intervenir en el momento oportuno y con los recursos adecuados. Eso se traduce en un ahorro tangible de materiales, mano de obra y tiempo, y también en una prolongación de la vida útil de la estructura, al evitar que los daños se acumulen hasta

requerir sustituciones de mayor entidad. Al mismo tiempo, mejora la seguridad operacional, porque reduce la probabilidad de fallos estructurales repentinos y, con ello, disminuye también el riesgo de inundaciones inesperadas o vertidos que puedan generar un impacto ambiental. En conjunto, el mantenimiento basado en condición aumenta la fiabilidad del buque, refuerza la confianza en su estado real y optimiza los costes a largo plazo. No es casualidad que muchas navieras y armadas hayan asociado estas prácticas con mayores niveles de disponibilidad de sus unidades y con estándares más altos de seguridad y eficiencia operativa. [11], [12]

En este contexto, ya se han puesto en marcha iniciativas orientadas a implantar estrategias de mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) en determinadas unidades, con una atención cada vez mayor al mantenimiento predictivo apoyado en nuevas tecnologías. Dentro de esa evolución, gana peso el uso de herramientas capaces de analizar el comportamiento real de los sistemas a partir de datos, señales y parámetros monitorizados, abriendo la puerta a formas de supervisión más avanzadas y precisas.

Desde esa perspectiva, el presente Trabajo Fin de Grado se sitúa como una aportación técnica alineada con esa línea de evolución, al evaluar metodologías avanzadas de inspección no destructiva cuya información podría incorporarse en el futuro a este tipo de sistemas. En particular, la combinación de mapas acústicos obtenidos mediante técnicas basadas en velocidad de partícula y resultados de ensayos por ultrasonidos podrían reforzar la identificación temprana de zonas críticas del casco.

De este modo, sería posible gestionar con mayor eficacia el riesgo estructural, priorizando las inspecciones y las actuaciones de mantenimiento en aquellas áreas con mayor probabilidad de fallo y mayor criticidad, lo que contribuiría tanto a mejorar la seguridad estructural como a optimizar los recursos destinados al mantenimiento naval.

3 TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS APLICADAS A LA INSPECCIÓN NAVAL

Los ensayos por ultrasonidos (UT, *Ultrasonic Testing*) forman parte de los Ensayos No Destructivos (END) y se basan en introducir ondas acústicas de alta frecuencia en un material para detectar discontinuidades internas y/o medir espesores a partir del análisis de los ecos reflejados. En el ámbito de la inspección naval, esta técnica resulta especialmente valiosa porque muchas degradaciones que afectan de forma directa a la integridad estructural como la pérdida de espesor por corrosión, la falta de fusión en soldaduras o la presencia de grietas internas no pueden identificarse mediante una simple inspección visual y requieren métodos de evaluación volumétrica o de medida indirecta. Desde el punto de vista normativo y técnico, además, se trata de un método ampliamente consolidado y estandarizado. ISO recoge normas marco como la ISO 16810, centrada en los principios generales del ensayo por ultrasonidos, o la ISO 17640, aplicada a uniones soldadas, mientras que ASTM International incluye prácticas como la ASTM E114 para ensayos por pulso-eco de haz recto. Todo este marco tiene una importancia especial en el sector naval, donde la inspección del casco y de las soldaduras no se improvisa, sino que se apoya en procedimientos definidos, criterios de aceptación, calibraciones y requisitos de cualificación del personal. [6], [13], [14]

En los buques, una de las aplicaciones más habituales de esta técnica es la medición de espesores por ultrasonidos para controlar la pérdida de material en estructuras sometidas a corrosión. Es una tarea tan útil como necesaria, ya que permite conocer con bastante precisión el estado resistente de elementos que, con el tiempo y la exposición al medio marino, pueden ir debilitándose de forma progresiva. Además, en el ámbito de la clasificación naval a través de las sociedades de clasificación y de su coordinación técnica en IACS estas inspecciones contribuyen de manera directa tanto a la seguridad como a la regulación del transporte marítimo, y sirven para comprobar que el buque sigue cumpliendo los requisitos exigidos a lo largo de toda su vida operativa. [15]

3.1 Fundamentos físicos de los ensayos por ultrasonidos

Los fundamentos físicos se pueden entender de forma clara si se separan cuatro ideas: generación del ultrasonido, propagación, interacción con discontinuidades, y cómo se transforma el eco en información del defecto.

- Generación y recepción del ultrasonido: En equipos industriales, el ultrasonido se genera en un transductor que convierte impulsos eléctricos en vibración mecánica (onda sonora) y, a la vuelta, convierte el eco acústico en señal eléctrica para su visualización e interpretación. Esta conversión se realiza típicamente mediante un elemento eléctrico integrado en el propio transductor. Las frecuencias usadas en UT están muy por encima del umbral audible. En

aplicaciones industriales se citan rangos más comunes desde cientos de kHz hasta decenas de MHz. [16]

- Propagación, velocidad, frecuencia y longitud de onda: Una onda ultrasónica en un material se caracteriza principalmente por velocidad v , frecuencia (f) y longitud de onda (λ).

Su relación básica sería:

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

Esta relación es relevante porque la resolución, que es la capacidad de detectar defectos pequeños, está condicionada por λ . En detección de defectos, un límite inferior aceptado para detectar un defecto pequeño es del orden de media longitud de onda, y en medición de espesores la mínima teórica medible se sitúa en torno a una longitud de onda. Por tanto, aumentar la frecuencia mejora resolución, pero suele aumentar atenuación y reducir penetración, obligando a equilibrar ambas. La velocidad del sonido depende fuertemente del material (densidad y elasticidad). Por ejemplo, en acero se citan valores típicos cercanos a 5890–5920 m/s para onda longitudinal (el valor exacto depende de aleación y condiciones). [16], [17]

- Interacción con discontinuidades, reflexión, transmisión e impedancia acústica: La detección UT de defectos se apoya en que, al encontrar un límite entre medios parte de la energía se refleja y parte se transmite. La magnitud de esa reflexión depende del contraste de impedancia acústica (Z), que se define como densidad por velocidad del sonido. En incidencia normal sobre un plano con un frente perpendicular, el coeficiente de reflexión se relaciona con (Z) y que, si las impedancias son muy diferentes como la del metal-aire, la reflexión tiende a acercarse al 100%, fundamento práctico de la detección por eco en grietas o discontinuidades con aire. La expresión del coeficiente de reflexión se presenta de forma habitual como:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

Donde Z_1 es la impedancia del medio desde donde la onda incide y Z_2 es la impedancia del medio hacia donde la onda trata de moverse.

Cuando la onda incide con un ángulo distinto de cero, aparece además refracción y conversión de modos. Esto es crucial en inspección de soldaduras, porque muchos defectos no están orientados de forma favorable para un haz recto. [14], [17], [18]

3.2 Ventajas y limitaciones de los ensayos por ultrasonidos

Ventaja	Descripción
Inspección volumétrica del material	Permite detectar discontinuidades internas que no son accesibles mediante inspección visual ni con métodos limitados a superficie.
Acceso por una sola cara	En muchas aplicaciones basta con acceder a una sola superficie de la pieza o estructura, lo que facilita la inspección de chapas, mamparos y soldaduras en servicio.
Alta sensibilidad a defectos relevantes	Presenta una elevada capacidad para detectar discontinuidades asociadas a la integridad estructural, especialmente grietas, faltas de fusión y poros.
Resultados inmediatos	La información se obtiene durante la propia inspección, lo que permite valorar el estado del elemento sin necesidad de esperar a revelados o tratamientos posteriores.
Ausencia de radiación ionizante	A diferencia de la radiografía industrial, no genera riesgos radiológicos para el personal ni obliga a establecer zonas de exclusión durante el ensayo.
Portabilidad del equipo	Los equipos de ultrasonidos son transportables y pueden emplearse tanto en taller como a bordo o en dique seco.
Capacidad de localizar y dimensionar defectos	Además de detectar la discontinuidad, el método permite estimar su posición y, en determinadas condiciones, su tamaño y orientación.
Aplicable a múltiples configuraciones	Puede emplearse en chapas, tuberías, soldaduras, ejes, tanques y otros elementos estructurales, adaptándose a distintas geometrías y necesidades de inspección.
Posibilidad de automatización y registro	Las técnicas avanzadas permiten generar registros digitales, mejorar la trazabilidad del ensayo y aumentar la cobertura de inspección.

Tabla 1 Ventajas de los ensayos por ultrasonidos [6]

Limitación	Descripción
Alta dependencia del operador	La calidad del ensayo y de su interpretación depende en gran medida de la experiencia, formación y criterio técnico del inspector.
Necesidad de calibración previa	El equipo debe ajustarse correctamente al material, al espesor, al tipo de sonda y a la geometría inspeccionada para obtener resultados fiables.
Influencia de la orientación del defecto	La detectabilidad disminuye cuando la discontinuidad no refleja adecuadamente el haz ultrasónico hacia el transductor.
Dificultad en geometrías complejas	Superficies rugosas, curvadas, irregulares o de difícil acceso pueden complicar el acoplamiento y la interpretación de la señal.
Menor eficacia en materiales de grano grueso o estructura heterogénea	Algunos materiales, como determinados aceros inoxidables austeníticos o zonas de soldadura con grano grueso, atenúan y dispersan la señal, dificultando la detección.
Riesgo de indicaciones engañosas	Pueden aparecer ecos falsos o interpretaciones erróneas debidas a la geometría de la pieza, a reflexiones secundarias o a una configuración inadecuada del equipo.
Dificultad para detectar algunos defectos superficiales	Determinadas discontinuidades abiertas a superficie o muy próximas a ella pueden no identificarse con la misma eficacia que mediante otras técnicas.
Registro no siempre permanente	En ultrasonidos convencionales manuales no siempre queda un registro gráfico completo del ensayo, salvo que se empleen equipos avanzados o sistemas digitalizados.
Ensayo manual potencialmente lento en grandes superficies	Aunque el método ofrece resultados inmediatos, la inspección manual punto a punto puede resultar laboriosa cuando se requiere una cobertura extensa.

Tabla 2 Limitaciones de los ensayos por ultrasonidos [10]

3.3 Aplicaciones actuales en la Armada

La aplicación real que se observa con más claridad y evidencia pública en entorno de Armada Española es el uso de ultrasonidos en mantenimiento programado y en actividades asociadas a la integridad del casco y sistemas relacionados.

En contratos y noticias sobre mantenimiento de Buques de Acción Marítima, se describe explícitamente la inspección por ultrasonidos de espesores del casco como una de las tareas a ejecutar durante varadas reglamentarias. Por ejemplo, *Infodefensa* recoge que, en la varada reglamentaria del BAM *Relámpago* (P-43), se realizan tareas como la inspección por ultrasonidos de espesores del casco, junto con otras actividades de revisión estructural. Desde una perspectiva técnica más general aplicable a buques tanto civiles como militares bajo criterios de inspección estructural, la medición de espesores por UT se usa para determinar el estado resistente de estructuras y decidir si ciertas zonas deben catalogarse como corrosión sustancial o si procede renovación. La conexión con sociedades de clasificación e IACS aparece en que la clasificación y el cumplimiento apoyan el control de seguridad del buque y su mantenimiento estructural, esto contextualiza por qué la medición de espesores no es solo medición, sino una pieza dentro de un sistema técnico-regulatorio de seguridad marítima.[15], [19]

En construcción naval y reparaciones, la inspección por ultrasonidos es un método principal para evaluar soldaduras y componentes estructurales metálicos. En lo físico, el haz angular es el estándar para soldaduras porque muchas discontinuidades en soldaduras no están orientadas de forma favorable respecto a un haz recto, por ello se inspecciona desde el lado y en ángulos típicos (45° , 60° , 70°) para barrer el volumen del cordón. En el ecosistema industrial de buques de la Armada, *Navantia* (constructor de BAM como el *Relámpago*) describe, en el contexto de tecnologías industriales 4.0, el trabajo sobre digitalización de informes END e identificación de mejores tecnologías de inspección, incluyendo ultrasonidos, en procesos productivos. [14], [18], [20]

4 TÉCNICAS DE ACÚSTICA AVANZADA BASADAS EN VELOCIDAD DE PARTÍCULA

Las técnicas acústicas avanzadas basadas en el parámetro acústico *velocidad de partícula* aparecen como una alternativa, y también como un complemento muy valioso, frente a los enfoques acústicos clásicos centrados únicamente en la presión. En la inspección de estructuras, el objetivo no es simplemente escuchar más fuerte, sino separar con la mayor claridad posible aquello que realmente está generando la radiación acústica local, ya sean microfugas, discontinuidades, vibraciones de panel o incluso fenómenos que quedan enmascarados por entornos reverberantes o por el propio ruido de fondo.

En ese escenario, los sistemas *Microflown* (técnicas de acústica avanzada) ofrecen una ventaja especialmente interesante, ya que permiten medir de forma simultánea la *presión acústica* (P) y la *velocidad de partícula* (U) en puntos prácticamente coincidentes. Gracias a ello, es posible calcular de manera directa magnitudes con un valor diagnóstico mucho mayor, como la intensidad sonora o la impedancia acústica, además de utilizar la propia velocidad de partícula como un indicador sólido y fiable para la localización de anomalías.

4.1 Fundamentos de la acústica aplicada a estructuras

Cuando una estructura metálica vibra, una parte de esa energía mecánica se transmite al aire y genera un campo acústico que puede aportar información muy valiosa sobre el estado del material. A partir de ese campo es posible detectar señales asociadas a pérdidas de espesor, pequeñas porosidades u otras alteraciones que, si pasan desapercibidas, pueden terminar comprometiendo la integridad de la estructura y, en consecuencia, el estado del casco del buque.

Por eso resulta tan importante comprender los fundamentos físicos del fenómeno sonoro: cómo se genera una onda, de qué manera se propaga a través de distintos medios y cómo interactúa con las estructuras metálicas. Solo desde esa base puede interpretarse con criterio cómo las variaciones en el material o en la geometría de la estructura modifican la respuesta acústica y cómo esos cambios pueden delatar la presencia de daños o zonas debilitadas. [21], [22]

4.1.1 Generación de una onda acústica

Una onda acústica es, en esencia, una perturbación mecánica que se propaga a través de un medio material ya sea aire, agua o un sólido, como consecuencia de variaciones de presión y de la vibración de sus partículas alrededor de su posición de equilibrio. En otras palabras, lo que se transmite no es la materia, sino la energía asociada a esa perturbación. En el contexto naval, este fenómeno tiene un interés especial, ya que el análisis de la propagación de las ondas y de su atenuación en distintas superficies metálicas puede ayudar a detectar alteraciones en el material, como grietas, porosidades o procesos de corrosión, que de otro modo podrían pasar desapercibidos. [21], [22], [23]

En las chapas de acero, esta energía acústica se desplaza en forma de ondas longitudinales, en las que el movimiento vibratorio de las partículas se produce en la misma dirección en la que avanza la propia onda. Como resultado, se generan ciclos alternos de compresión y rarefacción, que constituyen una de las características más representativas de este tipo de propagación. Este comportamiento puede observarse de forma esquemática en la Figura 4-1. [23], [24]

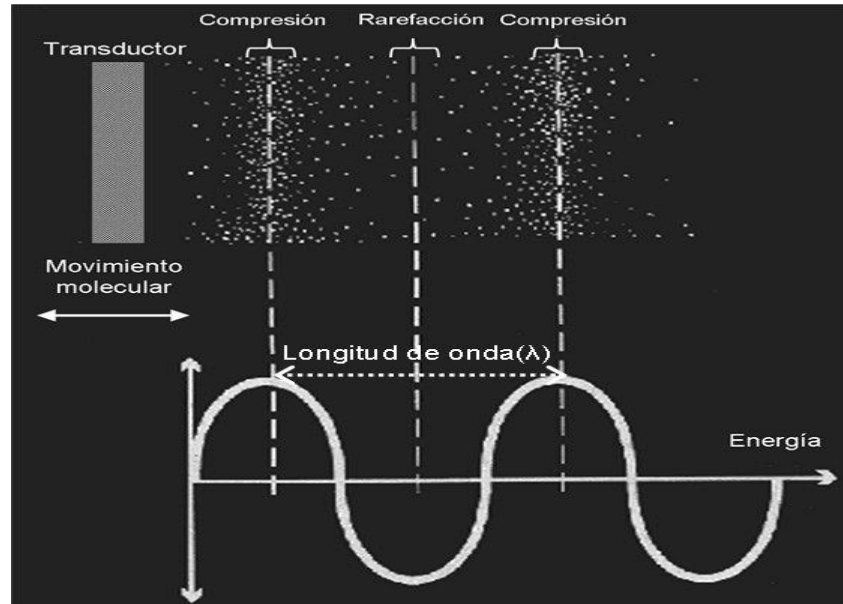


Figura 4-1 Generación onda acústica [18]

4.1.2 Características de la onda sonora

Podemos entender el sonido como un conjunto de alteraciones mecánicas que se propagan a través de medios elásticos, ya sean gaseosos, líquidos o sólidos. Su comportamiento físico y también la forma en que lo percibimos dependen de una serie de parámetros fundamentales, entre los que destacan la frecuencia, la longitud de onda, la amplitud, el timbre, la velocidad de propagación, la intensidad y la duración. En el ámbito de la ingeniería naval, el estudio de estas propiedades no es solo una base teórica, sino un punto de partida esencial para poder detectar con fiabilidad defectos críticos como la porosidad o la corrosión en los cascos de los buques.

La amplitud de una onda puede describirse como el valor máximo de oscilación que alcanza durante su propagación en un medio. Dicho de otro modo, representa el desplazamiento máximo de las partículas respecto a su posición de equilibrio. Cuanto mayor es esa amplitud, mayor suele ser la energía transportada por la onda y, en consecuencia, mayor tiende a ser también la intensidad sonora, entendida como la potencia acústica transmitida por unidad de área. En un medio lineal, además, la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, por lo que duplicar la amplitud implica cuadruplicar la intensidad. Para expresar de forma manejable el amplio rango de intensidades audibles se emplea la escala de decibelios (dB). [23], [25], [26]

En el oído humano, el umbral de audición se sitúa en torno a 0 dB, mientras que, a medida que el nivel sonoro aumenta, también lo hace el riesgo de daño auditivo. Cuando la exposición es elevada o prolongada, ese daño puede llegar a ser irreversible, especialmente a partir de valores cercanos a 120 dB. En la Figura 4-2 ver la representación gráfica de una onda sonora, donde la amplitud se representa como la distancia máxima desde la posición de equilibrio (línea central) hasta la cresta (punto más alto) o el valle (punto más bajo) de la propia onda.[25], [26]

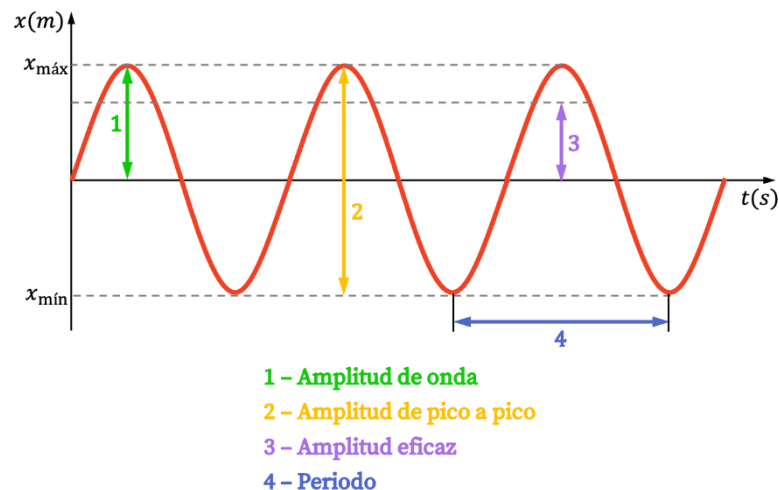


Figura 4-2 Amplitud de una onda sonora [21]

La frecuencia expresa cuántos ciclos completos realiza una onda en un segundo y se mide en hercios (Hz). En acústica, está ligada de forma directa a la sensación de tono: cuando la frecuencia aumenta, el sonido se percibe más agudo y cuando disminuye, se vuelve más grave. El oído humano, en condiciones normales, puede detectar aproximadamente desde 20 Hz hasta 20 kHz. Dentro de ese intervalo suelen distinguirse tres grandes bandas: las frecuencias bajas, por debajo de 500 Hz, asociadas a longitudes de onda más grandes y a una mayor capacidad para rodear obstáculos, las frecuencias medias, entre 500 Hz y 2 kHz, donde se concentra una parte importante de la información de la voz humana, y, por último, las frecuencias altas, por encima de 2 kHz, caracterizadas por longitudes de onda más cortas y una direccionalidad mayor. [24], [27]

La relación entre la frecuencia y la longitud de onda λ viene dada por la ecuación fundamental de ondas:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

Donde v es la velocidad de propagación de la onda en el medio, λ es la longitud de onda y f la frecuencia de la onda. Esta expresión nos muestra, que, para un medio determinado, con una mayor frecuencia tendremos una menor longitud de onda y viceversa.

En la Figura 4-3 se representa gráficamente esta relación: al incrementar f , disminuye λ .

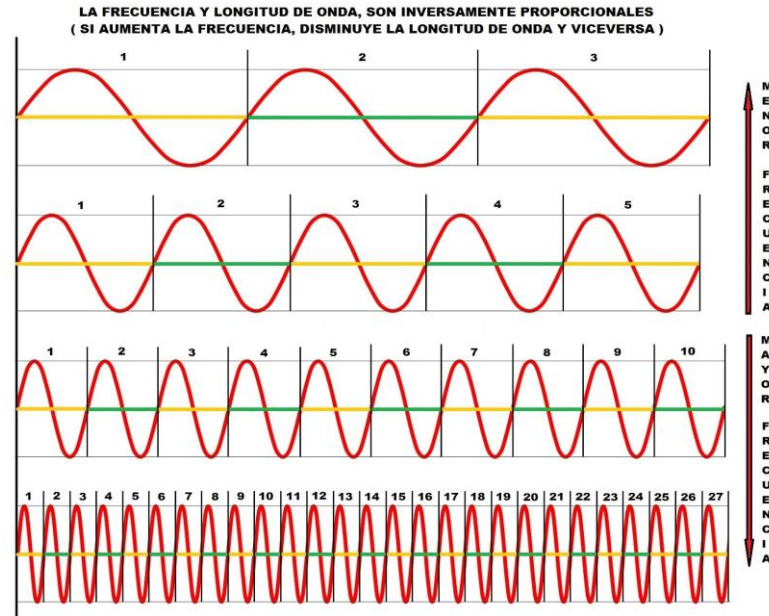


Figura 4-3 Relación entre frecuencia y longitud de onda [21]

La velocidad de propagación de una onda no es un valor fijo ni universal, depende de forma muy directa, de las propiedades del medio por el que esa onda viaja. En condiciones normales, con aire a 20 °C, el sonido se desplaza a unos 343 m/s. Sin embargo, cuando cambia el medio, la situación también cambia. En el agua la velocidad aumenta notablemente hasta situarse en torno a 1.440 m/s, y en materiales sólidos como el acero alcanza valores cercanos a 5.940 m/s. Esta diferencia no es un simple dato físico más, tiene una repercusión muy clara en la práctica, porque comprender cómo varía la propagación del sonido según el material resulta esencial para interpretar con mayor precisión los diagnósticos acústicos realizados sobre los cascos metálicos de los buques.

Estas variaciones en la velocidad del sonido se deben al equilibrio entre la resistencia elástica y la densidad del material por el que viaja la onda. La expresión matemática que lo respalda es la siguiente:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (4)$$

Donde (v) la velocidad, (B) es el módulo de elasticidad del medio en el que se propaga y (ρ) es la densidad.[22], [24]

En la práctica, es importante conocer esta velocidad de propagación, esto se consigue mediante tecnologías de detección acústicas avanzadas ya que el éxito en la localización de fallos en el material depende directamente de haber caracterizado con precisión cómo se desplaza la energía sonora por el material.

Para profundizar en el comportamiento de las ondas, es necesario considerar también estas tres propiedades:

- **Intensidad:** Esta propiedad viene ligada a la amplitud de la onda y es el parámetro que marca la diferencia entre una señal fuerte y potente o por el contrario una que apenas sea perceptible.
- **Tono:** Es la propiedad del sonido que define si es agudo o grave y su naturaleza está ligada a la frecuencia de la vibración, por lo tanto, cuando la frecuencia aumenta detectamos un tono más agudo y si la frecuencia disminuye detectamos un tono más grave.
- **Duración:** Es el intervalo temporal que transcurre desde que se genera la onda hasta que se apaga. Este parámetro es fundamental para el análisis ya que en el interior de los

compartimentos de los buques esta duración depende de las propiedades del material y de su capacidad de absorción o reflexión del sonido. [26]

4.1.3 Magnitudes fundamentales del sonido

Para analizar con rigor la acústica aplicada a los cascos metálicos de los buques, es necesario dominar tres conceptos físicos que rigen el comportamiento de las ondas. Estas son la potencia, la intensidad y la presión sonora que permiten describir de forma precisa cómo se desplaza la energía por el medio y de qué manera interactúa con la estructura del material.

La *potencia sonora* representa la tasa total de energía que es capaz de irradiar por unidad de tiempo y su unidad es el vatio (W). Se trata de una magnitud asociada a la fuente y para unas condiciones de funcionamiento específicas, no depende de la distancia al observador ni del recinto. Como se ve en la Figura 4-4, en un medio homogéneo, esta energía se expande hacia el exterior siguiendo un patrón de ondas esféricas que se distribuyen de manera uniforme. [26]

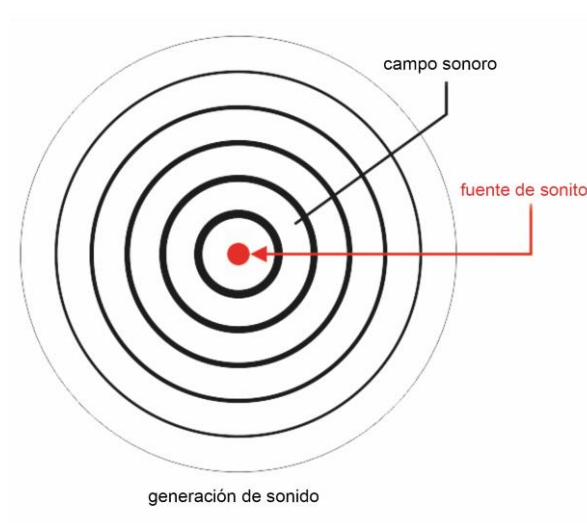


Figura 4-4 Propagación esférica del sonido desde una fuente puntual [25]

Otro de los conceptos sería la *intensidad sonora* la cual se define como la cantidad de energía acústica que fluye a través de una superficie siendo la misma perpendicular a la dirección de propagación de la onda. En términos físicos, la intensidad es la potencia acústica o sonora por unidad de área por lo que su unidad de medida es (W/m²). A diferencia de la potencia, la intensidad sí que depende del punto de medida ya que varía con la distancia, la directividad de la fuente y las condiciones del medio en el que se propague. Se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$I = \frac{W}{S} \quad (5)$$

Donde como ya sabemos (W) es la potencia y (S) la superficie por donde se propaga la onda. [25], [28] En el caso ideal de una fuente puntual isotrópica, la potencia viaja sobre una esfera de área $S=4\pi r^2$, por lo que la intensidad resultaría:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (6)$$

Lo que muestra que la intensidad disminuiría aproximadamente con $1/r^2$ al aumentar la distancia.

El tercer concepto se conoce como la *presión sonora*, la cual es la alteración o cambio que experimenta un punto específico de un medio al ser atravesado por una onda acústica. Básicamente, representa el diferencial de presión comparado con el estado de equilibrio o reposo atmosférico. Dicha

magnitud no es constante debido a que intervienen factores como las condiciones del entorno y la distancia a la fuente emisora, su unidad de medida es (N/m²).[28], [29]

Para comprender la interdependencia entre *potencia sonora*, *intensidad* y *presión sonora*, debemos analizar el comportamiento de una fuente en distintos entornos. Una fuente, por ejemplo, una sirena de alarma instalada en la cubierta de un buque emite una *potencia sonora* (W) propia para un modo de funcionamiento dado, entendida como el flujo total de energía acústica por unidad de tiempo. Sin embargo, esa presión no será la misma en según qué puntos ya que como hemos hablado antes, depende de la distancia, directividad y condiciones del entorno. En un entorno abierto completamente, esta dispersión se reparte uniformemente, pero en lugares cerrados como podría ser un hangar la reflexión en paredes y techo pueden generar un campo que haga que incremente la energía sonora media en el interior y por lo tanto elevando la presión en determinadas zonas. [25]

Esta interdependencia se rige por la *intensidad sonora*, que vincula la *potencia* con la superficie de avance de la onda, así, aunque el emisor mantenga su potencia, la intensidad cae a medida que el sonido se expande por el espacio. Este principio es vital al diseñar espacios confinados, donde la reflexión altera directamente nuestra percepción acústica.[25], [29]

El nivel de presión sonora se define como:

$$L_p = 20 \frac{p}{p_0} \quad (7)$$

donde L_p es el nivel de presión sonora (dB), p es la presión sonora eficaz (RMS) medida y p_0 es la presión de referencia.

Como muestra la Figura 4-5, estos valores nos permiten mapear desde sonidos leves hasta niveles de riesgo, incluyendo áreas específicas para el habla o la música.

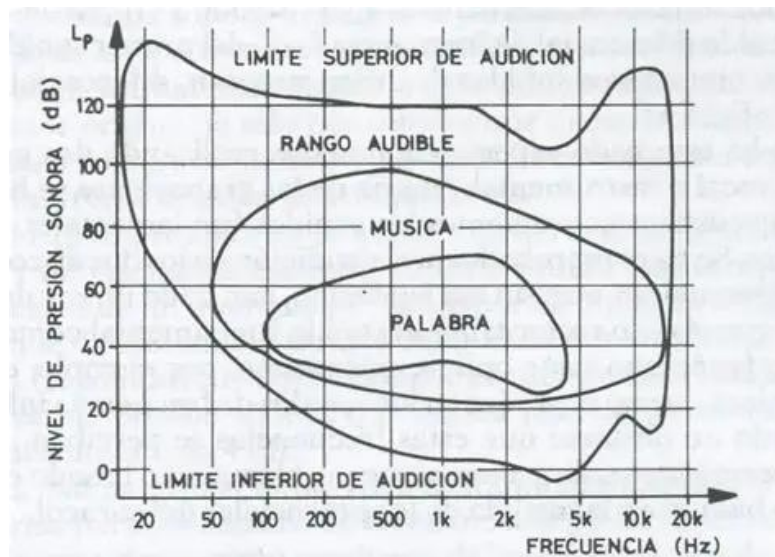


Figura 4-5 Rango de niveles sonoros percibidos por el ser humano [25]

Ahora bien, la percepción auditiva no es uniforme para todas las frecuencias. Esto se aprecia con claridad en las curvas isofónicas, que muestran qué combinaciones de frecuencia y *nivel de presión sonora* se perciben como igualmente intensas por un oyente medio. Estas curvas, recogidas en la norma ISO 226, ponen de manifiesto que, para percibir con la misma sonoridad un sonido muy grave o agudo, hace falta un nivel de presión sonora mayor que en la zona donde el oído es más sensible. En términos prácticos, esa sensibilidad máxima se sitúa aproximadamente entre 2 y 5 kHz, una franja especialmente relevante porque coincide con una parte importante del contenido de la voz humana. La unidad asociada a estas curvas es el *phon*. Por definición, el nivel en *phons* de un sonido coincide con el nivel en dB de

un tono puro de 1 kHz que se percibe con la misma sonoridad. Así, por ejemplo, un tono de 1 kHz a 20 dB SPL equivale a 20 *phons*, mientras que un tono de 100 Hz necesita un nivel bastante mayor para percibirse igual de fuerte. En la siguiente Figura 4-6 vemos representadas estas curvas isofónicas según la norma ISO 226:2023.

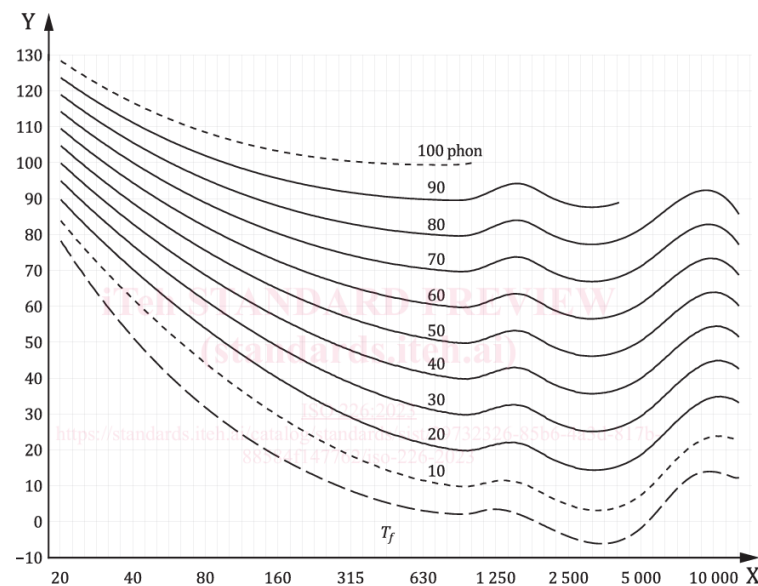


Figura 4-6 curvas isofónicas según la norma ISO 226:2023 [13]

Por otro lado, para obtener mediciones acústicas más alineadas con el oído humano, los sonómetros incorporan ponderaciones frecuenciales que son filtros normalizados que modifican la respuesta del instrumento según la frecuencia. Su objetivo es acercar la sensibilidad del oído proporcionar indicadores más representativos para la evaluación ambiental. Estas ponderaciones están definidas en estándares de instrumentación como IEC 61672 (y su adopción europea EN 61672), donde A es obligatoria y C y Z pueden estar disponibles según el equipo.

La ponderación A (dB(A)) es la más utilizada en la práctica y en normativa, ya que atenúa con fuerza las bajas frecuencias y, en menor medida, las muy altas, aproximando la respuesta del oído para niveles moderados y facilitando la evaluación de riesgos por exposición prolongada. Por ello, las guías y límites de exposición laboral y muchos criterios ambientales se expresan en dBA.

La ponderación C (dB(C)) es mucho más plana que la A, especialmente en bajas frecuencias, y se emplea con frecuencia para caracterizar sonidos de alto nivel y, en particular, niveles pico, ya que captura mejores contribuciones de baja frecuencia que pueden ser relevantes en impulsos o eventos intensos.

Finalmente, la ponderación Z (dB(Z)) representa una respuesta prácticamente plana en el rango audible y se utiliza cuando se desea analizar el contenido físico real del sonido (por ejemplo, análisis por bandas, impulsos de muy alto nivel o evaluación de bajas frecuencias sin el recorte que introduce la ponderación A).

En la Figura 4-7 se muestran las curvas de ponderación, observándose que cada una modifica de forma distinta la contribución de las frecuencias, lo que justifica su elección en función del tipo de ruido y del objetivo de la medición. Como cierre, el estudio conjunto de potencia, intensidad y presión sonora, junto con el uso de escalas logarítmicas y ponderaciones normalizadas, resulta esencial para describir la propagación del sonido y evaluar adecuadamente su impacto en entornos técnicos, incluidos los espacios confinados y condiciones operativas presentes en el ámbito naval.

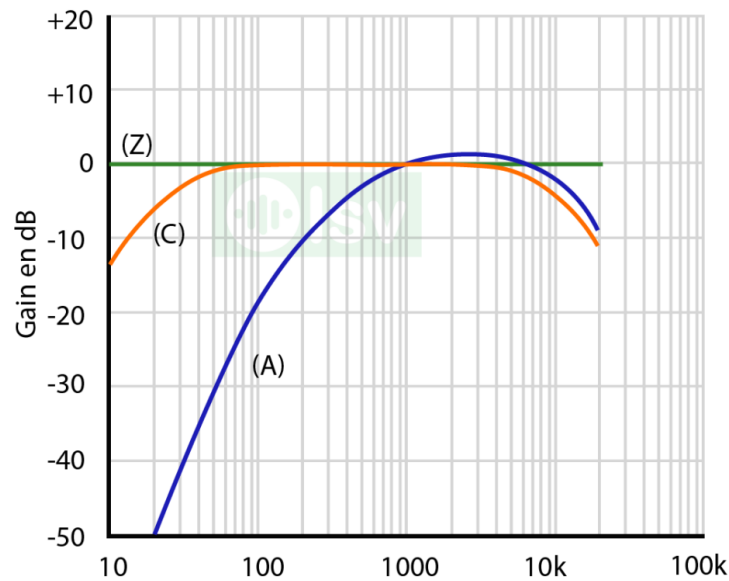


Figura 4-7 Curvas de ponderación [25]

4.1.4 Tipos de ruido

En un sistema de inspección no destructiva orientado a la detección de poros o cavidades en chapas navales, el ruido es un factor decisivo en la detección de estos. En términos de procesamiento de una señal, el ruido podría entenderse como una componente no deseada que se superpone a la respuesta útil del material reduciendo así la relación señal-ruido y pudiendo detectar falsos positivos o, por el contrario, no detectar nada realizando falsos negativos. Por ello, debemos identificar el tipo de ruido que utilizamos con la finalidad de justificar técnicamente las decisiones de adquisición y de procesamiento. La selección adecuada del tipo de ruido nos permite optimizar los parámetros de medición, mejorando así la sensibilidad, la precisión y la fiabilidad en la detección de anomalías en las estructuras.

Los principales tipos de ruido son:

- *Ruido rosa (Pink noise)*: Este tipo de ruido contiene muchas frecuencias, pero su intensidad disminuye al aumentar la frecuencia. La forma habitual de expresarlo es que cae alrededor de 3dB por octava. Esto significa que las frecuencias más bajas tienen mayor intensidad que las altas, produciendo un sonido más equilibrado y natural. En la siguiente Figura 4-8 podemos ver representado el ruido rosa en la que podemos ver como efectivamente su intensidad disminuye al aumentar la frecuencia.

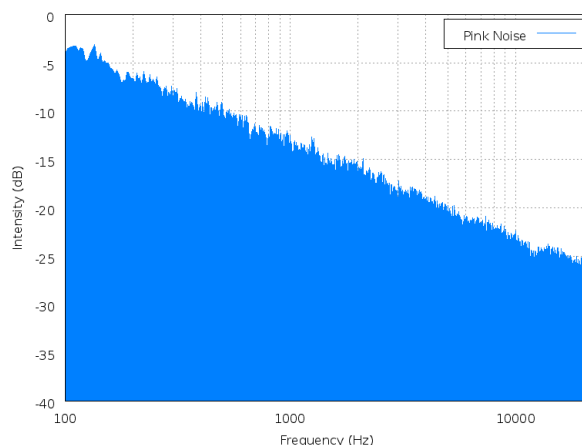


Figura 4-8 Espectro de frecuencia del ruido rosa [27]

- *Ruido blanco (White noise)*: Se trata de una señal aleatoria en la que, al analizarla por frecuencias, todas cuentan con la misma potencia, es decir, todas tienen o generan la misma cantidad de ruido. Por eso se dice que su espectro es plano. Este tipo de ruido se utiliza comúnmente para enmascarar otros sonidos debido a su capacidad para cubrir un amplio espectro de frecuencias. En nuestro estudio, inicialmente este tipo de ruido nos perjudicaría ya que baja la relación señal-ruido lo que dificulta la detección de poros o cavidades. En la siguiente Figura 4-9 podemos ver representado el ruido blanco donde vemos que efectivamente durante todo el rango de frecuencias genera la misma intensidad (dB).

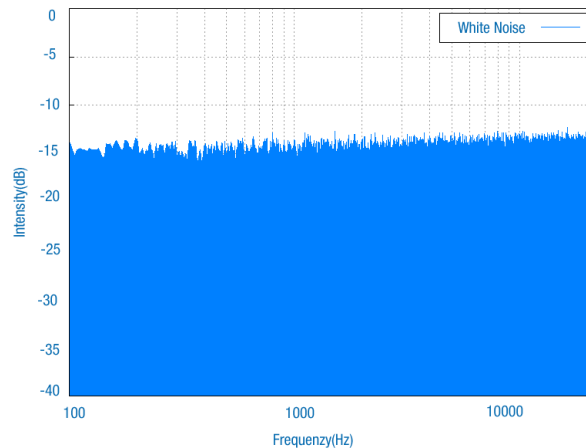


Figura 4-9 Espectro de frecuencia del ruido blanco [27]

- *Ruido marrón*: el ruido marrón (o browniano/rojo) es un ruido cuya energía está aún más concentrada en bajas frecuencias que el rosa. Se caracteriza típicamente porque su densidad espectral es inversamente proporcional a f^2 ($\approx 1/f^2$) y cae alrededor de 6 dB por octava. En la siguiente Figura 4-10 vemos el espectro en frecuencia del ruido marrón donde al igual que en el ruido rosa, la intensidad disminuye a medida que la frecuencia aumenta.

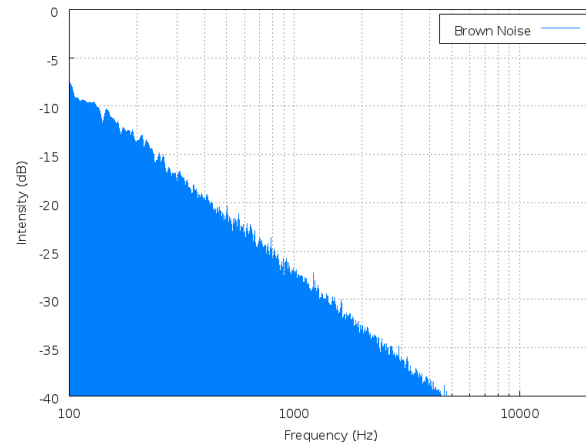


Figura 4-10 Espectro de frecuencia del ruido marrón [27]

En este trabajo se eligió ruido rosa porque proporciona una excitación más equilibrada de la chapa. El ruido blanco da demasiado peso a las frecuencias altas, mientras que el ruido marrón concentra más energía en las bajas frecuencias. En nuestro caso, usar ruido marrón habría favorecido más la respuesta global del cajón de ensayos, en lugar de ayudar a distinguir mejor el efecto local del orificio. Por eso, el ruido rosa se consideró la opción más adecuada para obtener una respuesta más útil y fácil de interpretar.

4.2 Velocidad de partícula acústica como parámetro diagnóstico

Es el parámetro fundamental en el que se basa el presente trabajo y la gran novedad introducida por el equipo de Acústica Avanzada en el ámbito de medidas sonoras. Conceptualmente, es la velocidad local que adquiere un fluido debido el movimiento (desplazamiento) de una superficie con la que está en contacto. La magnitud detectada será proporcional al desplazamiento de la fuente excitante y se considerará positiva o negativa dependiendo de la dirección del movimiento del flujo.

La medición de la *velocidad de partícula* (adquirir su valor) se puede realizar de dos maneras distintas: de manera directa, usando el software *Scan&Paint* (que es capaz de medir todo el espectro audible de manera precisa), o de manera indirecta (calculando el gradiente de presión entre dos micrófonos en una parte reducida del espectro).

Aunque la *velocidad de partícula* sea una magnitud cuyas unidades naturales se reflejan en m/s, sus valores de cuantificación tras la medición se aportan en dB.

Las partículas sobre las que incide por una onda sonora se desplazan de su posición inicial. Durante este movimiento se desplazan a una velocidad conocida como velocidad de partícula, que puede ser positiva o negativa dependiendo de la dirección del desplazamiento, y que es posible representar mediante la expresión mostrada a continuación; la cual permite definir la *velocidad de partícula* como la derivada temporal del desplazamiento $\xi(t)$ de una partícula del medio bajo la acción de una onda acústica:

$$u(t) = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (8)$$

Donde $\partial \xi$ representa el desplazamiento de la partícula y $\partial \xi / (\partial t)$ es su variación en el tiempo. Esta definición es estándar en teoría de ondas (en fluidos y también en medios elásticos, donde “desplazamiento” y “*velocidad de partícula*” se usan igual como variables básicas). [22]

Dentro de un campo sonoro, la *velocidad de partícula* se relaciona con la presión acústica ($p(t)$). Esto lo expresamos mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = -\frac{1}{\rho} \int_0^t \frac{\partial p(t)}{\partial n} dt \quad (9)$$

Donde ρ es la densidad del medio y $\partial p / \partial n$ es el gradiente de presión en la dirección normal al desplazamiento. [22]

Existen varios métodos para medir la *velocidad de partícula* en acústica, siendo dos de los más empleados en la práctica la medida directa mediante sensores de velocidad como *Microflow*, inventado en 1994 en la universidad de Twente siendo capaz de medir la velocidad de partícula sin necesidad de reconstruirla a partir de la presión y el segundo método es la estimación indirecta a partir del gradiente de presión usando dos micrófonos separados una distancia pequeña donde la diferencia de presión entre ambos puntos se utiliza para aproximar el gradiente espacial y, con ello, inferir la componente de velocidad de partícula en la dirección de medida. [30], [31]

En aplicaciones de diagnóstico estructural y detección de defectos en cascos metálicos (fisuras, poros o variaciones de espesor), la *velocidad de partícula* aporta información especialmente útil porque describe el movimiento local del medio y es una magnitud vectorial, a diferencia de la presión acústica, que es escalar. Esto permite no solo cuantificar cuánto sonido existe, sino también analizar cómo se mueve el campo acústico cerca de superficies, lo cual resulta valioso cuando hay reflexiones y campos complejos. Además, cuando combinamos presión y velocidad podemos estimar la intensidad acústica, la cual está directamente relacionada con el flujo de la energía sonora y con la dirección de este. Esto nos ayuda a mejorar la interpretación y, sobre todo, a detectar esas posibles anomalías mediante un análisis basado únicamente en la presión. [30], [32]

En pruebas realizadas para la localización de fugas o zonas de baja estanqueidad se ha podido observar cómo los mapas de velocidad de partícula pueden llegar a presentar un mayor rango dinámico con respecto a los mapas de presión, lo que nos permite la localización de zonas con defectos tan pequeños que pudieran ser enmascarados por el ruido de fondo.

Por estas razones, en este trabajo se prioriza el uso de mapas de velocidad de partícula ya que tienden a ofrecernos una representación más clara y precisa de la propagación del sonido y de los defectos estructurales.

4.3 Tecnología *Scan & Paint*

La tecnología *Scan & Paint* (de la empresa *Microflow*) es un método de medición por barrido que permite pintar sobre una imagen real (capturada con cámara) la distribución espacial de distintas magnitudes acústicas medidas cerca de una superficie. El sistema combina una sonda (típicamente una PU, que mide *presión sonora* (P) y *velocidad de partícula* (U) muy próximas entre sí) con una unidad de adquisición (Frontend) y una cámara. Durante el barrido manual, lo que hace el sistema es rastrear la posición de la sonda en el video mediante marcadores de colores y vincula cada segmento temporal de la señal a la posición correspondiente, generando mapas que se superponen sobre la fotografía del objeto ensayado. [32]

De forma general, *Scan & Paint* se usa como una solución rápida y de banda ancha, pensada para trabajar incluso en entornos reales de operación, y permite visualizar y analizar *velocidad de partícula*, *presión e intensidad sonora*, además de funciones de transferencia entre canales y aplicaciones específicas como *Transmission Loss* (pérdida por transmisión). Además, en cuanto al procesado, el software ofrece distintos enfoques de análisis espacial como el *método por puntos* (*Point method*) y el *método por malla* (*Grid method*) que posteriormente serán explicados.

Por último, debemos saber que el sistema puede integrar sensores de referencia además de la sonda principal como micrófonos o acelerómetros y también permite configurar una salida analógica para excitar un altavoz o actuador. Desde el generador de señal pueden seleccionarse excitaciones como ruido blanco, ruido rosa y ondas seno. [32], [33]

4.3.1 Componentes del sistema

A continuación, se describen, uno por uno, los elementos que componen el equipo *Scan & Paint*, su función dentro del sistema y cómo se conectan y usan de forma general:

- Sonda principal: Sensor P-U:

La sonda PU es el sensor principal del sistema. Está formada por dos sensores integrados, un sensor de *presión acústica* (P) y otro sensor de *velocidad de partícula* (U) separados pocos milímetros, de manera que ambas magnitudes se miden prácticamente en el mismo punto. El sensor de *velocidad de partícula* está compuesto por dos filamentos de platino separados con una distancia mínima los cuales se calientan hasta una temperatura de unos 300° C. Cuando una onda acústica llega perpendicularmente, el movimiento del aire asociado al sonido altera de inmediato la distribución de calor: uno de los filamentos se enfría más que el otro debido al flujo de partículas, generando una diferencia de temperatura entre ambos. Esa diferencia es la que se utiliza para obtener una señal proporcional a la velocidad de partícula. [30], [32]

En la Figura 4-11 podemos ver de izquierda a derecha, primero el sensor completo seguido de su interior y por último los dos filamentos de platino mencionados anteriormente.

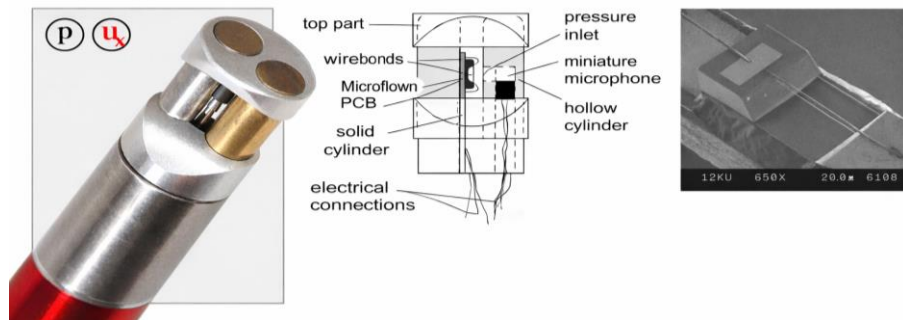


Figura 4-11 Sonda Microflow, estructura interna y filamentos de platino [31]

En la práctica, se debe utilizar dicho barriendo la zona próxima al material entre 5-10 cm ya que aumenta el error en caso de que se realice demasiado cerca. Además, este barrido debe realizarse a una velocidad de entre 5-10 cm/s para optimizar la detección de posibles alteraciones. Ir a una velocidad menor implicaría más tiempo en cada zona y, por lo tanto, valores más estables estadísticamente favoreciendo así el estudio con frecuencias bajas. [31]

En la Figura 4-12 se presenta un ejemplo de resultado obtenido con una sonda P-U en un ensayo acústico. En la representación en rojo podemos ver la velocidad de partícula registrada por el sensor específico de la sonda y, en azul, la presión sonora medida con el micrófono integrado. Ambas magnitudes de forma permiten describir con mayor detalle el campo acústico, facilitando el estudio de cómo se propaga el sonido y facilitando la localización de zonas con posibles anomalías que podrían estar asociadas a irregularidades del material o de la estructura evaluada.

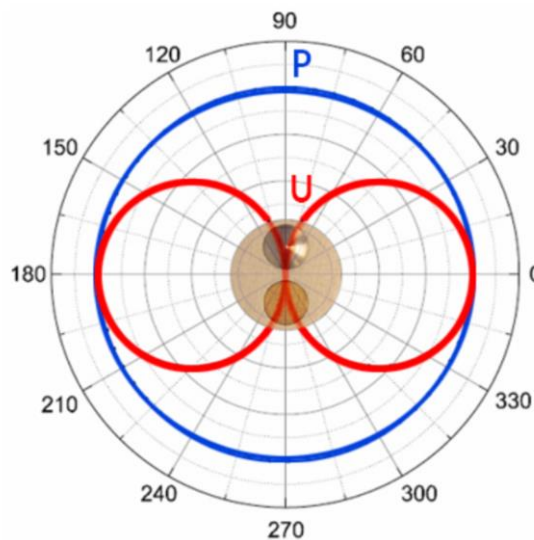


Figura 4-12 Diagrama polar de los sensores de velocidad de partícula [30]

- *Acondicionador de señal: MFPA-2*

El MFPA-2 (*conditioner*) se coloca entre la sonda y el frontend. Su función es recibir la señal del sensor, garantizar el acondicionamiento necesario para que sea medible con precisión y entregarla ya preparada a la unidad de adquisición. Contribuye a aumentar la relación señal-ruido, logrando mediciones acústicas más claras y fiables incluso cuando las condiciones de propagación del sonido varían entre distintos entornos. [34]



Figura 4-13 Acondicionador de señal MFPA-2 [34]

- *Frontend (unidad de adquisición): Scout V2*

La unidad de adquisición (frontend) del sistema (Scout V2) es el módulo que recibe las señales analógicas procedentes del acondicionador (P y U), las digitaliza y las envía al ordenador para que el software las registre y procese. En el montaje estándar, las salidas del MFPA se conectan a las entradas del Scout mediante dos cables BNC, asignando típicamente la presión al canal 0 y la velocidad al canal 1, y posteriormente el Scout se enlaza con el PC mediante un cable USB. Además, la alimentación del Scout solo es imprescindible si se van a utilizar sus salidas amplificadas, mientras que el MFPA sí debe alimentarse y encenderse para el funcionamiento del sistema.[34]



Figura 4-14 Frontend Scout V2 [34]

- *Cámara de Video (WebCam Pro 9000)*

La cámara *WebCam Pro 9000* se emplea para registrar el vídeo del ensayo y permitir que el software asigne una posición espacial a cada segmento temporal de señal durante el barrido. En la configuración de “*Image input*” se ajustan parámetros que influyen directamente en la calidad y en el rendimiento del sistema: la resolución (número de píxeles), el *binning* (agrupación de píxeles para reducir datos y facilitar el análisis) y el *frame rate* (fotogramas por segundo). [32]



Figura 4-15 WebCam Pro 9000. (Elaboración propia).

4.3.2 Generación de mapas acústicos

La generación de mapas acústicos con *Scan & Paint* parte de la idea de registrar simultáneamente la señal acústica medida por la sonda P-U y un vídeo de la escena, de forma que el software pueda asociar cada instante de la señal con una posición espacial de la sonda y, finalmente, representar los resultados como un mapa superpuesto sobre la imagen de la superficie inspeccionada. [32]

Para obtener mapas acústicos con *Scan & Paint*, lo primero es preparar el montaje de forma que el seguimiento en vídeo sea fiable. La cámara debe colocarse estable y orientada hacia la zona a medir, procurando una geometría que reduzca distorsiones en la proyección del mapa sobre la imagen. En la configuración del vídeo se recomienda trabajar con una cadencia moderada (alrededor de 5 fps) para equilibrar calidad y rendimiento del ordenador.

A continuación, se realiza la captura de la medición barriendo la superficie con la sonda P-U. Para que el resultado sea consistente, conviene mantener una velocidad de exploración lo más constante posible, el fabricante sugiere un rango típico de 5–10 cm/s, ya que barrer más lento aumenta el tiempo útil por zona y mejora la estabilidad del resultado, especialmente a bajas frecuencias. La distancia sonda-superficie también influye, se recomienda aproximadamente entre 1–5 cm si el objetivo es localizar zonas emisoras con máxima SNR y 5–10 cm cuando se pretende trabajar con intensidad sonora reduciendo errores propios del campo cercano. [32]

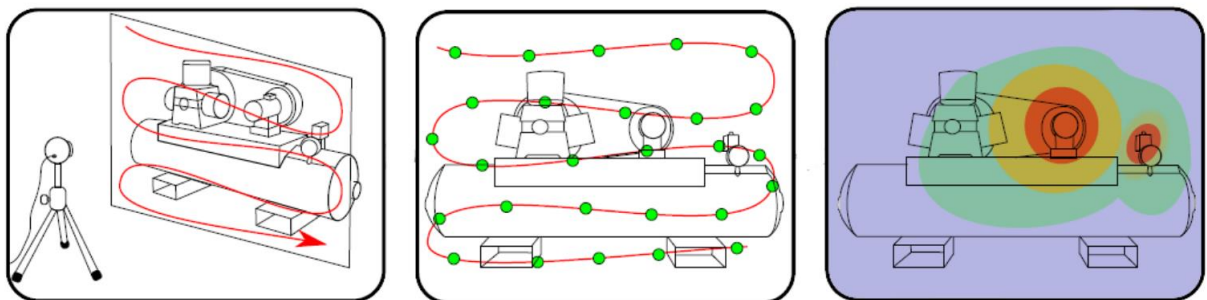


Figura 4-16 Método de medición [32]

Tras realizar la grabación, los datos obtenidos pueden dividirse en diferentes regiones mediante un procedimiento de discretización basado en una cuadrícula espacial. Esta técnica permite vincular cada fragmento de la señal medida con una celda concreta de la malla, según la posición que ocupa la sonda

en cada instante del barrido. Así, la información queda estructurada de forma ordenada sobre la superficie analizada, lo que facilita tanto su tratamiento posterior como su representación gráfica. [33]

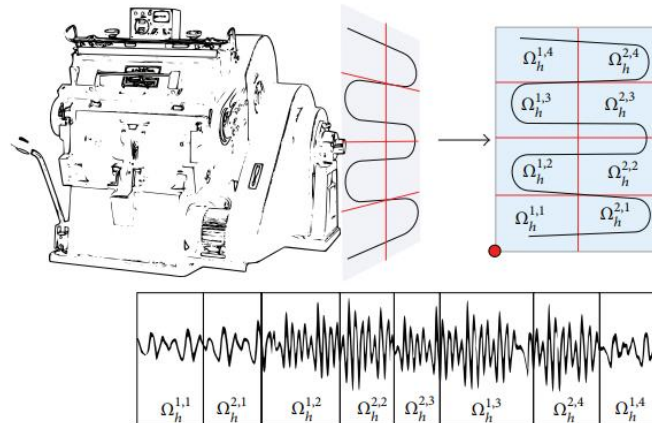


Figura 4-17 Proceso de discretización espacial [33]

Para procesar la información registrada durante la medición y obtener una representación gráfica del campo acústico, es necesario establecer un criterio de discretización de los datos adquiridos. En este contexto, pueden distinguirse dos procedimientos principales. Por un lado, el método de cuadrícula, basado en la división de la superficie de análisis en un conjunto de celdas, de manera que los datos queden organizados espacialmente de forma regular. Por otro, el método por puntos, en el que la asignación de la información se realiza a partir de la trayectoria real seguida por la sonda a lo largo del barrido. Esta diferenciación permite adaptar el tratamiento de los datos al tipo de medición y a la geometría de la superficie inspeccionada. [33]

Método de cuadrícula plana: Para obtener una representación homogénea del campo acústico, este procedimiento divide la superficie de estudio en una malla formada por celdas de dimensiones regulares. De este modo, los datos registrados durante el barrido pueden asignarse espacialmente de forma ordenada, facilitando su posterior tratamiento y visualización. La localización de la sonda se obtiene a partir del seguimiento automático realizado sobre los fotogramas del vídeo capturado durante la medición, de manera que cada valor medido puede relacionarse con una posición concreta dentro de la superficie analizada. [33], [35]

No obstante, al tratarse de un sistema basado en imágenes bidimensionales, la precisión en la determinación de la posición puede verse afectada por la perspectiva de la cámara y por variaciones en la distancia entre la sonda y la superficie. Por ello, para reducir errores de seguimiento y mejorar la fiabilidad de los mapas obtenidos, resulta conveniente situar la cámara de forma perpendicular al área de medida y mantener una separación lo más constante posible durante el proceso de adquisición. Esta disposición contribuye a minimizar distorsiones geométricas y favorece una interpretación más precisa de los resultados.

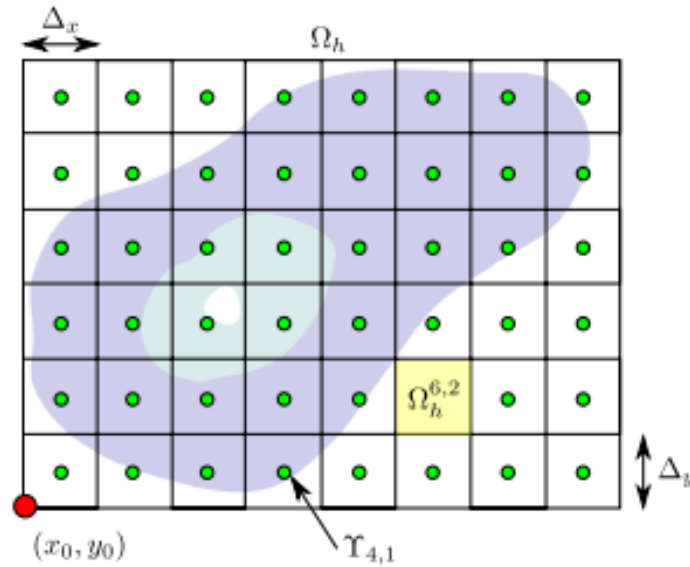


Figura 4-18 División de la superficie en celdas para el análisis acústico [32]

La discretización del dominio espacial, junto con la parametrización temporal del barrido, permite dividir la superficie de medida en un conjunto de celdas o bloques $\Omega_h^{(m,n)}$, definidos por unas dimensiones Δ_x y Δ_y . Cada una de estas celdas queda referenciada respecto a un origen (x_0, y_0) y a su posición dentro de la malla mediante los índices de fila y columna (m, n) . Una vez establecida esta cuadrícula, los datos acústicos adquiridos durante la medición pueden asociarse a la zona concreta en la que fueron registrados. Para ello, la trayectoria de la sonda se divide en segmentos y cada uno de ellos se asigna a la celda correspondiente, lo que permite estructurar la información espacialmente y facilitar su tratamiento posterior. Cuando una misma celda recibe varias mediciones, estas pueden combinarse para obtener un valor representativo, reduciendo así la influencia de fluctuaciones locales y mejorando la estabilidad del mapa resultante. Este procedimiento se apoya en el empleo de una sonda PU, capaz de registrar simultáneamente presión sonora y velocidad de partícula, de modo que el software puede relacionar directamente las magnitudes acústicas medidas con su posición sobre la superficie analizada y determinar qué regiones disponen de información suficiente para su representación y cuáles requieren interpolación.

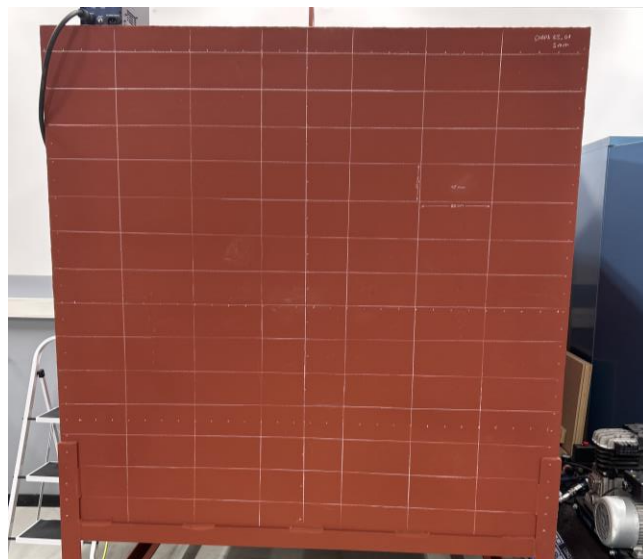


Figura 4-19 Aplicación del método de cuadrícula en Scan & Paint con celdas de 20 cm. (Elaboración propia).

Método por puntos: El método por puntos constituye una alternativa al procedimiento de discretización en cuadrícula empleado en *Scan & Paint*. En lugar de dividir la superficie de medida en una malla regular, este enfoque organiza la información siguiendo directamente la trayectoria recorrida por la sonda durante el barrido. De este modo, cada muestra registrada queda vinculada a una posición concreta del recorrido y a su correspondiente instante de adquisición. A diferencia del método de cuadrícula, basado en una partición bidimensional del espacio en celdas homogéneas, el método por puntos se apoya en una representación asociada al trazado real del sensor, lo que permite conservar con mayor fidelidad el camino seguido durante la medición. [33], [35]

Esta estrategia ofrece una mayor flexibilidad cuando la superficie analizada presenta geometrías irregulares o cuando no puede garantizarse una correspondencia geométrica exacta entre la imagen capturada y la configuración real del objeto ensayado. En este tipo de situaciones, el método por puntos resulta especialmente útil, ya que evita imponer una malla plana sobre superficies que pueden presentar curvaturas, discontinuidades o zonas de difícil acceso. En aplicaciones como la inspección de chapas navales, soldaduras o áreas con corrosión localizada, este procedimiento permite adaptar mejor la adquisición al recorrido de interés y facilita una interpretación más detallada de los resultados obtenidos. Por esta razón, en el presente TFG los ensayos se desarrollan empleando este método.

4.4 Ventajas frente a técnicas acústicas tradicionales

Ventaja	Descripción
Mapeo espacial continuo	Permite construir un mapa del campo acústico a partir de un barrido, mostrando cómo varía la respuesta a lo largo de toda la superficie.
Menos tiempo de ensayo para cubrir áreas grandes	La superficie se recorre una vez con la sonda y se generan resultados sobre la marcha, evitando la recolocación repetitiva típica de mediciones punto a punto.
Lectura más directa gracias a la superposición sobre imagen	El resultado se representa sobre una imagen real de la zona inspeccionada, lo que facilita ubicar defectos, bordes, soldaduras o zonas críticas.
Mejor contraste cerca de la superficie usando velocidad de partícula	La medida de velocidad de partícula en proximidad suele destacar mejores cambios locales (fugas, discontinuidades, variaciones de transmisión) que una medición basada únicamente en presión en entornos con reflexiones.
Adaptable a geometrías irregulares	Permite seguir líneas concretas sin imponer una malla rígida, lo cual es útil cuando la superficie no es plana o no es accesible por completo.
Análisis selectivo por bandas de frecuencia	Posibilita centrar el mapa en la banda donde el fenómeno es más visible, evitando conclusiones basadas solo en niveles globales.
Verificación durante la adquisición	La visualización en tiempo real ayuda a detectar problemas típicos como saturaciones, golpes, mala configuración o seguimiento deficiente, reduciendo repeticiones de ensayo y errores sistemáticos.
Integración sencilla de referencias	Se pueden registrar señales auxiliares para comparar condiciones y reforzar la interpretación del mapa.
Equipo compacto y despliegue simple	Frente a soluciones basadas en arrays grandes o montajes complejos multicanal, el sistema resulta más transportable y rápido de preparar en campo.
Resultados más fáciles de documentar y reproducir	Al quedar registrados vídeo, señales y parámetros de procesado en el proyecto, es más sencillo repetir ensayos en condiciones similares y justificar el resultado en informes.

Tabla 3 Ventajas del software Scan & Paint. [35]

La Figura 4-20 ilustra que *Scan & Paint* ofrece una mejora clara en la eficiencia costo-tiempo frente a los enfoques clásicos de medición acústica. Al acortar de forma notable tanto la preparación del montaje como la toma de datos, y sin requerir instrumentación especialmente costosa, se convierte en una solución práctica y adaptable para análisis de ruido y vibraciones en ámbitos industriales, de automoción y navales. Esta ventaja resulta especialmente útil en tareas como la inspección de cascos, el mantenimiento predictivo o la detección de fugas acústicas en geometrías complejas. En conjunto, el método destaca por su alto rendimiento global, al lograr un buen compromiso entre tiempo de medida, complejidad de configuración y coste del sistema.

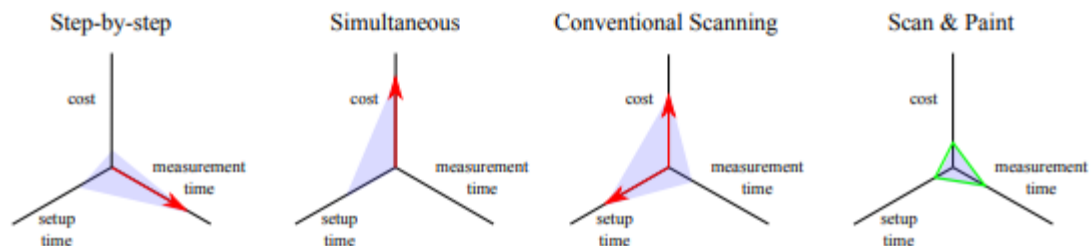


Figura 4-20 técnicas acústicas tradicionales frente a Scan & Paint [35]

4.5 Aplicaciones previas en el sector industrial y naval

El sistema *Scan & Paint* ha demostrado su utilidad en aplicaciones reales de diagnóstico acústico tanto en el sector naval como en distintos ámbitos industriales, especialmente cuando se requiere localizar fuentes sonoras en entornos complejos, con geometrías difíciles o con elevada reverberación. En el ámbito naval, *Microflown* publicó un caso de estudio centrado en la localización de ruido en la sala de máquinas de una embarcación, en el que se analizó la radiación acústica de un motor mediante mapas de *presión sonora* y *velocidad de partícula*.

El estudio mostró que esta técnica permite identificar las zonas de mayor excitación acústica del motor y comparar su comportamiento en diferentes condiciones de funcionamiento, como en puerto y en navegación, lo que refuerza su interés como herramienta de diagnóstico y mantenimiento predictivo en maquinaria naval. [35]

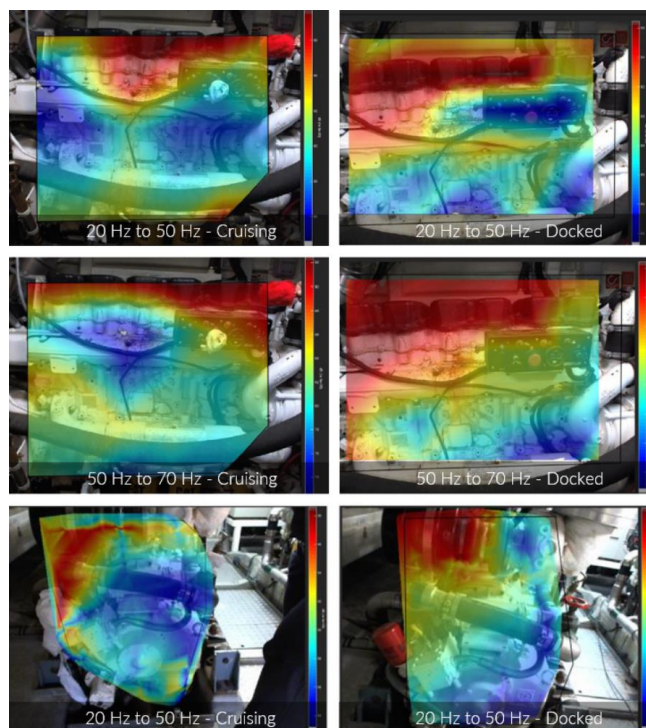


Figura 4-21 Localización de fuentes acústicas en la sala de máquinas de un buque mediante *Scan & Paint 2D*. [33]

En el sector industrial, uno de los ejemplos más representativos corresponde al estudio de un gran compresor de gas y de las tuberías asociadas, realizado por *Microflown* en un entorno fuertemente reverberante y con niveles de ruido ambiente muy elevados. En este trabajo, el objetivo fue localizar la fuente dominante responsable de niveles anómalos de ruido dentro de la planta. Para ello se utilizó *Scan & Paint 2D*, lo que permitió jerarquizar las contribuciones acústicas de los distintos elementos de la instalación y orientar las actuaciones correctivas hacia la zona más crítica. [36]

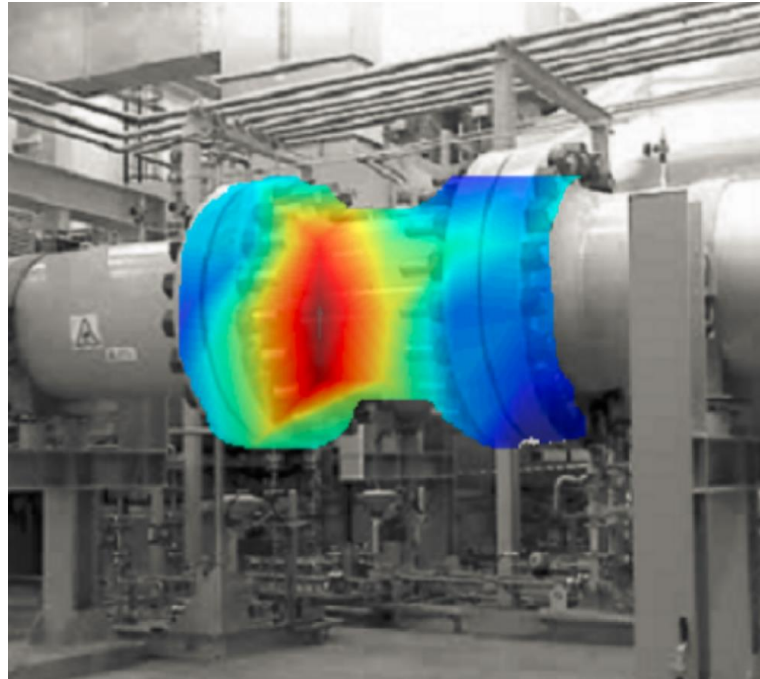


Figura 4-22 Mapeo acústico de un gran compresor de gas en entorno industrial mediante *Scan & Paint 2D*. [36]

En el sector automotriz, *Microflow* ha documentado la utilización de *Scan & Paint* para el estudio de fugas acústicas en el habitáculo de un automóvil. En un trabajo publicado en su web, la técnica se aplicó al análisis del interior de un *Toyota Avensis*, registrando la velocidad de partícula y sincronizando las medidas acústicas con vídeo durante el barrido de diferentes superficies interiores. El método permitió obtener mapas acústicos del habitáculo y localizar zonas débiles de aislamiento asociadas a la transmisión de ruido hacia el interior del vehículo. [37]

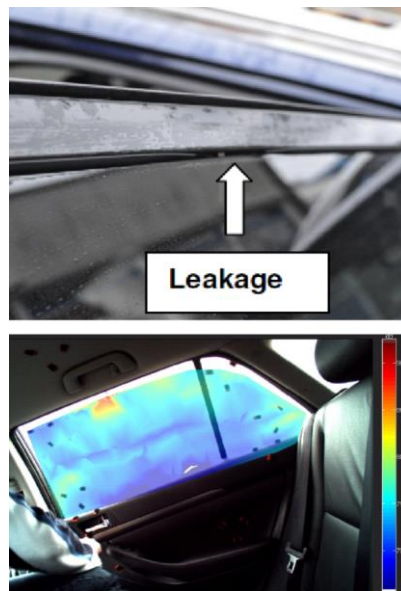


Figura 4-23 Detección de fugas acústicas en el interior de un vehículo mediante *Scan & Paint* [37].

5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DESARROLLO DEL MÉTODO HÍBRIDO

5.1 Planteamiento del método híbrido UT – Técnicas de Acústica Avanzada

El método híbrido planteado en este trabajo se basa en la aplicación combinada de dos técnicas de inspección sobre una misma chapa metálica simulando el casco de un buque para el estudio de poros sobre la misma. Por un lado, la *Técnica de Acústica Avanzada (Scan & Paint)*, y por otro, la inspección por ultrasonidos. El objetivo de esta estrategia es evaluar la capacidad de ambas metodologías para detectar y caracterizar agujeros de diferentes tamaños practicados en una chapa de acero, así como complementar la información obtenida por cada una de ellas. En el caso de *Scan & Paint*, el sistema permite generar mapas de color de la respuesta acústica sobre la superficie medida, superpuestos a la imagen real del objeto ensayado, lo que facilita la localización espacial de anomalías y la interpretación visual de los resultados.

La metodología experimental parte de una chapa de acero sobre la que se practican agujeros de distintos diámetros, de forma que cada defecto constituye una condición de ensayo controlada. En una primera fase, se aplica *Scan & Paint* para obtener mapas acústicos de la superficie mediante un barrido de la sonda sobre la chapa mientras se registra la respuesta del campo sonoro. Esta etapa permite observar si la presencia de cada agujero altera la distribución de la presión sonora o de la *velocidad de partícula*, generando patrones espaciales identificables. En una segunda fase, la misma muestra se evalúa mediante ultrasonidos, con el fin de comprobar y contrastar los resultados obtenidos en la primera etapa.

La combinación de ambas técnicas permite obtener una información más completa sobre el estado de la chapa. Por un lado, *Scan & Paint* ofrece una visión general y continua de la respuesta acústica en toda la superficie, lo que facilita localizar zonas donde puede existir alguna anomalía. Por otro lado, la técnica de ultrasonidos permite comprobar de forma más concreta la presencia del defecto en la zona analizada. Por ello, el interés del método híbrido no está solo en aplicar dos técnicas diferentes, sino en comparar los resultados de ambas sobre una misma muestra y ver si existe relación entre los mapas acústicos obtenidos con *Scan & Paint* y la respuesta registrada mediante ultrasonidos. De esta forma, puede evaluarse si la acústica avanzada resulta útil como método de detección inicial y si los ultrasonidos permiten confirmar los resultados observados, mejorando así la fiabilidad del análisis en chapas metálicas con poros localizados.

5.2 Descripción de las chapas ensayadas y poros artificiales

La fase experimental del trabajo se realizó sobre una chapa de acero montada en un cajón metálico de ensayo, utilizada como modelo simplificado de una zona del casco de un buque. El cajón empleado está formado por una placa de gran tamaño, de aproximadamente $1,5 \times 1,5$ m y 3 mm de espesor, unida

a una cavidad interior y reforzada en su cara posterior mediante dos rigidizadores colocados en cruz. Esta disposición permite reproducir en laboratorio, de forma controlada, parte del comportamiento estructural y acústico que puede darse en paneles metálicos navales. No obstante, esta chapa no debe entenderse como una reproducción exacta de una chapa real de casco, ya que el material, el espesor, las uniones y las condiciones de montaje no son exactamente los mismos que los de un buque real.

La chapa ensayada se utilizó como superficie principal de medida en los ensayos realizados con *Scan & Paint* y con ultrasonidos, de manera que ambas técnicas se aplicaron sobre la misma muestra y en condiciones similares. Sobre esta chapa se practicaron defectos artificiales en forma de orificios de distintos diámetros, con el objetivo de trabajar con anomalías conocidas y fáciles de comparar entre sí. El uso de estos poros controlados resulta útil en esta fase del trabajo, ya que permite comparar de forma ordenada distintas situaciones, como el orificio abierto, el orificio tapado y la chapa sin alteración, y observar así cómo cambia la respuesta del sistema ante dichos poros localizados.

Desde el punto de vista experimental, este cajón de ensayos no solo incorpora los orificios realizados de forma intencionada, sino también otras características propias del montaje, como la cavidad interior, la vibración general de la chapa y la presencia de los rigidizadores, que pueden influir en la respuesta acústica y estructural de la superficie. Por ello, la chapa empleada en laboratorio debe considerarse un modelo simplificado y controlado, útil para estudiar la detección de poros localizados, aunque con ciertas diferencias respecto al comportamiento real de una chapa de casco de buque. En este sentido, el objetivo principal de esta fase no es reproducir exactamente una estructura naval real, sino disponer de una base experimental adecuada para analizar cómo responden las técnicas empleadas frente a poros de tamaño conocido.

5.3 Configuración de los ensayos por ultrasonidos

La inspección ultrasónica del cajón de ensayos se llevó a cabo mediante el sistema *CARGO-SAFE*, equipo diseñado para la detección de vías de fuga y pérdidas de estanqueidad por transmisión ultrasónica. Su funcionamiento se basa en la colocación de un transmisor en el interior del recinto que se desea ensayar, generando una señal ultrasónica continua, y en la utilización de un receptor en el exterior para detectar la señal que atraviesa posibles discontinuidades o zonas no estancas. Según el fabricante, el equipo permite trabajar tanto en lectura de decibelios como en porcentaje del valor de escotilla abierta (*Open Hatch Value, OHV*), que expresa la intensidad recibida respecto a una condición de referencia tomada con la abertura completamente libre. [38]

En el presente trabajo, el transmisor del *CARGO-SAFE* se colocó en el interior del cajón de ensayo a través de la abertura superior del mismo, de manera que la señal ultrasónica se emitiera desde dentro hacia la chapa de acero estudiada. Una vez situado en su posición, el equipo se dejó primero en modo de espera y, cuando todo estaba preparado para comenzar la medida, se activó para que empezara a emitir de forma continua. De esta manera, la señal quedaba generada en el interior del cajón de ensayos y podía atravesar posibles defectos o discontinuidades presentes en la chapa, siendo detectada posteriormente desde el exterior mediante el receptor.

Antes de empezar las medidas con el cajón de ensayos cerrado, se tomó una referencia inicial. Para ello, con la abertura superior del cajón de ensayos abierto, se midió con el receptor la señal máxima recibida y se ajustó el equipo para que esa situación correspondiera al 100 % OHV. De esta forma, la condición de abertura libre se utilizó como punto de partida para comparar después la señal registrada al cerrar el cajón de ensayos y realizar las mediciones reales. Así, cualquier reducción de la señal podía interpretarse en relación con ese valor de referencia fijado al inicio del ensayo. En la Figura 5-1 podemos observar el proceso de ajuste del equipo para obtener el valor de escotilla abierta.



Figura 5-1 Obtención del valor de escotilla abierta (OHV). (Elaboración propia).

Una vez ajustada la referencia, se cerró el cajón de ensayos y se empezó a medir sobre la chapa. En esta fase, el receptor se fue pasando por la superficie exterior, fijándose sobre todo en las zonas donde se habían hecho los agujeros artificiales y en sus alrededores. La idea era comprobar si la señal ultrasónica emitida desde el interior del cajón podía salir a través de esos poros y ser detectada desde fuera. De este modo, cuando el receptor marcaba un aumento de señal en una zona concreta, podía interpretarse como un indicio de que allí existía un paso para la transmisión del ultrasonido. En la Figura 5-2 podemos observar el proceso de medición por la chapa.

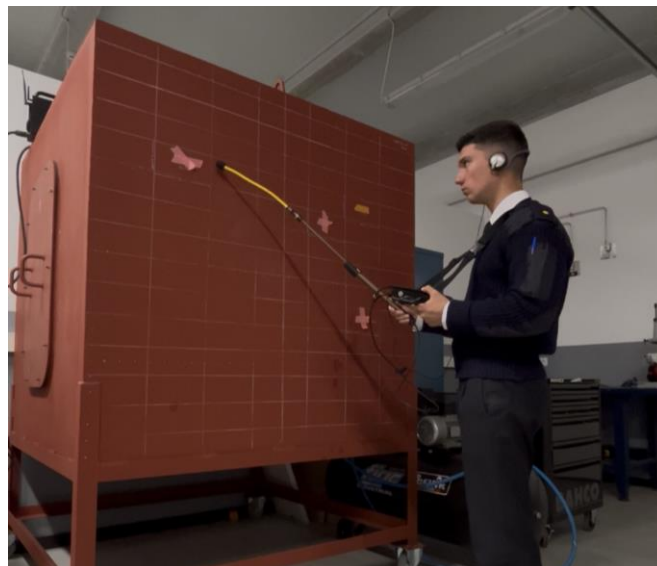


Figura 5-2 Proceso de medición con *CARGO-SAFE*. Elaboración propia).

Para localizar mejor las zonas por donde podía pasar la señal, el equipo utiliza un micrófono flexible conectado al receptor, que permite recorrer con más facilidad los puntos que se quieren comprobar y acercar la medida directamente a la superficie ensayada. En este cajón de ensayos, el barrido se hizo manualmente sobre la cara exterior de la chapa, comparando la señal obtenida en la zona de los agujeros

con la registrada en partes de la placa sin defecto. De esta forma, el sistema *CARGO-SAFE*, que normalmente se emplea para comprobar la estanqueidad de escotillas y cierres, pudo adaptarse al estudio de un cajón de ensayos de laboratorio para analizar cómo se transmitía la señal ultrasónica a través de poros artificiales de tamaño conocido.

Esta forma de hacer el ensayo resulta útil porque permite estudiar cómo cambia la señal ultrasónica detectada en el exterior según el tamaño del agujero, manteniendo controladas las condiciones del montaje y la posición del transmisor y del receptor. Así, en este trabajo el sistema *CARGO-SAFE* se utilizó como una técnica complementaria a los ensayos con *Scan & Paint*, sirviendo para comprobar si los agujeros realizados en la chapa permitían realmente el paso de la señal desde el interior del cajón hacia el exterior.

5.4 Configuración de los ensayos acústicos *Scan & Paint*

En este trabajo, los ensayos se realizaron sobre una chapa de acero de un cajón metálico, con el altavoz colocado en el interior para generar la excitación acústica. Antes de empezar cada medida, se preparó el montaje procurando que las condiciones fuesen siempre las mismas, de manera que los resultados pudieran compararse entre sí. Para ello, se mantuvo la misma disposición del altavoz dentro del cajón y la misma configuración general del banco de ensayo durante todas las pruebas, con algunas excepciones menores asociadas al sistema de adquisición. En particular, la posición de la cámara se ajustó en determinados ensayos para mejorar el encuadre de la zona de medida y garantizar un seguimiento más fiable de la sonda durante el barrido. Estas variaciones no afectaron a la configuración estructural del banco ni a la excitación acústica empleada, sino únicamente al registro visual necesario para el procesamiento posterior de los mapas.[32]

Una vez preparado el montaje, se configuró el sistema de medida. Para ello, se conectó la sonda PU al equipo y se ajustaron los parámetros básicos de captura en el programa. Después, se colocó la cámara frente a la chapa, procurando que quedase lo más perpendicular posible a la superficie, para que pudiera grabar bien el recorrido de la sonda durante el barrido. De esta forma, el sistema registraba al mismo tiempo la señal acústica y el movimiento de la sonda sobre la chapa, lo que permitía representar después los resultados sobre la imagen de la superficie ensayada.

Después de la configuración inicial, se delimitó la zona de barrido sobre la cara exterior de la chapa, es decir, la superficie sobre la que se iba a realizar la medida. El barrido se hizo de forma manual, recorriendo la chapa con la sonda de la manera más uniforme posible y manteniendo una distancia aproximadamente constante respecto a la superficie. Para este tipo de ensayos se trabajó a una distancia comprendida entre 5 y 10 cm, fijando como valor más adecuado una separación de alrededor de 7–8 cm, con el fin de mantener la medida estable y repetible durante todo el ensayo.

En cuanto a la señal de excitación, se utilizó el altavoz situado en el interior del cajón para generar el campo sonoro que excitaba la chapa. En todos los ensayos realizados con *Scan & Paint* se trabajó únicamente con ruido rosa, ya que esta señal permitía excitar de forma amplia la superficie y obtener una respuesta global de la chapa durante el barrido. De esta manera, los mapas acústicos obtenidos se generaron a partir de una excitación continua en ruido rosa, manteniendo la misma condición de ensayo en todas las mediciones para poder comparar los resultados entre sí.



Figura 5-3 Montaje del equipo *Scan & Paint*. (Elaboración propia).

Una vez iniciada la captura, la sonda se desplazó sobre la superficie mientras la cámara registraba el recorrido. Primero se realizó un barrido general de la chapa para obtener una visión completa de su respuesta acústica y, cuando fue necesario, se hicieron barridos más detallados en zonas concretas, especialmente alrededor del agujero. De esta forma, fue posible comparar el comportamiento global de la chapa con la respuesta local en la zona del defecto y comprobar si en esa región aparecía alguna alteración apreciable en el mapa acústico.

Finalizada la adquisición, el vídeo y los datos acústicos se procesaron en el software para generar los mapas correspondientes. *Scan & Paint* permite representar distintas magnitudes, aunque en este trabajo se dio prioridad al parámetro velocidad de partícula, ya que *Microflown* lo considera el indicador más adecuado para localización de fuentes, por depender menos del entorno de medida y ofrecer mayor resolución espacial que la *presión sonora*. A partir de esos mapas se analizaron las zonas donde aparecían incrementos locales de señal o gradientes anómalos, comparando la respuesta de la chapa con el agujero abierto y sellado.

En conjunto, los ensayos con *Scan & Paint* se utilizaron para observar cómo respondía acústicamente la superficie de la chapa y para localizar las zonas donde podían aparecer cambios asociados a los defectos. Su función no fue sustituir a los ultrasonidos, sino complementar esa información, permitiendo comparar lo que mostraban los mapas acústicos con los resultados obtenidos después mediante la otra técnica. De esta manera, *Scan & Paint* se empleó como una herramienta para localizar y analizar posibles anomalías sobre la superficie de la chapa, mientras que los ultrasonidos sirvieron para comprobar esos resultados.

5.5 Procedimiento experimental y adquisición de datos

La primera fase de la campaña correspondió a los ensayos con *Scan & Paint*. En ellos, se utilizó una excitación continua de ruido rosa, con el altavoz emitiendo desde el interior del cajón, y se realizaron barridos manuales con la sonda PU sobre la cara exterior de la chapa. En el presente trabajo, la matriz experimental de *Scan & Paint* se estructuró en función de cuatro tamaños de agujero, 1,5 mm, 5 mm, 8 mm y 10 mm, y de varios niveles de atenuación del transmisor acústico, concretamente -25 dB, -20 dB

y -15 dB para los casos sin tapar, y una condición adicional tapado a -15 dB. Cada combinación dio lugar a un ensayo individual identificado mediante un código específico dentro del anexo, lo que permitió mantener la trazabilidad completa de las mediciones.

Durante cada medición acústica, la sonda se desplazó manualmente sobre la superficie de la chapa, pasando por la zona del defecto para registrar la respuesta local del campo acústico. El sistema registró de forma simultánea la señal captada por la sonda y el movimiento de esta sobre la superficie mediante vídeo, de manera que posteriormente pudieran generarse los mapas acústicos correspondientes y analizarse los espectros asociados.

La segunda fase correspondió a los ensayos con *CARGO-SAFE*. En este caso, el procedimiento comenzó colocando el transmisor ultrasónico en el interior del cajón y ajustando el sistema con el cajón de ensayos abierto, de manera que la intensidad registrada en esa condición sirviese como referencia inicial. A partir de esa referencia, expresada en porcentaje del valor de escotilla abierta (OHV), se cerró el cajón de ensayos y se iniciaron las medidas desde el exterior con el receptor. Para los ensayos recogidos en la matriz del trabajo actual se tomó como base un valor de 30 % OHV, y a partir de esa condición se registraron las respuestas para cada tamaño de agujero, tanto sin tapar como tapado, a varias distancias de medida: 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm y 0 cm. Esta organización experimental permitió estudiar de forma ordenada cómo variaba la señal ultrasónica detectada en función de la cercanía al defecto y del tamaño del agujero.

5.6 Criterios de comparación e integración de resultados

La comparación entre ambas técnicas se planteó a partir de un criterio sencillo, analizar si los poros artificiales de la chapa podían identificarse de forma coherente mediante *Scan & Paint* y mediante *CARGO-SAFE*, y comprobar hasta qué punto la información obtenida por una técnica complementaba la de la otra. En este trabajo no se buscó demostrar que la técnica acústica sustituyese a los ultrasonidos, sino valorar si podía actuar como herramienta de cribado previo, localizando zonas sospechosas sobre la superficie, mientras que la técnica ultrasónica aportaba una comprobación adicional sobre la existencia real del defecto.

Para realizar la comparación, los resultados se organizaron en torno a cuatro criterios principales. El primero fue la detectabilidad del defecto, es decir, comprobar si un determinado agujero producía una respuesta diferenciable respecto a la chapa sin defecto o respecto al mismo agujero en estado sellado. El segundo fue el contraste entre abierto y tapado, que permitió valorar si la apertura real del orificio generaba una variación apreciable tanto en los mapas acústicos como en la lectura ultrasónica. El tercer criterio fue la correlación espacial, basada en analizar si las anomalías observadas en los mapas acústicos aparecían en la misma zona donde se encontraba el orificio. Por último, se consideró la eficiencia operativa, comparando el tipo de cobertura que ofrece cada técnica, una medida continua y superficial en el caso de *Scan & Paint*, frente a una comprobación más dirigida en el caso de *CARGO-SAFE*.

En el caso de *Scan & Paint*, la comparación se apoyó principalmente en la interpretación de los mapas acústicos de *velocidad de partícula* y de los espectros asociados a cada ensayo. La señal se consideró favorable a la detección cuando, en la zona del agujero, aparecía una alteración local clara respecto al patrón general de la chapa. Para reforzar esta interpretación, se compararon siempre configuraciones equivalentes con el mismo diámetro, mismo nivel de excitación y mismo recorrido de barrido, cambiando únicamente el estado del orificio entre abierto y sellado. De esta forma, el análisis no se basó tanto en el valor absoluto del mapa como en la diferencia entre dos condiciones comparables, lo que permite separar mejor el efecto del poro de la respuesta global de la chapa.

En los ensayos con *CARGO-SAFE*, la comparación se basó en la lectura obtenida en porcentaje OHV, tomando como referencia el valor fijado con el cajón de ensayos abierto. A partir de esa referencia, se analizaron las variaciones de señal registradas al medir sobre la chapa cerrada para cada tamaño de agujero y para cada distancia de medida. En términos prácticos, la interpretación fue directa, una lectura

más alta indicaba una mayor transmisión ultrasónica hacia el exterior y, por tanto, una mayor probabilidad de que existiese un defecto en la zona ensayada.

La integración de resultados se realizó en dos niveles. En un primer nivel, cada técnica se analizó por separado, identificando qué configuraciones producían una respuesta clara y cuáles daban lugar a resultados ambiguos. En un segundo nivel, se cruzaron ambos resultados para cada configuración de ensayo, relacionando el diámetro del agujero, su estado abierto o tapado y la respuesta registrada por ambos sistemas. Esta comparación conjunta permitió clasificar cada caso en detección coincidente, cuando ambas técnicas mostraban un indicio claro del defecto, detección solo acústica, cuando el mapa mostraba una anomalía local pero la respuesta ultrasónica no era concluyente y detección solo ultrasónica, cuando el defecto no se apreciaba claramente en el mapa, pero sí producía una lectura elevada con *CARGO-SAFE*.

6 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y VALIDACIÓN

6.1 Resultados de los ensayos por ultrasonidos

Los resultados obtenidos con *CARGO-SAFE* se organizaron en una matriz de medida en la que se comparan cuatro tamaños de orificio (1,5 mm, 5 mm, 8 mm y 10 mm), dos estados del defecto (sin tapar y tapado) y cinco distancias de medida respecto al agujero (20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm y 0 cm), tomando como base una referencia inicial de 30 % OHV.

La primera tendencia general que se observa es que la lectura ultrasónica aumenta al acercar el receptor a la zona del defecto, tanto en la condición sin tapar como en la condición tapada. En los orificios sin tapar, los valores medios pasan de 42,75 % a 20 cm a 46,25 % a 15 cm, 56,25 % a 10 cm, 79,75 % a 5 cm y 97,5 % a 0 cm. En los orificios tapados se mantiene la misma evolución creciente, aunque con valores inferiores, pasando de una media de 32,75 % a 20 cm a 35,5 % a 15 cm, 40,75 % a 10 cm, 46,75 % a 5 cm y 61 % a 0 cm. Por tanto, la proximidad al agujero aparece como un factor claramente determinante en la capacidad del sistema para registrar la transmisión ultrasónica.

La segunda tendencia importante es la diferencia entre la condición sin tapar y la condición tapada. En todos los casos ensayados, la lectura obtenida con el agujero abierto es superior a la registrada cuando el defecto se encuentra sellado. Esta diferencia resulta relativamente reducida a grandes distancias, pero se hace mucho más clara al acercar el receptor a la zona del agujero. Por ejemplo, en el caso del orificio de 8 mm, la lectura pasa de 45 % sin tapar frente a 33 % tapado a 20 cm, mientras que a 0 cm asciende a 99 % sin tapar frente a 66 % tapado. De forma similar, en el orificio de 10 mm se obtiene 50 % sin tapar y 33 % tapado a 20 cm, mientras que a 0 cm se alcanza 99 % sin tapar frente a 75 % tapado. Esto indica que el sistema distingue con mayor claridad entre defecto abierto y sellado cuando la medición se realiza en las proximidades del agujero.

En general, para una misma distancia, la lectura tiende a aumentar al incrementarse el diámetro del agujero. Esta tendencia se aprecia con claridad en la condición sin tapar a 15 cm, 10 cm y 5 cm. A 15 cm, los valores aumentan de 40 % para 1,5 mm a 43 % para 5 mm, 50 % para 8 mm y 52 % para 10 mm. A 10 cm, la progresión continúa con 45 %, 49 %, 60 % y 71 %, respectivamente. A 5 cm, los valores alcanzan 65 %, 79 %, 85 % y 90 %. Estos resultados muestran una relación lógica entre el tamaño del defecto y la intensidad de la señal detectada. A 20 cm, la evolución sigue siendo globalmente coherente, aunque con menor contraste entre los diámetros pequeños. En este caso, los orificios de 1,5 mm y 5 mm presentan ambos un valor del 38 %, mientras que los de 8 mm y 10 mm aumentan a 45 % y 50 %, respectivamente. Esto sugiere que, a distancias mayores, el sistema conserva capacidad para diferenciar los defectos más grandes, pero reduce su sensibilidad para discriminar con claridad entre los diámetros menores. A 0 cm, las lecturas de los orificios sin tapar alcanzan prácticamente el máximo de la escala, con valores de 93 % para 1,5 mm y 99 % para 5 mm, 8 mm y 10 mm. Este comportamiento indica que,

cuando el receptor se sitúa directamente sobre el defecto, todos los agujeros abiertos generan una respuesta muy alta y fácilmente detectable. Sin embargo, también pone de manifiesto que, a esa distancia, la capacidad para diferenciar entre los diámetros mayores disminuye, ya que varios de ellos convergen en el mismo valor.

En la condición tapada también se aprecia una evolución lógica con el tamaño del orificio, especialmente a distancias cortas. A 0 cm, las lecturas aumentan de forma progresiva desde 45 % para 1,5 mm hasta 58 % para 5 mm, 66 % para 8 mm y 75 % para 10 mm. A 5 cm también se observa una progresión clara, con valores de 37 %, 45 %, 50 % y 55 %. A 10 cm y 15 cm la misma tendencia se mantiene, aunque con un contraste algo menor. A 20 cm, los tres diámetros mayores presentan el mismo valor de 33 %, mientras que el de 1,5 mm se sitúa ligeramente por debajo, en 32 %. Esto vuelve a indicar que, a grandes distancias, la capacidad discriminante del sistema disminuye.

En conjunto, los resultados permiten extraer tres conclusiones principales. En primer lugar, el sistema *CARGO-SAFE* detecta de forma clara la presencia de un defecto cuando la medida se realiza cerca del agujero. En segundo lugar, la diferencia entre agujero abierto y tapado es sistemática y suficientemente marcada como para considerar que el equipo responde de forma sensible al estado real del defecto. En tercer lugar, los resultados muestran una evolución consistente con el tamaño del agujero, especialmente en las distancias de 15 cm, 10 cm y 5 cm, donde el incremento del diámetro se traduce en un aumento progresivo de la señal detectada.

Desde el punto de vista experimental, esto permite interpretar que las condiciones más favorables para la inspección ultrasónica son las medidas realizadas a 0 cm y 5 cm, donde la respuesta del sistema es más alta y el contraste entre configuraciones resulta más claro. No obstante, a 0 cm aparece una cierta convergencia en los agujeros abiertos de mayor tamaño, por lo que la distancia de 5 cm puede considerarse especialmente útil, al ofrecer un equilibrio más adecuado entre sensibilidad y capacidad de discriminación entre diámetros. Por tanto, dentro del método híbrido propuesto en este trabajo, los resultados de *CARGO-SAFE* refuerzan la idea de que esta técnica puede emplearse como una herramienta de comprobación localizada en zonas previamente identificadas como sospechosas. Su mayor utilidad no reside en la exploración global de grandes superficies, sino en la verificación puntual del defecto una vez acotada la región de interés.

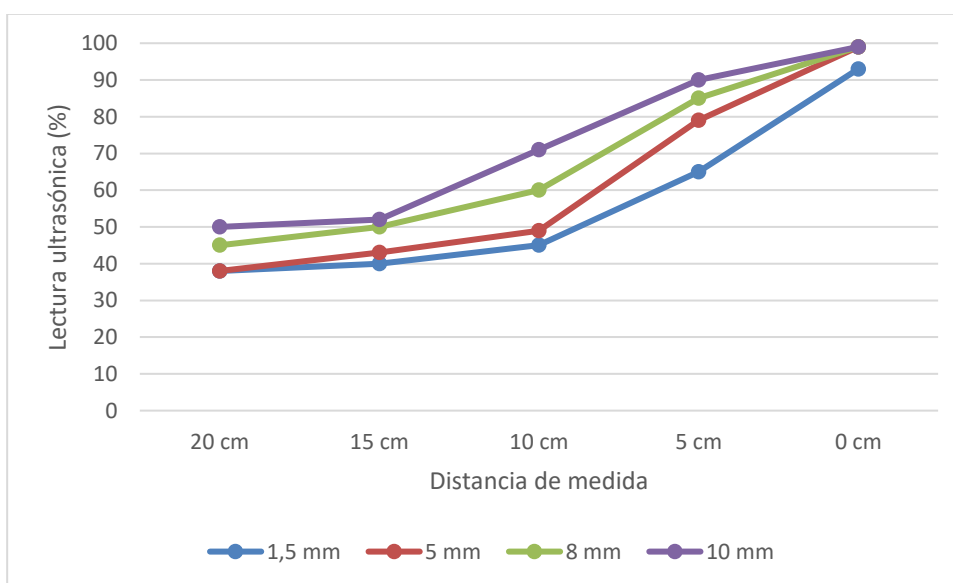


Figura 6-1 Variación de la lectura ultrasónica respecto a la distancia para orificios sin tapar. (Elaboración propia).

Como se observa en la Figura 6-1, la lectura ultrasónica aumenta de forma general a medida que disminuye la distancia entre el receptor y el defecto. Esta tendencia se aprecia en todos los diámetros ensayados,

aunque con distinta intensidad según el tamaño del agujero. En los orificios sin tapar, los diámetros mayores presentan, en general, valores más altos que los menores para una misma distancia, especialmente a 15 cm, 10 cm y 5 cm. A 20 cm la diferenciación entre los diámetros pequeños es menos marcada, mientras que a 0 cm las lecturas de 5 mm, 8 mm y 10 mm convergen prácticamente en el valor máximo.

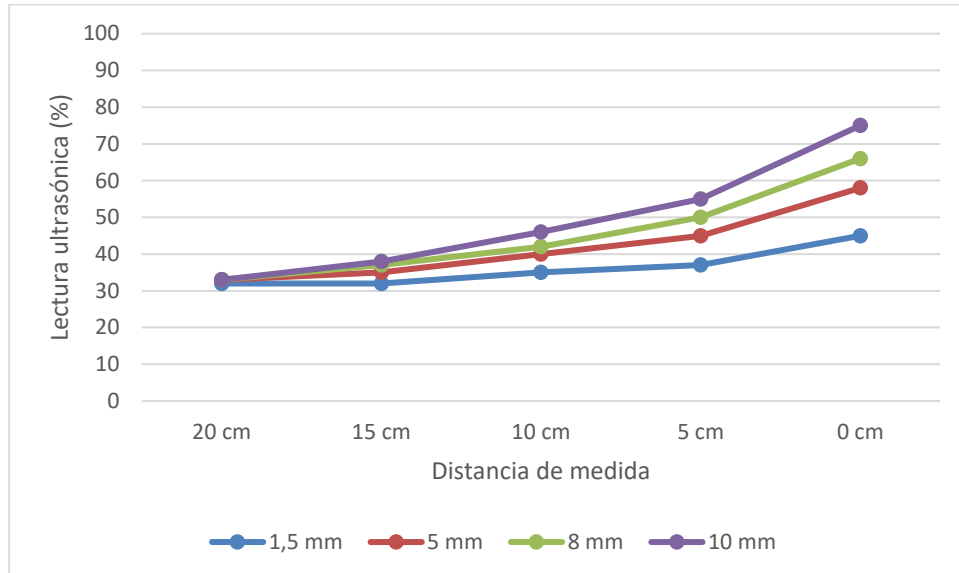


Figura 6-2 Variación de la lectura ultrasónica respecto a la distancia para orificios tapados. (Elaboración propia).

Como se observa en la Figura 6-2, en los orificios tapados la lectura ultrasónica también aumenta a medida que disminuye la distancia entre el receptor y la zona del defecto. Sin embargo, los valores registrados son inferiores a los obtenidos en la condición sin tapar, lo que indica que el sellado reduce la transmisión de la señal ultrasónica hacia el exterior. Además, a distancias cortas se aprecia una evolución creciente con el diámetro del agujero, especialmente a 5 cm y 0 cm, donde los orificios mayores presentan respuestas claramente superiores a las de los menores.

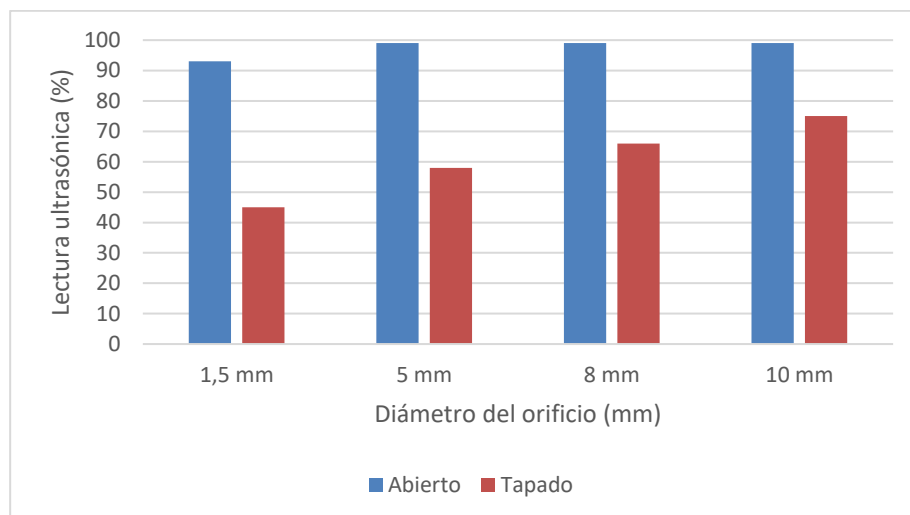


Figura 6-3 Comparación de la lectura ultrasónica entre orificios abiertos y tapados a 0 cm. (Elaboración propia).

La Figura 6-3 compara la respuesta ultrasónica de los orificios abiertos y tapados a una distancia de 0 cm. En todos los diámetros ensayados, los valores obtenidos en la condición sin tapar son superiores a los registrados cuando el defecto está sellado. En el orificio de 1,5 mm la lectura pasa de 45 % en

tapado a 93 % en abierto, mientras que en los diámetros de 5 mm, 8 mm y 10 mm los valores abiertos alcanzan el 99 %, frente a 58 %, 66 % y 75 % en la condición tapada, respectivamente. Esta diferencia confirma que el sistema *CARGO-SAFE* es sensible al estado real del defecto y que la medida realizada directamente sobre el agujero ofrece el mayor contraste entre ambas situaciones.

6.2 Resultados de los mapas acústicos de *velocidad de partícula*

6.2.1 *Análisis orificio de 1,5mm sin tapar a 95dB*

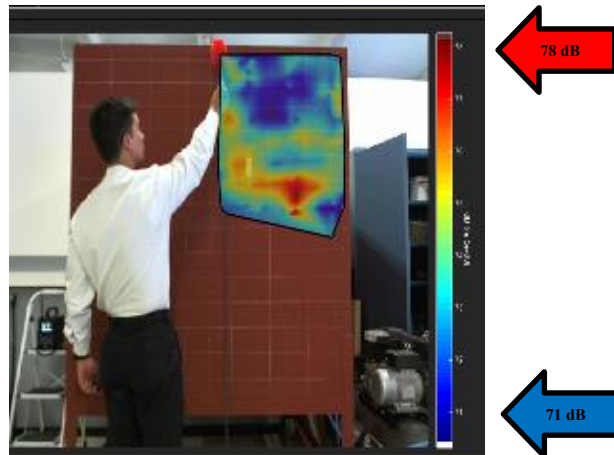


Figura 6-4 Mapa Acústico del orificio de 1,5mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).

El mapa acústico del orificio de 1,5 mm sin tapar a 95 dB presenta una escala de representación comprendida aproximadamente entre 71 y 78 dB, lo que supone un rango dinámico de 7 dB. Aunque se observan zonas de mayor intensidad acústica dentro del mapa, la región de máxima respuesta no coincide de forma clara con la posición conocida del defecto. Por ello, en esta configuración de ensayo no puede considerarse que exista una detección concluyente del orificio, ya que la distribución espacial del mapa no permite asociar con fiabilidad la respuesta acústica observada con la localización real del agujero.

6.2.2 *Análisis orificio de 1,5mm sin tapar a 100dB*

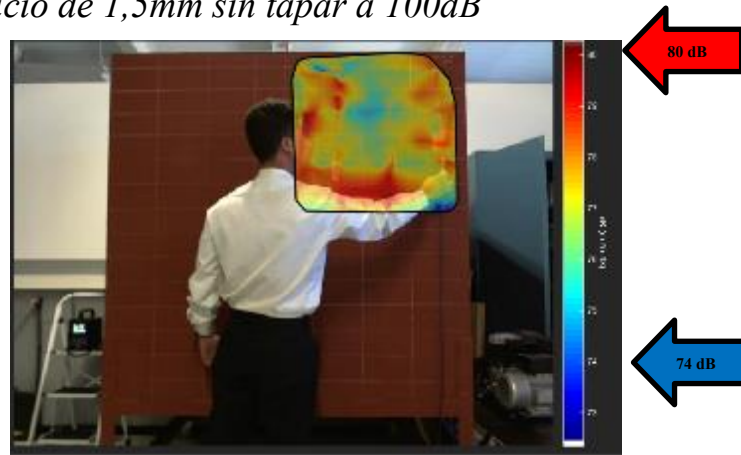


Figura 6-5 Mapa Acústico del orificio de 1,5mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).

El mapa acústico correspondiente al orificio de 1,5 mm sin tapar a 100 dB presenta una escala de representación comprendida aproximadamente entre 74 y 80 dB, lo que supone un rango dinámico de 6 dB. Aunque se observan zonas con mayor intensidad acústica dentro del área analizada, estas no coinciden de forma clara con la posición conocida del defecto. En consecuencia, la distribución espacial obtenida no permite asociar con fiabilidad la respuesta acústica registrada con la localización real del

orificio. Por ello, en esta configuración de medida no puede considerarse que exista una detección concluyente del defecto.

6.2.3 Análisis orificio de 1,5mm sin tapar a 105dB

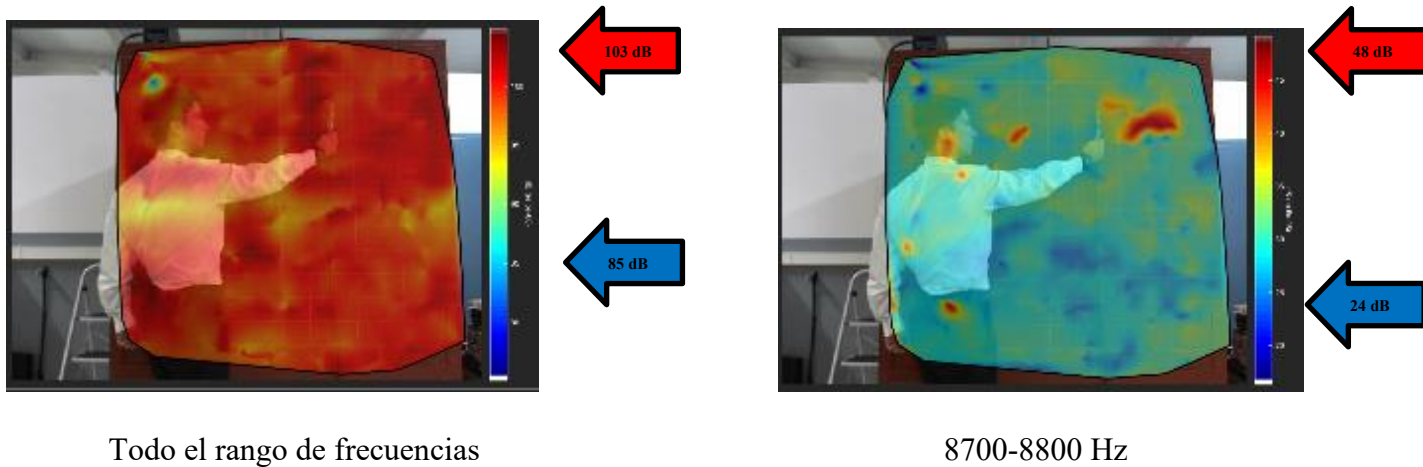


Figura 6-6 Mapas Acústicos del orificio de 1,5mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).

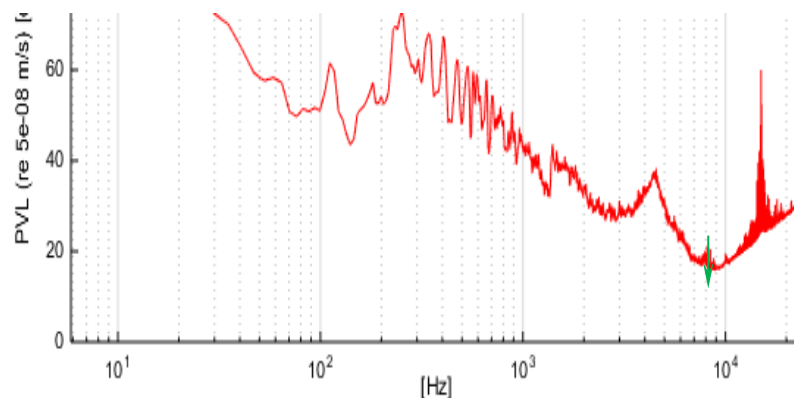


Figura 6-7 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro *velocidad de partícula* es amplio en ambas representaciones. En el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, la diferencia entre el valor mínimo medido (85 dB) y el máximo (103 dB) es de 18 dB. Por su parte, en el mapa acotado entre 8700 y 8800 Hz, el rango dinámico aumenta hasta 24 dB, al situarse los valores entre 24 dB y 48 dB. Estos valores permiten afirmar que la respuesta acústica presenta contraste suficiente como para analizar la distribución espacial del mapa.

En la representación correspondiente a todo el espectro frecuencial no se aprecia una localización clara del defecto, ya que la respuesta aparece extendida sobre buena parte de la superficie ensayada. Sin embargo, al acotar el análisis en la banda comprendida entre 8700 y 8800 Hz, se observa una zona de mayor intensidad en las proximidades de la posición del orificio. No obstante, dicha activación no aparece de forma específica ni totalmente aislada, puesto que el mapa sigue mostrando otras regiones con actividad apreciable.

6.2.4 Análisis orificio de 5mm sin tapar a 95dB



Todo el rango de frecuencias

200-230 Hz

Figura 6-8 Mapas Acústicas del orificio de 5mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).

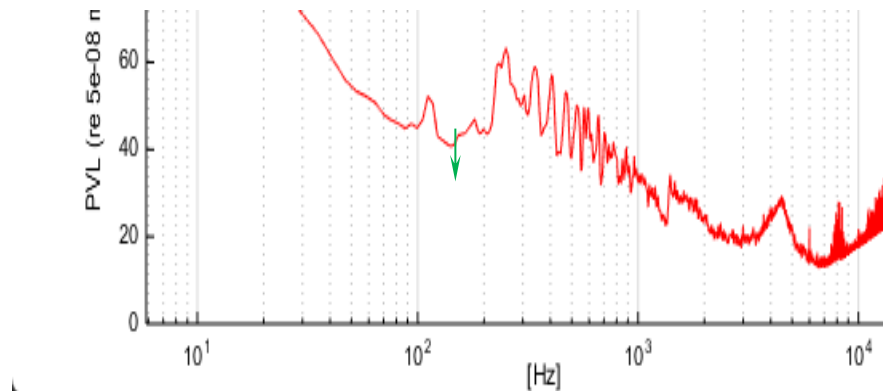


Figura 6-9 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro *velocidad de partícula* es reducido en el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, con valores entre 74,5 dB y 77 dB, lo que dificulta identificar con claridad la posición del defecto. Sin embargo, en el mapa acotado entre 200 y 230 Hz el contraste aumenta notablemente, con valores comprendidos entre 54 dB y 66 dB. En esta banda se aprecia una zona de mayor intensidad en las proximidades del orificio de 5 mm, aunque sin quedar completamente aislada. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico bastante claro en torno a los 200 Hz, lo que justifica la selección de dicha banda para el análisis. En conjunto, este ensayo muestra una detección más favorable del defecto, aunque todavía con una localización espacial moderada.

6.2.5 Análisis orificio de 5mm sin tapar a 100dB

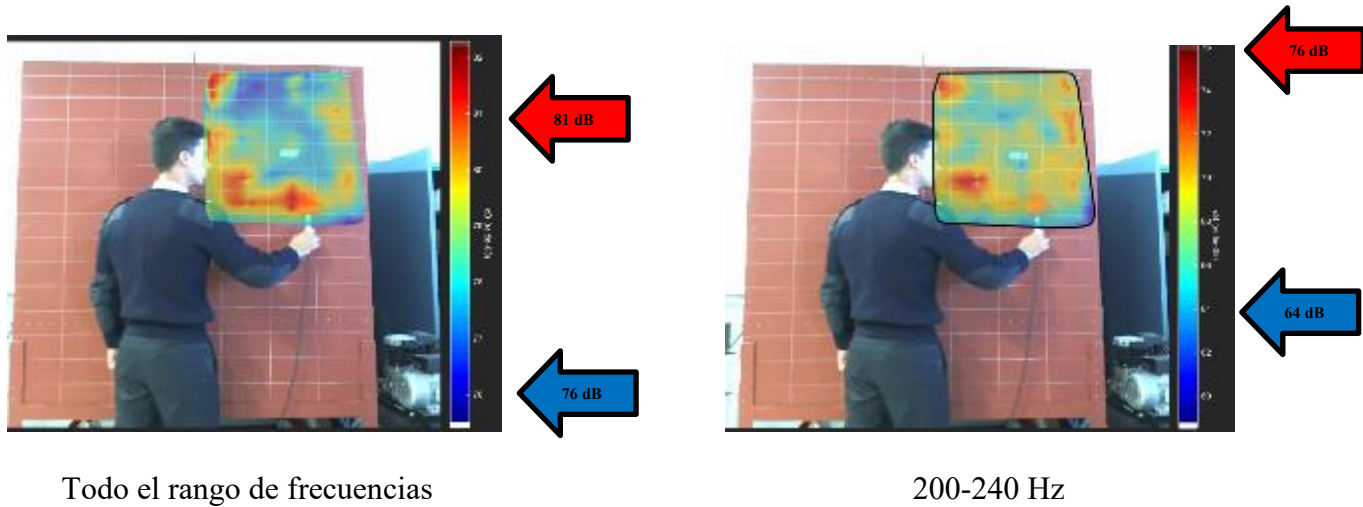


Figura 6-10 Mapas Acústicos del orificio de 5mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).

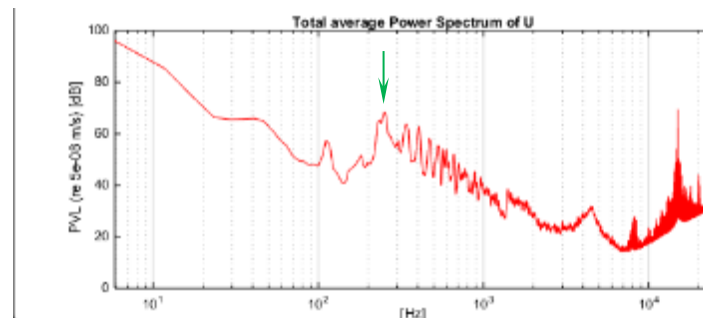


Figura 6-11 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula es moderado en ambas representaciones. En el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, los valores se sitúan entre 76 dB y 81 dB, mientras que en el mapa acotado entre 200 y 240 Hz se encuentran entre 64 dB y 76 dB. En la representación global ya se aprecia una zona de mayor intensidad en las proximidades del orificio de 5 mm, aunque sigue sin quedar completamente aislada. Al acotar el análisis entre 200 y 240 Hz, esa respuesta se mantiene y se interpreta con mayor claridad. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico bastante marcado en torno a los 200 Hz, lo que justifica la selección de dicha banda.

6.2.6 Análisis orificio de 5mm sin tapar a 105dB

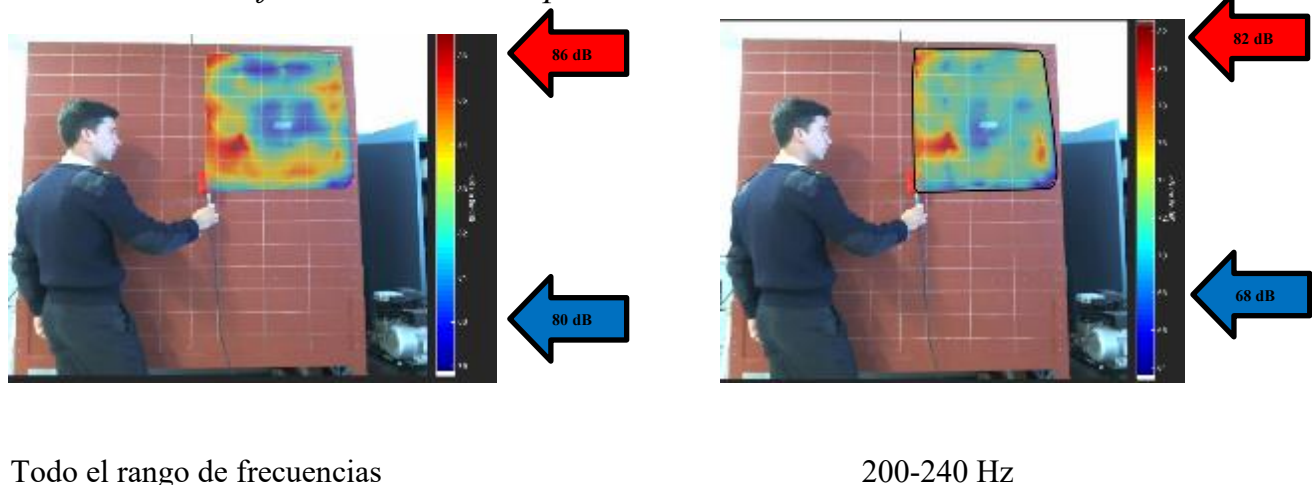


Figura 6-12 Mapas Acústicos del orificio de 5mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).

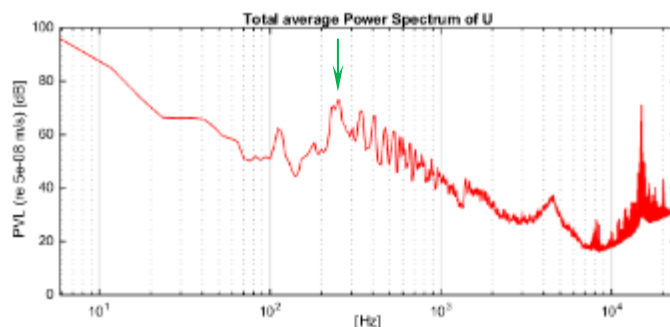


Figura 6-13 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro *velocidad de partícula* es moderado en ambas representaciones. En el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, los valores se sitúan entre 50 dB y 56 dB, mientras que en el mapa acotado entre 200 y 240 Hz se encuentran entre 68 dB y 82 dB. En la representación global ya se aprecia una zona de mayor intensidad en las proximidades del orificio de 5 mm. Al acotar el análisis entre 200 y 240 Hz, dicha respuesta se define con mayor claridad que en el ensayo realizado a 100 dB, mostrando una localización más favorable del defecto. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico marcado entre 200-300 Hz, lo que justifica la selección de esta banda para el análisis. En conjunto, este ensayo muestra una detección más nítida del orificio, siendo la configuración más favorable de las tres analizadas para el diámetro de 5 mm sin tapar.

6.2.7 Análisis orificio de 8mm sin tapar a 95dB

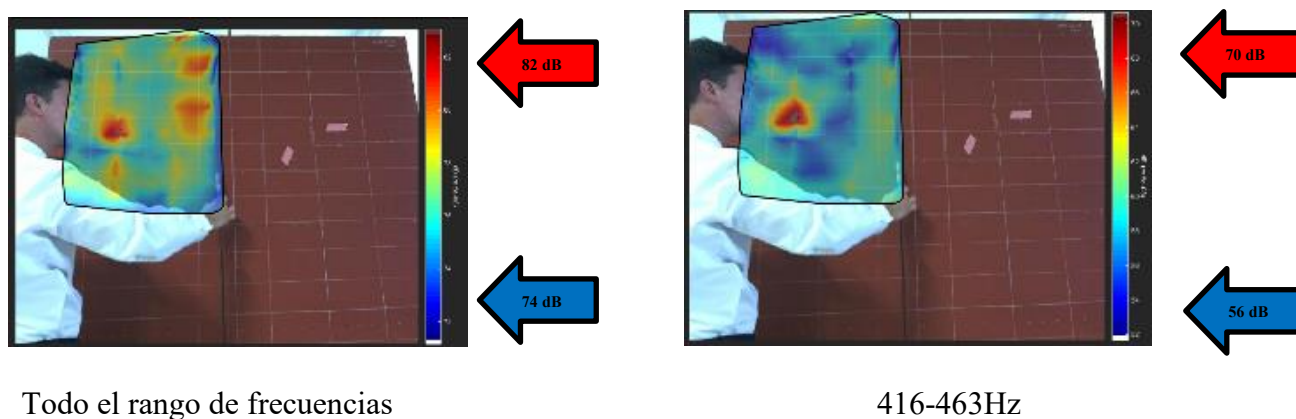


Figura 6-14 Mapas Acústicos del orificio de 8mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).

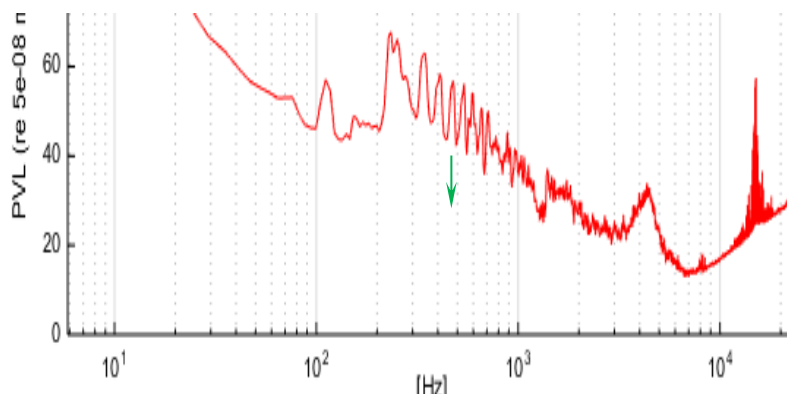


Figura 6-15 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro *velocidad de partícula* es reducido en el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, con valores comprendidos entre 74 dB y 81 dB, mientras que en el mapa acotado entre 416 y 463 Hz aumenta de forma notable, situándose entre 56 dB y 70 dB. En la representación de todo el rango frecuencial no se aprecia con claridad la posición del defecto, ya que la respuesta aparece repartida en varias zonas del mapa. Sin embargo, al acotar la banda, se observa una activación muy clara en las proximidades del orificio de 8 mm. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico claro en torno a los 400 Hz, justificando así la selección de dicha banda para el análisis.

6.2.8 Análisis orificio de 8mm sin tapar a 100dB

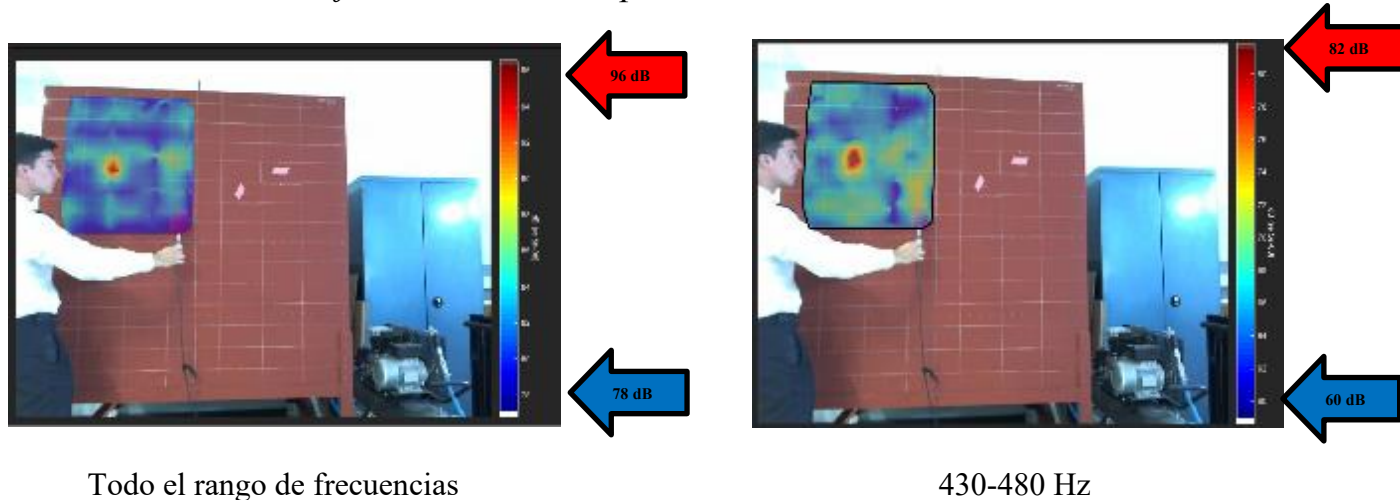


Figura 6-16 Mapas Acústicos del orificio de 8mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).

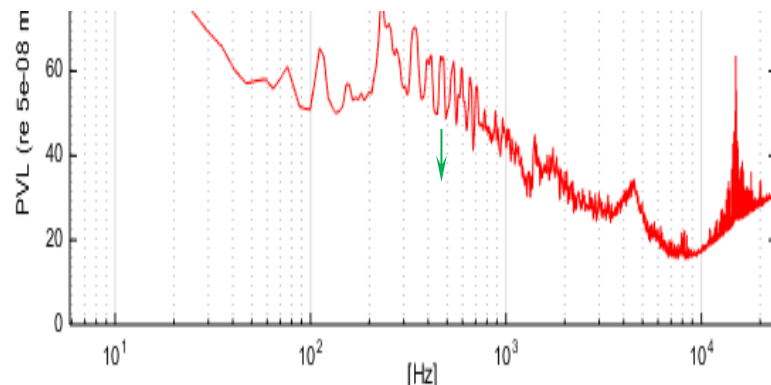
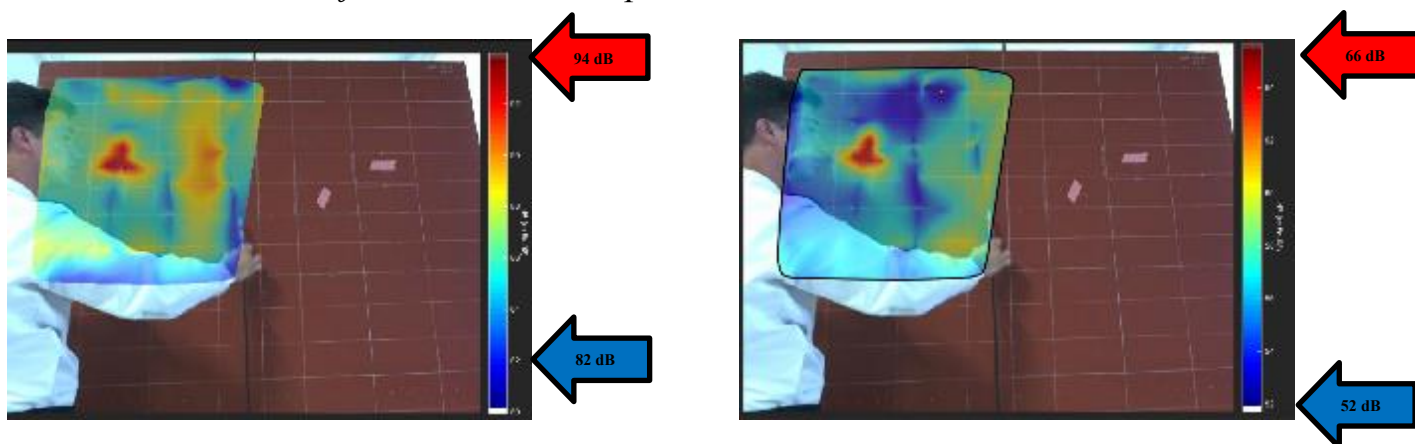


Figura 6-17 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro *velocidad de partícula* es amplio en ambas representaciones. En el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, los valores se sitúan entre 78 dB y 96 dB, mientras que en el mapa acotado entre 430 y 480 Hz se encuentran entre 60 dB y 82 dB. En la representación global ya se aprecia con claridad una zona de mayor intensidad en la posición del orificio de 8 mm. Al acotar el análisis en la banda seleccionada, dicha respuesta se mantiene y se define de forma más limpia, mejorando su interpretación espacial. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico claro en torno a los 430 Hz, lo que justifica la selección de esta banda para el análisis.

6.2.9 Análisis orificio de 8mm sin tapar a 105dB



Todo el rango de frecuencias

808-855 Hz

Figura 6-18 Mapas Acústicas del orificio de 8mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).

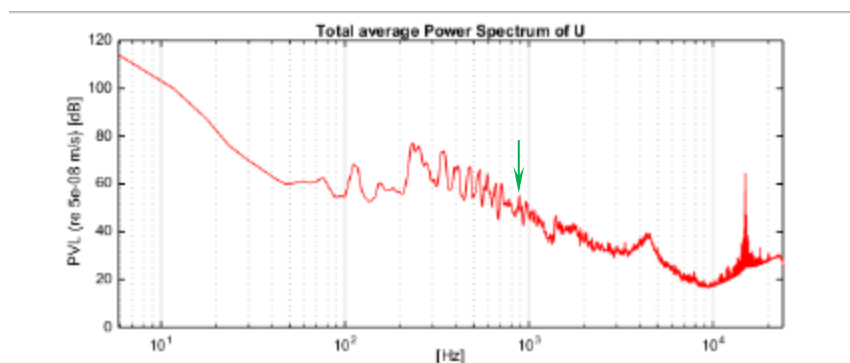
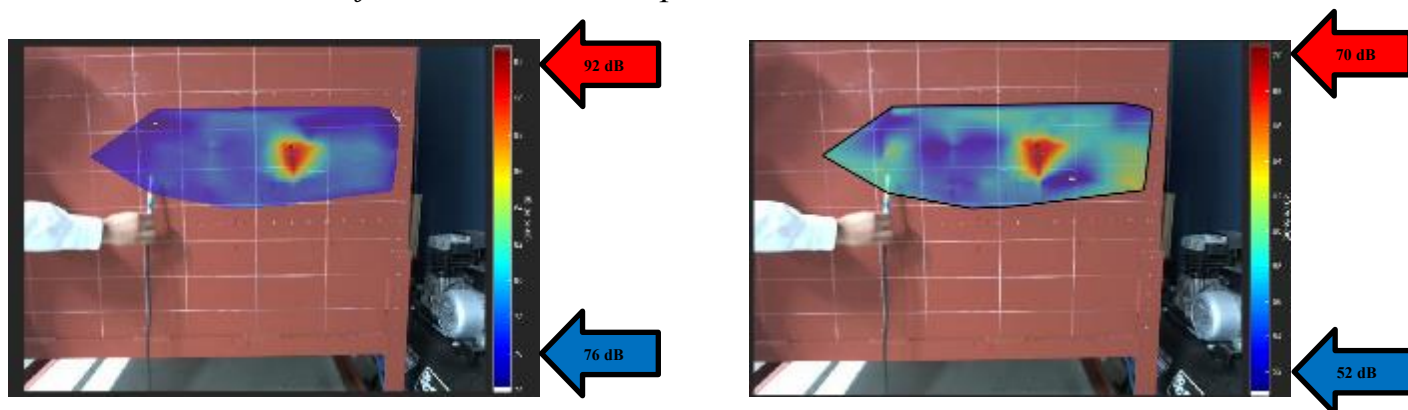


Figura 6-19 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

El rango dinámico del parámetro *velocidad de partícula* es amplio en ambas representaciones. En el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, los valores se sitúan entre 82 dB y 94 dB, mientras que en el mapa acotado entre 808 y 855 Hz se encuentran entre 52 dB y 66 dB. En la representación global se aprecia de forma clara una zona de mayor intensidad en la posición del orificio de 8 mm. Al acotar el análisis en la banda seleccionada, dicha respuesta se mantiene bien definida, aunque sin una mejora tan marcada respecto al ensayo realizado a 100 dB. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico claro en torno a los 800 Hz, lo que justifica la selección de esta banda para el análisis.

6.2.10 Análisis orificio de 10mm sin tapar a 95dB



Todo el rango de frecuencias

662-709 Hz

Figura 6-20 Mapas Acústicos del orificio de 10mm sin tapar a 95dB. (Elaboración propia).

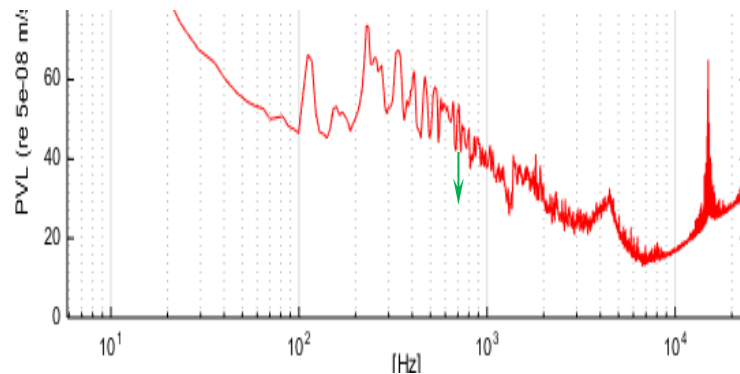


Figura 6-21 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En el mapa correspondiente a todo el rango de frecuencias, los valores se sitúan entre 76 dB y 92 dB, mientras que en el mapa acotado entre 662 y 709 Hz se encuentran entre 52 dB y 70 dB. En la representación global se observa una zona de mayor intensidad claramente localizada en las proximidades del orificio. Al acotar el análisis en la banda seleccionada, dicha respuesta se mantiene y se aprecia de forma más limpia, lo que facilita su interpretación espacial. Además, el espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula presenta un pico claro en torno a los 700 Hz, lo que justifica la selección de esta banda para el análisis. En conjunto, en esta configuración y dentro de las condiciones ensayadas, la posición del defecto se identifica con bastante claridad.

6.2.11 Análisis del orificio de 10mm sin tapar a 100dB

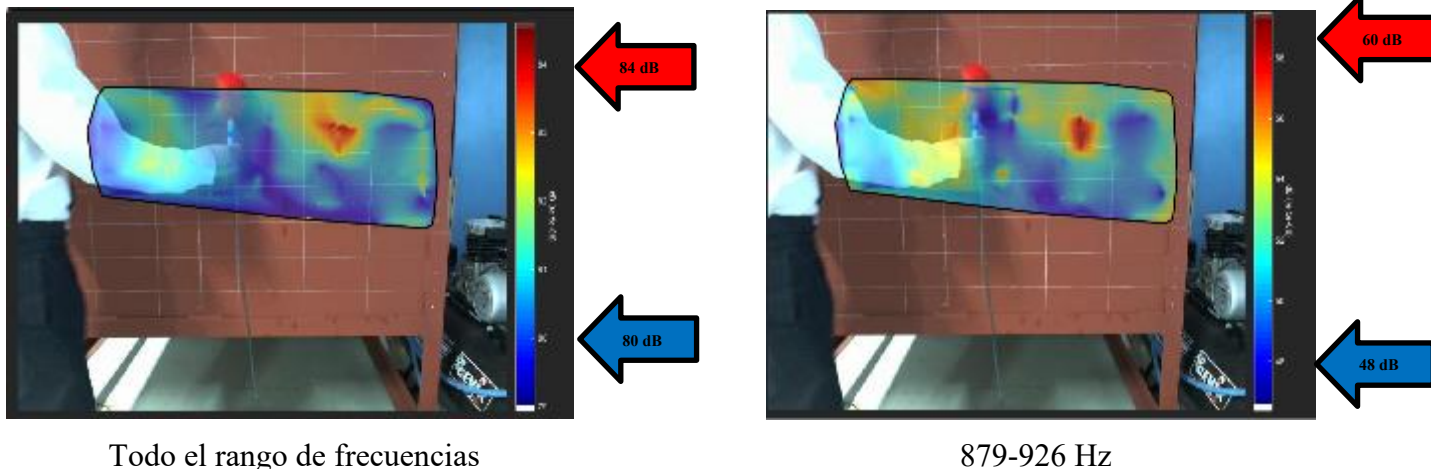


Figura 6-22 Mapas Acústicas del orificio de 10mm sin tapar a 100dB. (Elaboración propia).

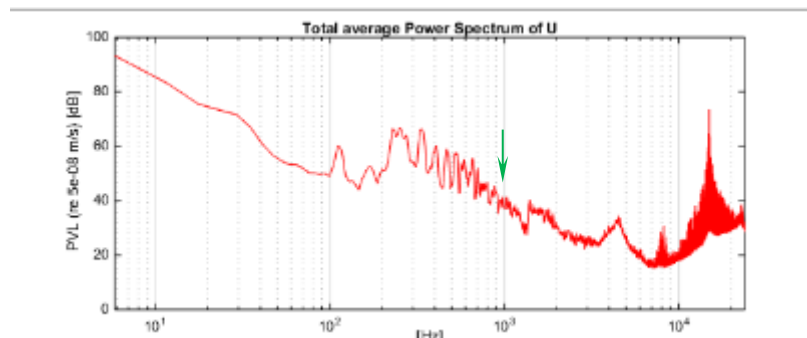


Figura 6-23 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En el primer caso, los valores se sitúan entre 80 dB y 84 dB, mientras que en la banda comprendida entre 879 y 926 Hz varían entre 48 dB y 60 dB. En ambas imágenes aparece una respuesta destacada en la zona del orificio, aunque en el mapa global esta se mezcla más con otras variaciones repartidas por la superficie. Al limitar el análisis a la banda seleccionada, la zona asociada al defecto queda más resaltada dentro del conjunto y su lectura resulta más clara. El espectro frecuencial muestra además un pico apreciable en torno a los 900 Hz, lo que respalda la elección de esa banda. En este ensayo, la posición del orificio puede identificarse con bastante claridad.

6.2.12 Análisis orificio de 10mm sin tapar a 105dB

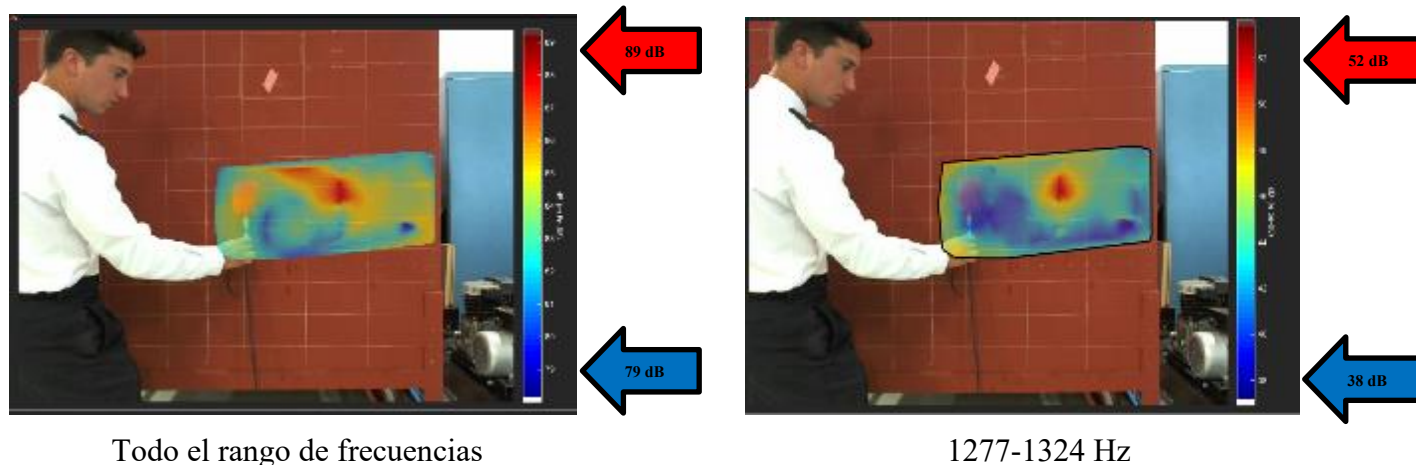


Figura 6-24 Mapas Acústicos del orificio de 10mm sin tapar a 105dB. (Elaboración propia).

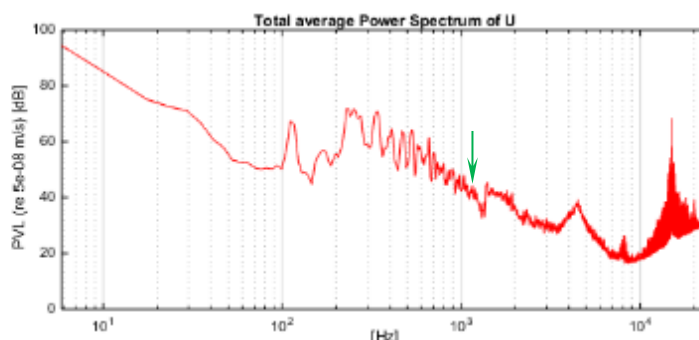


Figura 6-25 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En este ensayo, el mapa de todo el rango de frecuencias presenta valores entre 79 dB y 89 dB, mientras que en la banda acotada entre 1277 y 1324 Hz los valores se sitúan entre 38 dB y 52 dB. En ambos casos se aprecia bastante bien la zona del orificio, pero en el mapa acotado esta aparece más clara y fácil de distinguir del resto. Además, el espectro frecuencial muestra un pico en torno a 1,3 kHz, lo que encaja con la banda seleccionada para el análisis. En conjunto, este ensayo permite localizar el defecto con claridad y muestra una respuesta bastante bien definida.

6.2.13 Análisis orificio de 1,5mm Tapado a 105dB

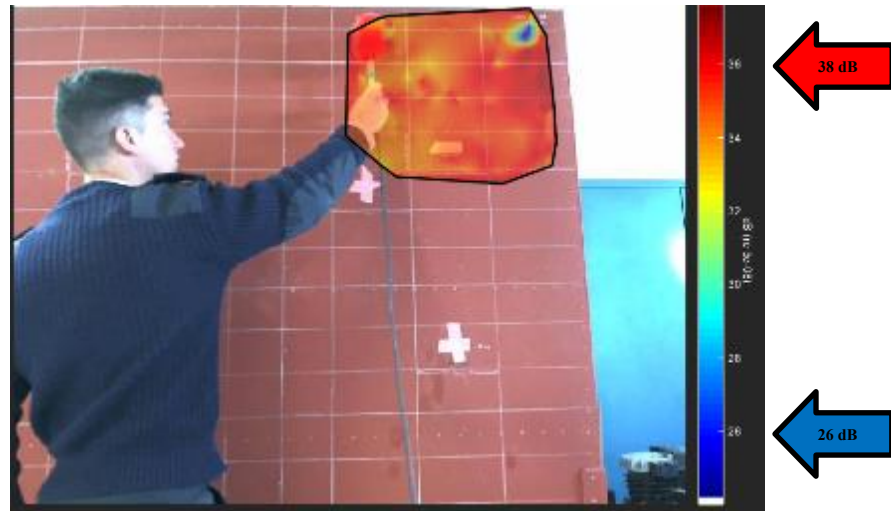
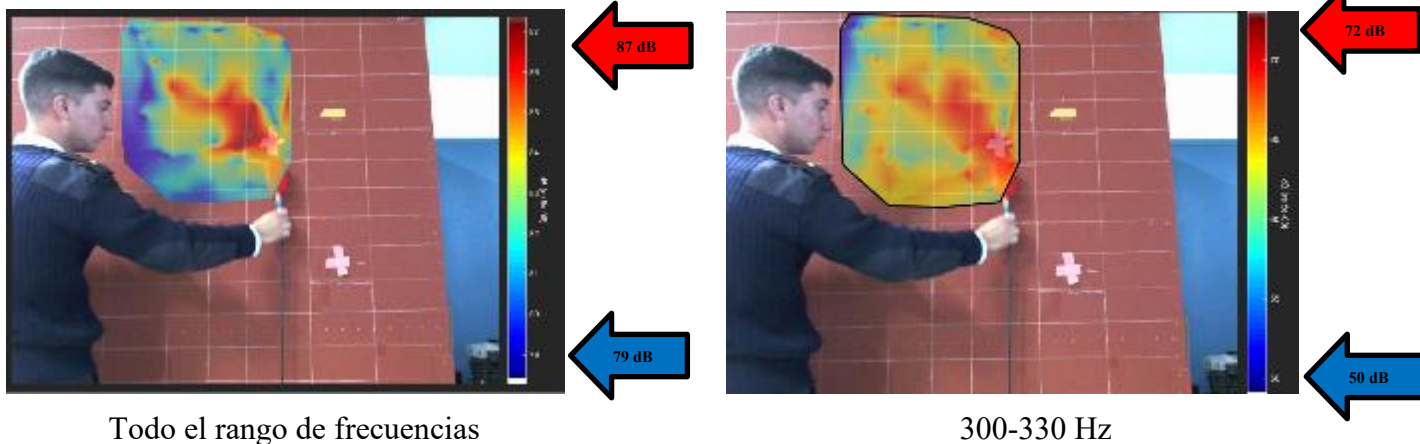


Figura 6-26 Mapa Acústico del orificio de 1,5mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).

En este ensayo, el mapa acústico presenta valores comprendidos entre 26 dB y 38 dB, lo que supone un rango dinámico de 12 dB. Sin embargo, esa diferencia no se traduce en una localización útil del defecto, ya que no aparece una zona claramente asociada a la posición del orificio tapado de 1,5 mm. La respuesta se muestra bastante extendida y sin un foco definido, por lo que en esta configuración no puede considerarse que exista detección del defecto.

6.2.14 Análisis orificio de 5mm Tapado a 105dB



Todo el rango de frecuencias

300-330 Hz

Figura 6-27 Mapas Acústicos del orificio de 5mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).

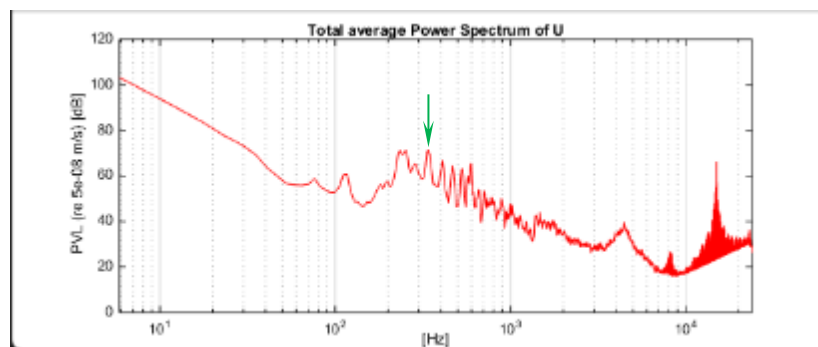


Figura 6-28 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En este ensayo, el mapa de todo el rango de frecuencias presenta valores entre 79 dB y 87 dB, mientras que en la banda acotada entre 300-330 Hz los valores se sitúan entre 60 dB y 74 dB. En ambas representaciones aparece una zona de mayor intensidad dentro del área analizada, pero esa respuesta no queda lo bastante definida como para asociarla de forma clara a la posición del orificio tapado de 5 mm. Además, aunque el espectro frecuencial muestra un pico apreciable en torno a los 330 Hz, la banda seleccionada no mejora de manera clara la localización del defecto. En conjunto, este ensayo muestra cierta activación acústica, pero no permite identificar el orificio con claridad.

6.2.15 Análisis orificio de 8mm tapado a 105dB

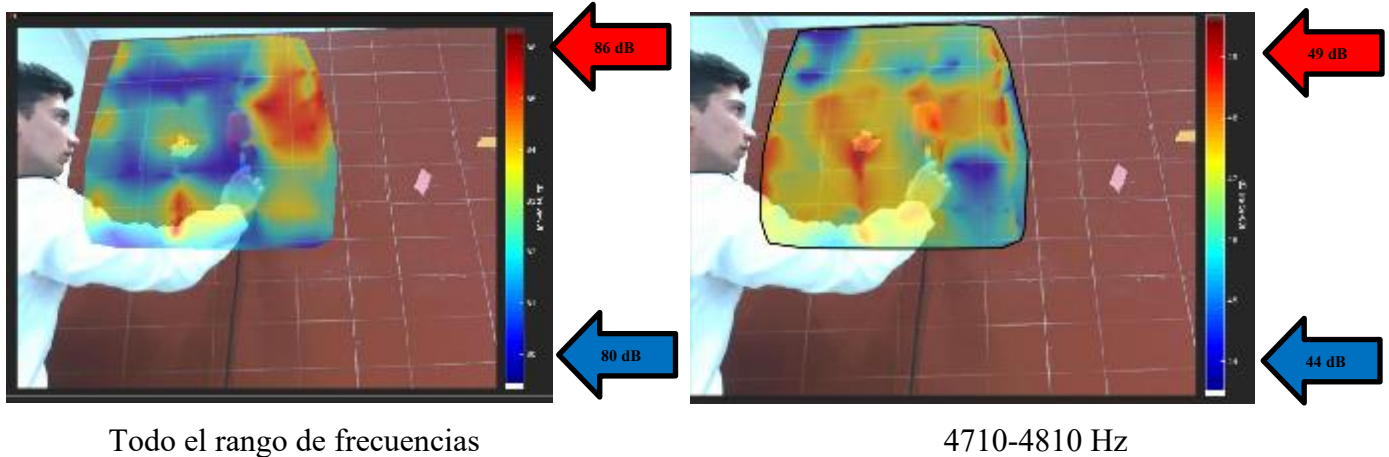


Figura 6-29 Mapas Acústicos del orificio de 8mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).

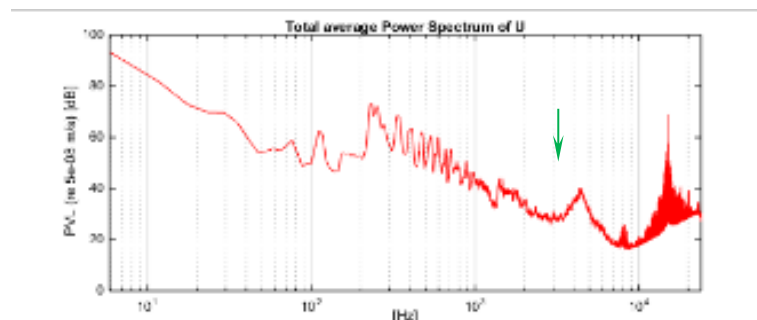


Figura 6-30 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En este ensayo, el mapa de todo el rango de frecuencias presenta valores entre 80 dB y 86 dB, mientras que en la banda acotada entre 4710 y 4810 Hz los valores se sitúan entre 44 dB y 49 dB. En la representación global se observan varias zonas activas dentro del área analizada, por lo que la lectura del defecto no resulta del todo clara. Sin embargo, al acotar el análisis en torno a 4,8 kHz, la respuesta en la zona del orificio tapado de 8 mm se aprecia con algo más de definición. Además, el espectro frecuencial muestra un pico apreciable en ese entorno de frecuencias, lo que da sentido a la banda seleccionada.

6.2.16 Análisis orificio de 10mm tapado a 105dB

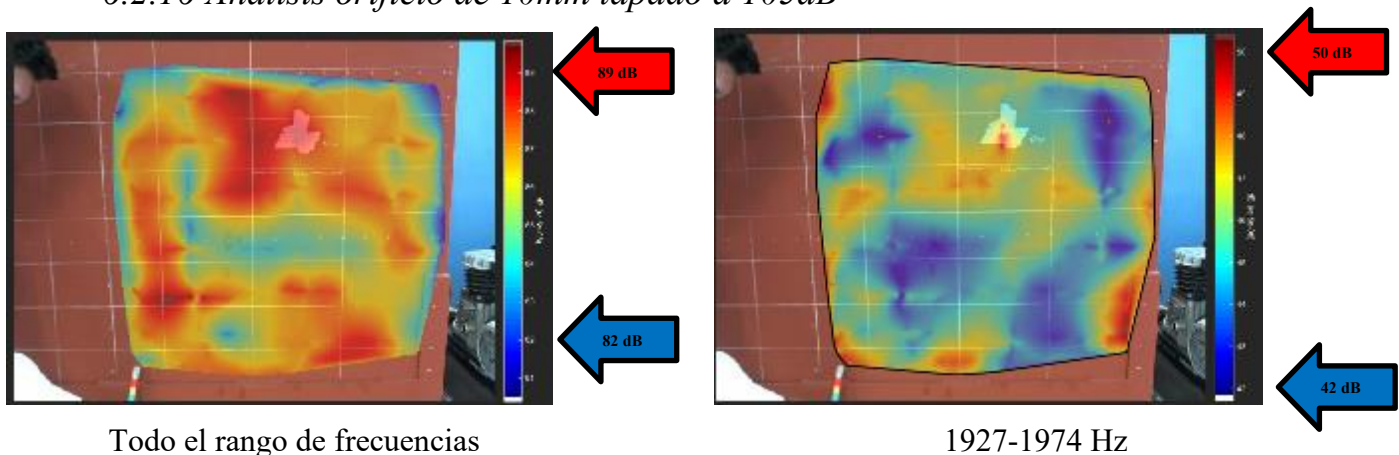


Figura 6-31 Mapas Acústicos del orificio de 10mm tapado a 105dB. (Elaboración propia).

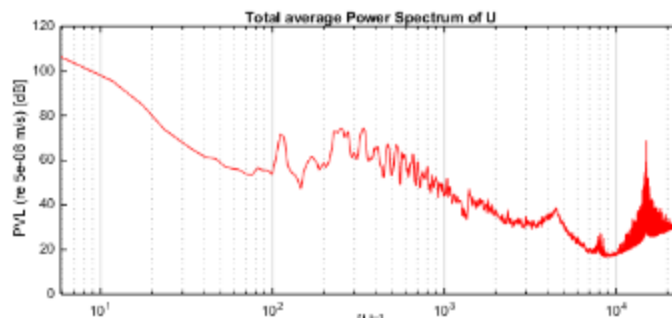


Figura 6-32 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En este ensayo, el mapa de todo el rango de frecuencias presenta valores entre 82 dB y 89 dB, mientras que en la banda acotada entre 1927 y 1974 Hz los valores se sitúan entre 42 dB y 50 dB. En la representación global la respuesta aparece bastante repartida por toda la superficie, por lo que no se distingue una zona concreta asociada al orificio tapado de 10 mm. Al acotar el análisis en torno a 1,9 kHz, el contraste mejora algo, pero la distribución sigue siendo demasiado difusa como para localizar el defecto con claridad. Además, el espectro frecuencial muestra una respuesta apreciable en ese entorno de frecuencias, lo que justifica la selección de la banda elegida. En conjunto, este ensayo no permite identificar de forma nítida la posición del orificio.

6.3 Correlación entre imágenes y mapas acústicos

Una vez analizados los mapas de *velocidad de partícula* obtenidos en los distintos ensayos, el siguiente paso es estudiar su correspondencia con la posición real de los poros practicados en la chapa. Para ello, se comparó la localización del agujero en la imagen del cajón de ensayos con la distribución espacial de intensidad mostrada en cada mapa acústico, valorando si la zona activa coincidía con la posición del defecto, si aparecía próxima a esta o si, por el contrario, no existía una relación clara entre ambas. Con este criterio, la correlación se clasificó de forma cualitativa en cuatro niveles: alta, cuando la zona principal del mapa coincidía claramente con la posición del agujero, media, cuando el defecto quedaba incluido dentro de una región activa, aunque no de forma aislada, baja, cuando la actividad aparecía próxima pero desplazada y nula, cuando no se apreciaba coincidencia espacial clara.

En los ensayos realizados sobre el orificio de 1,5 mm, la correlación entre la posición real del defecto y la distribución mostrada en los mapas acústicos fue, en general, baja o nula. En las configuraciones abiertas, al aumentar la excitación se obtuvo algo más de contraste en los mapas, pero la zona activa no coincidió siempre de forma directa con la posición del agujero. En algunos casos aparecieron zonas de

intensidad elevada alejadas del defecto y, en otros, el agujero quedaba dentro de una región activa sin llegar a destacar de forma aislada. En la condición tapada, la correlación fue nula, ya que no se observó una respuesta suficientemente clara como para relacionarla con la posición del defecto.

En el caso del orificio de 5 mm, la correlación fue más favorable. En los ensayos con el agujero abierto, la posición del defecto quedó incluida de forma más clara dentro de regiones de intensidad elevada, por lo que la correlación puede considerarse media. Aun así, la respuesta no apareció completamente aislada, ya que el mapa seguía mostrando otras zonas activas en la superficie barrida. En la condición tapada, la respuesta siguió siendo visible, pero con menor claridad que en abierto y con un carácter más extendido, por lo que la correlación también puede clasificarse como media, aunque menos marcada que en la condición abierta.

En los ensayos realizados sobre el orificio de 8 mm, la correlación entre la posición real del defecto y la respuesta mostrada en los mapas acústicos fue, en general, media o alta. En la condición abierta, el agujero quedó incluido de forma directa dentro de zonas de intensidad elevada, y en varios ensayos esa correspondencia se observó con bastante nitidez. Aunque seguían apareciendo otras zonas activas en el mapa, la relación entre la posición del defecto y la zona principal de respuesta fue más clara que en los diámetros menores. Por ello, en los ensayos abiertos de 8 mm la correlación puede considerarse entre media y alta. En la condición tapada, la respuesta siguió siendo visible en la zona del agujero, pero con menos claridad y con una distribución más extendida, por lo que en ese caso la correlación fue media.

En el caso del orificio de 10 mm, la correlación fue la más favorable de todos los diámetros estudiados. En los ensayos con el agujero abierto, la posición del defecto coincidió de forma directa con zonas de intensidad elevada bien definidas, por lo que la correlación puede considerarse alta. El defecto se apreciaba con mayor claridad que en los diámetros de 1,5 mm, 5 mm y 8 mm, y la respuesta del mapa resultó más fácil de relacionar con su posición real sobre la chapa. En la condición tapada, la zona del agujero siguió quedando dentro de una región activa, aunque con una respuesta más repartida y menos limpia que en abierto. Por ello, en esta situación la correlación puede clasificarse como media.

De manera general, la correlación entre la posición real del agujero y la respuesta mostrada en los mapas acústicos mejora al aumentar el diámetro del defecto. En los orificios pequeños la correspondencia fue baja o nula, mientras que en los diámetros mayores pasó a ser media o alta, especialmente en la condición abierta. Además, al tapar el agujero la correlación tendió a disminuir, ya que la respuesta del mapa se volvió menos clara y más extendida.

6.4 Evaluación comparativa de detectabilidad y resolución espacial

Con el fin de valorar de forma conjunta los resultados obtenidos mediante *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE*, se realizó una evaluación experimental de la detectabilidad de los poros y de la resolución espacial alcanzada por ambas técnicas. En este trabajo, esta evaluación se plantea como un análisis comparativo basado en la respuesta observada en los ensayos realizados sobre chapas con poros artificiales de distinto diámetro. Para ello, se tuvieron en cuenta tres aspectos principales: la claridad con la que el defecto aparecía en el mapa acústico, el grado de correlación entre la posición real del agujero y la zona activa del mapa, y la respuesta registrada con el sistema ultrasónico en función del estado del orificio y de la distancia de medida.

6.4.1 Detectabilidad de los poros

La detectabilidad de los poros mediante *Scan & Paint* mostró una dependencia clara con el diámetro del agujero. En los orificios de 1,5 mm, la respuesta fue débil y poco definida, por lo que la detectabilidad puede considerarse baja en la condición abierta y muy baja o nula en la condición tapada. En los ensayos de 5 mm, el agujero pasó a ser visible en los mapas, aunque sin aparecer completamente aislado, lo que permite clasificar su detectabilidad como media en abierto y media-baja en tapado. Para los diámetros de 8 mm y 10 mm, la respuesta fue claramente más favorable, ya que en la mayoría de los casos el

defecto quedó incluido dentro de una zona activa bien definida, por lo que la detectabilidad puede considerarse alta en abierto y media en tapado.

En el caso de *CARGO-SAFE*, la detectabilidad resultó también dependiente del tamaño del agujero y, sobre todo, de la distancia entre el receptor y el defecto. Los resultados mostraron que los valores más altos se obtenían cuando la medida se realizaba a 0 cm y 5 cm, mientras que a 15 cm y 20 cm la capacidad de discriminación disminuía. Además, en todos los diámetros las lecturas de los agujeros sin tapar fueron superiores a las de los tapados, lo que confirma que el sistema responde de forma sensible al estado real del defecto. En conjunto, esto indica que la técnica ultrasónica presenta una alta capacidad de comprobación localizada, especialmente cuando el receptor se sitúa en las proximidades del agujero.

6.4.2 Resolución espacial de las técnicas

La resolución espacial se ha valorado en este trabajo a partir de la capacidad de cada técnica para relacionar la respuesta registrada con una zona concreta de la chapa. En *Scan & Paint*, esta resolución depende de la claridad con la que el defecto queda representado dentro del mapa acústico. En los diámetros pequeños, la respuesta tendió a ser más difusa y a confundirse con otras regiones activas del mapa, lo que redujo la capacidad de localización. Sin embargo, a medida que aumentó el tamaño del orificio, la zona asociada al defecto apareció con más claridad, mejorando la resolución espacial del método. Esto fue especialmente evidente en los agujeros de 8 mm y 10 mm, donde la correlación entre el mapa y la posición real del defecto resultó media o alta.

En *CARGO-SAFE*, la resolución espacial no se basa en un mapa continuo de superficie, sino en la variación de la señal medida al acercar el receptor a la zona del defecto. Por ello, su resolución debe entenderse como una capacidad de confirmación puntual más que como una herramienta de visualización global. Aun así, los resultados mostraron que el sistema respondía de forma muy clara al aproximarse al agujero, lo que le da una alta capacidad para comprobar si una zona concreta presenta o no transmisión ultrasónica apreciable.

6.4.3 Comparación entre *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE*

La comparación entre ambas técnicas pone de manifiesto que cada una aporta un tipo de información diferente y complementaria. *Scan & Paint* permite obtener una visión continua de la superficie y localizar regiones activas sobre la chapa, lo que lo convierte en una herramienta útil para el cribado inicial y para la exploración global del comportamiento acústico. Por su parte, *CARGO-SAFE* ofrece una comprobación más directa y localizada, especialmente útil para verificar la existencia del defecto cuando el receptor se aproxima a la zona sospechosa. En la Tabla 4 podemos observar un resumen de la comparación de resultados entre *Scan and Paint* y *CARGO-SAFE*. Tabla 4 Comparación entre *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE*. (Elaboración propia).

Orificio	Condición	Scan & Paint	CARGO-SAFE
1,5 mm	Abierto	Nula / muy baja	Media
1,5 mm	Tapado	Nula / muy baja	Baja
5 mm	Abierto	Media	Media
5 mm	Tapado	Media-baja	Media-baja
8 mm	Abierto	Alta	Alta
8 mm	Tapado	Media	Media
10 mm	Abierto	Alta	Alta
10 mm	Tapado	Media	Media

Tabla 4 Comparación entre Scan & Paint y CARGO-SAFE. (Elaboración propia).

6.5 Análisis del tiempo de inspección y eficiencia operativa

Además de comparar la respuesta de ambas técnicas frente a los poros ensayados, también se valoró su comportamiento desde un punto de vista práctico, teniendo en cuenta el tiempo necesario para preparar los equipos, realizar la medida y obtener un resultado útil. Este análisis resulta importante porque el interés del método híbrido no depende solo de la capacidad de detección, sino también de la viabilidad real de aplicar cada técnica en una campaña de inspección.

En los ensayos realizados con Scan & Paint, la preparación inicial del sistema requería aproximadamente 10 minutos, incluyendo el encendido del ordenador, la conexión de la cámara y de los accesorios, la puesta en marcha del transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y la apertura de la aplicación de medida. Una vez preparado el equipo, el tiempo necesario para realizar un barrido normal sobre la chapa era de alrededor de 1 minuto, aunque este valor podía variar ligeramente en función del tamaño de la zona estudiada. Sin embargo, la parte más lenta del procedimiento no era la adquisición del vídeo, sino su procesamiento posterior.

El tratamiento de los ensayos con Scan & Paint fue la fase más costosa en tiempo. Una vez realizado el barrido, era necesario identificar correctamente el sensor en la imagen y procesar la región medida para generar el mapa acústico. Cuando la detección del color del sensor por parte del programa funcionaba bien, el tiempo de procesamiento podía situarse en torno a 7 minutos. No obstante, cuando la iluminación no era adecuada o el contraste dificultaba la detección automática, era necesario corregir muchos puntos de forma manual, lo que podía elevar fácilmente este tiempo a 15 minutos o más. A esto se añadía el tiempo empleado en revisar el espectro y recorrer distintas zonas del rango frecuencial para

localizar aquella en la que el defecto se apreciaba mejor, proceso que podía requerir entre 5 y 10 minutos adicionales, siendo más largo en los casos en que la respuesta era menos clara.

En consecuencia, el tiempo total necesario para obtener un resultado útil con Scan & Paint podía situarse, de forma aproximada, entre 15 y 25 minutos por ensayo, e incluso ser mayor en los casos más problemáticos. Esta situación fue especialmente evidente en los ensayos del orificio de 1,5 mm, que fue el diámetro que más repeticiones necesitó debido a la dificultad para obtener una respuesta clara y estable. En cambio, los agujeros de 8 mm y 10 mm respondieron de forma más favorable desde los primeros intentos, lo que redujo el número de repeticiones necesarias y facilitó el análisis.

En los ensayos con *CARGO-SAFE*, la preparación del sistema fue más sencilla. El procedimiento consistía en encender el transmisor, colocarlo en el interior del cajón de ensayos a través del orificio superior y dejarlo inicialmente en modo de espera. Después, con el receptor, se ajustaba la referencia del 100 % OHV con el cajón de ensayos abierto y, una vez cerrada la tapa, el transmisor se activaba desde el propio receptor para comenzar la medida. Con el procedimiento ya conocido, esta fase de preparación podía completarse también en torno a 10 minutos, aunque el trabajo resultó más directo y menos dependiente de ajustes finos que en el caso de *Scan & Paint*.

Una vez preparado el sistema, la toma de datos con *CARGO-SAFE* era más rápida y sistemática. Para cada agujero, primero se tomaba una lectura de referencia en una zona sana y, a continuación, se realizaban mediciones en radios de 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm y 0 cm alrededor del defecto, anotando los valores correspondientes. Este proceso requería aproximadamente 10 minutos por agujero, incluyendo la medida, la anotación de resultados y el cambio entre radios. Después, el agujero se tapaba y se repetía el mismo procedimiento. Por tanto, aunque la preparación inicial era comparable en duración a la de Scan & Paint, la fase de medida resultó claramente más ágil y repetible.

Desde el punto de vista operativo, *CARGO-SAFE* fue la técnica más rápida y cómoda de utilizar. Una vez colocado el transmisor y fijada la referencia inicial, el resto del ensayo consistía principalmente en medir y registrar datos, con una secuencia de trabajo clara y repetitiva. En cambio, Scan & Paint presentó una mayor sensibilidad a factores externos, como la iluminación, la correcta detección visual del sensor, la necesidad de revisar numerosas bandas del espectro y la posible aparición de resultados ambiguos, lo que obligaba en ocasiones a repetir ensayos o a dedicar más tiempo a su interpretación. Por ello, aunque Scan & Paint aporta una visión continua de la superficie, su empleo resultó más exigente desde el punto de vista del tiempo y del tratamiento posterior de los datos.

De forma global, los ensayos mostraron que Scan & Paint requiere un tiempo de dedicación mayor que *CARGO-SAFE*, principalmente debido al procesado posterior de los vídeos, a la posible corrección manual de la trayectoria del sensor y a la búsqueda de las bandas de frecuencia más representativas. Por el contrario, el procedimiento con *CARGO-SAFE* resultó más ágil y directo una vez fijada la referencia inicial, ya que la adquisición y anotación de las lecturas pudo realizarse de forma más sistemática.

7 DISCUSIÓN Y APLICABILIDAD OPERATIVA

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten interpretar el método propuesto como un sistema de inspección híbrido, en el que cada técnica cumple una función distinta. En este contexto, *Scan & Paint* no debe entenderse como un sustituto de los ultrasonidos, sino como una herramienta de cribado previo capaz de señalar zonas sospechosas sobre la superficie. A partir de esa información, la inspección ultrasónica puede centrarse en áreas concretas para comprobar la presencia del defecto y aportar una confirmación más directa.

7.1 Ventajas del método híbrido propuesto

La principal ventaja del método híbrido planteado es que combina dos técnicas con características complementarias. Los ensayos realizados muestran que *Scan & Paint* resulta útil para recorrer superficies amplias y poner de manifiesto zonas activas o con comportamiento anómalo, mientras que *CARGO-SAFE* permite comprobar con mayor claridad la presencia del defecto cuando la medida se realiza en sus proximidades. Desde este punto de vista, el método híbrido mejora la lógica de inspección, ya que evita depender exclusivamente de una técnica continua, pero a veces ambigua o de una técnica con una lectura más directa sobre el entorno del orificio.

Otra ventaja importante es que el enfoque híbrido se adapta bien a los resultados obtenidos en la campaña experimental. En los diámetros pequeños, especialmente en el caso de 1,5 mm, los mapas acústicos no siempre mostraron una respuesta clara, mientras que la técnica ultrasónica sí proporcionó una señal más interpretable a corta distancia. En cambio, en los diámetros mayores, como 8 mm y 10 mm, los mapas de velocidad de partícula ofrecieron una localización más clara del defecto y, además, los resultados ultrasónicos confirmaron una respuesta elevada en la misma configuración. Esto indica que la combinación de ambas técnicas permite trabajar con mayor robustez frente a situaciones muy distintas, desde poros apenas visibles en el mapa hasta anomalías que aparecen de forma directa en ambas medidas.

Desde el punto de vista operativo, la combinación también presenta interés. Los ensayos mostraron que *Scan & Paint* requiere más tiempo de procesamiento y análisis, pero ofrece una visión continua de la superficie. Por el contrario, *CARGO-SAFE* resulta más directo, rápido y cómodo de utilizar una vez ajustada la referencia inicial. En consecuencia, el método híbrido permite aprovechar las ventajas de ambas técnicas, una herramienta más rica desde el punto de vista espacial y otra más ágil para la verificación puntual. Por ello, el valor principal de la propuesta no está en sustituir una técnica por la otra, sino en utilizarlas de manera graduada dentro de un mismo proceso de inspección.

7.2 Limitaciones del estudio

A pesar del interés de los resultados, el trabajo presenta varias limitaciones que deben tenerse en cuenta. La más importante está relacionada con el propio banco experimental. La chapa ensayada no representa una estructura naval real completa, sino un modelo simplificado montado sobre un cajón metálico con cavidad interna, rigidizadores y excitación acústica interior. Esta configuración favorece la aparición de modos de cavidad y modos estructurales de la placa, que pueden dominar la respuesta del mapa y dificultar la identificación limpia del defecto. Por tanto, en este banco la técnica acústica no siempre refleja solo el efecto local del agujero, sino también el comportamiento global del sistema.

Otra limitación importante está relacionada con la complejidad del banco experimental y con la variabilidad propia de este tipo de ensayos. Por ello, en este trabajo la capacidad de detección se ha valorado a partir del comportamiento experimental observado en cada configuración, atendiendo a la claridad del mapa acústico, a la correlación con la posición real del defecto y a la comparación con la respuesta ultrasónica registrada con *CARGO-SAFE*. De este modo, la evaluación se apoya directamente en la evidencia experimental obtenida durante la campaña de ensayos.

También debe tenerse en cuenta que el uso de ruido rosa como excitación genera una respuesta amplia del sistema, en la que intervienen simultáneamente la cavidad interior y los modos estructurales de la chapa. Esto ayuda a explicar que, en algunos ensayos, los mapas presentasen patrones extendidos y no una respuesta local claramente asociada al defecto.

7.3 Aplicación potencial en inspecciones reales de buques

En una inspección real de casco, los defectos de interés no se limitan a poros aislados, sino que incluyen también pérdidas de espesor por corrosión, picaduras, grietas, defectos en soldaduras y zonas estructuralmente debilitadas. En ese contexto, los ultrasonidos siguen siendo una de las técnicas más útiles, ya que permiten medir espesores y detectar discontinuidades internas con precisión, algo especialmente importante en estructuras navales sometidas a corrosión y desgaste a lo largo del servicio.

A la vista de los resultados obtenidos en este trabajo, la técnica basada en mapas de velocidad de partícula no debe plantearse como un sustituto directo de los ultrasonidos en una inspección real de buques. En el banco ensayado se ha comprobado que la respuesta acústica puede verse influida no solo por el defecto, sino también por la dinámica global de la chapa, la cavidad interior y la presencia de rigidizadores, lo que en algunos casos dificulta una localización limpia del agujero. Por ello, su aplicación más razonable sería como herramienta de cribado preliminar, capaz de señalar zonas donde la respuesta de la superficie se aparta del comportamiento general y donde pueda ser conveniente realizar una inspección más detallada.

Desde esta perspectiva, el interés del método propuesto estaría en ayudar a priorizar áreas de inspección, especialmente cuando se trabaja sobre superficies amplias. Una vez identificadas esas zonas sospechosas mediante el cribado acústico, la inspección ultrasónica podría concentrarse en ellas para comprobar si existe realmente una discontinuidad, una pérdida de espesor o un defecto localizado.

Además, los resultados del presente estudio sugieren que la respuesta acústica mejora cuando aumenta la entidad del defecto, ya que los mapas obtenidos fueron más claros en los agujeros de mayor diámetro. A partir de esta tendencia, puede plantearse que la técnica podría comportarse de forma más favorable ante alteraciones de mayor extensión o con una influencia más marcada sobre la respuesta estructural de la chapa, como podría ocurrir en zonas corroídas o debilitadas. No obstante, esta posibilidad no se ha validado en el presente trabajo y debería comprobarse en estudios futuros sobre cajones de ensayo más representativos de una estructura real. En consecuencia, la aplicación potencial del método en un casco de buque debe entenderse, por ahora, como una herramienta de apoyo a la inspección y no como un método principal de diagnóstico.

7.4 Integración en protocolos de mantenimiento de la Armada

La posible integración del método híbrido propuesto en un protocolo de mantenimiento de la Armada debe plantearse de forma complementaria y no como sustitución de los procedimientos actuales. De acuerdo con la organización oficial de la Armada, la Dirección de Sostenimiento y, dentro de ella, la Subdirección de Mantenimiento General, dirigen y controlan el mantenimiento preventivo, correctivo y de modificación durante la fase de servicio de buques y sistemas, con el objetivo de mantener la Fuerza en el debido nivel de seguridad y eficacia. Además, en la estimación oficial de costes de operación y servicio de plataformas navales se sigue considerando como parte del mantenimiento programado la inspección del casco y sus apéndices y la toma de espesores, lo que confirma que la verificación estructural del casco ya forma parte de los procesos normales de sostenimiento. [39], [40]

En este contexto, los resultados del presente trabajo no permiten proponer Scan & Paint como una técnica principal de diagnóstico estructural para el casco, ni tampoco como sustituto de las mediciones ultrasónicas de espesor o de los procedimientos de inspección ya establecidos. Lo que sí sugieren es una posible utilidad como herramienta de apoyo en una fase previa de exploración, especialmente para señalar zonas donde la respuesta vibroacústica de la chapa se aparta del comportamiento general. A partir de esa primera información, la inspección ultrasónica podría concentrarse en las regiones más sospechosas para comprobar si existe realmente un defecto, una pérdida de espesor o una alteración local del comportamiento estructural.[40]

Este planteamiento también resulta coherente con la evolución reciente del sostenimiento en la Armada hacia enfoques más próximos al mantenimiento basado en condición y al uso de análisis de datos para apoyar la toma de decisiones. La propia Armada indica que el CESADAR, dependiente funcionalmente de la Dirección de Sostenimiento, tiene como propósito principal apoyar el mantenimiento predictivo de los activos embarcados, digitalizando soluciones, optimizando acciones de mantenimiento y aumentando la fiabilidad de los sistemas. En consecuencia, aunque el trabajo realizado aquí se centra en un cajón de ensayos simplificado y en una aplicación todavía experimental, el enfoque híbrido sí es compatible con esa tendencia general: añadir una capa de información previa que ayude a decidir dónde merece la pena aplicar después una inspección más precisa.[39]

Ahora bien, para que una integración de este tipo llegase a ser útil en un entorno real de la Armada, primero sería necesario validar mejor el método en condiciones más representativas. En una estructura de casco real, la presencia de corrosión, soldaduras, rigidizadores, curvatura, recubrimientos y condiciones de acceso más exigentes haría que la interpretación de los mapas fuese todavía más compleja que en el banco ensayado. Por ello, una integración inmediata en protocolos operativos reales no sería justificable con los resultados actuales. Lo que sí puede defenderse es que el método apunta a una línea de desarrollo interesante como herramienta de apoyo al mantenimiento, siempre que se siga investigando sobre bancos más representativos y sobre defectos de tipo más cercano a los que aparecen en servicio, como pérdidas de espesor o corrosión localizada.

8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8.1 Conclusiones generales

El trabajo realizado permite reflejar las siguientes conclusiones generales:

i) A partir de la campaña experimental realizada sobre la chapa de acero con poros artificiales, puede concluirse que la combinación de *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE* constituye una aproximación válida y coherente para el estudio de defectos localizados en chapas metálicas. El trabajo no demuestra que ambas técnicas sean equivalentes ni que una pueda sustituir por completo a la otra, sino que cada una aporta una información distinta y que su mayor interés aparece cuando se emplean de forma complementaria dentro de un mismo planteamiento de inspección. Aunque los dos métodos permiten recorrer de forma continua la superficie ensayada, la naturaleza de la respuesta obtenida no es la misma. *Scan & Paint* proporciona una representación espacial global mediante mapas acústicos de velocidad de partícula, útil para visualizar zonas activas y analizar cómo se distribuye la respuesta sobre la superficie, mientras que *CARGO-SAFE* ofrece una lectura ultrasónica más directa y más fácilmente interpretable cuando el recorrido pasa por el entorno del defecto.

ii) Los resultados obtenidos muestran además que la detectabilidad depende de forma clara del tamaño del orificio, de su estado abierto o tapado y del tipo de respuesta ofrecida por cada técnica. En los ensayos con *Scan & Paint*, los defectos de menor diámetro, especialmente el orificio de 1,5 mm, dieron lugar a respuestas débiles, difusas o poco correlacionadas espacialmente con su posición real, mientras que en los orificios de 8 mm y 10 mm la presencia del defecto se reflejó con bastante más claridad en los mapas acústicos. En la condición tapada, la respuesta tendió a reducirse, lo que confirma que el sellado disminuye el contraste espacial asociado al poro, aunque en los diámetros mayores siguió siendo posible apreciar actividad en bandas concretas de frecuencia. Por su parte, los ensayos con *CARGO-SAFE* mostraron una respuesta más clara y consistente cuando el barrido pasaba cerca del defecto, así como una mejor capacidad de discriminación entre agujeros abiertos y tapados, especialmente en las medidas realizadas en las posiciones más próximas.

iii) En conjunto, el trabajo no permite afirmar que la técnica basada en mapas de velocidad de partícula pueda sustituir por sí sola a los ultrasonidos en la inspección de chapas navales. Sin embargo, sí permite sostener una conclusión más útil y realista: el valor del método híbrido reside en integrar dos formas distintas de analizar una misma superficie. *Scan & Paint* aporta una visión global del comportamiento acústico y facilita la identificación de regiones de interés sobre la chapa, mientras que *CARGO-SAFE* permite seguir la variación de la respuesta ultrasónica de forma continua con una lectura más robusta del defecto cuando el recorrido atraviesa su entorno. Desde este punto de vista, la

combinación de ambas metodologías refuerza el diagnóstico, mejora la interpretación de los resultados y ofrece una base experimental razonable para futuras estrategias de inspección orientadas al mantenimiento predictivo, a la priorización de zonas críticas y al desarrollo de protocolos más completos de evaluación estructural en el ámbito naval.

8.2 Grado de cumplimiento de los objetivos

A la vista del trabajo realizado, el grado de cumplimiento de los objetivos no puede valorarse de forma uniforme, porque no todos se han alcanzado con la misma profundidad ni con el mismo nivel de desarrollo. Aun así, en términos generales sí puede decirse que el estudio ha permitido construir una base experimental útil para analizar la complementariedad entre *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE* en la detección de poros artificiales en chapas metálicas. Eso, sin duda, supone un avance relevante. Ahora bien, también conviene reconocer con claridad que los objetivos relacionados con la identificación de pérdidas de espesor no han podido cumplirse plenamente.

i) En cuanto al *objetivo general*, centrado en desarrollar y validar un método híbrido de inspección no destructiva basado en la combinación de ensayos por ultrasonidos y técnicas de acústica avanzada para la detección de poros y pérdidas de espesor en chapas navales, puede considerarse cumplido solo de forma parcial. El método híbrido sí ha llegado a plantearse, aplicarse y ponerse a prueba experimentalmente en el estudio de poros artificiales, lo que ha permitido comparar la respuesta de ambas técnicas y valorar hasta qué punto se complementan. Sin embargo, no se puede afirmar que el método ha quedado validado en su totalidad para pérdidas de espesor, ya que esa parte del trabajo, por circunstancias del propio ensayo, no pudo desarrollarse en el cajón finalmente utilizado.

ii) El *primer objetivo específico*, orientado a analizar la problemática asociada a la aparición de poros localizados de interés naval, puede considerarse cumplido. El trabajo recoge el marco teórico necesario para entender la relevancia estructural de este tipo de defectos, su impacto desde la perspectiva del mantenimiento predictivo y la necesidad de recurrir a técnicas de inspección no destructiva adaptadas al contexto naval. En ese sentido, la base conceptual del estudio sí ha quedado bien asentada.

iii) El *segundo objetivo específico*, relativo al diseño y ejecución de una campaña experimental en laboratorio sobre un cajón de ensayos metálico con poros controlados, también puede darse por cumplido. Se ha desarrollado una campaña real, con distintos diámetros de orificio, condiciones de abierto y tapado, y aplicación de ambas técnicas de medida sobre una misma configuración. Eso ha permitido trabajar con un conjunto de resultados suficientemente sólido como para sostener el análisis comparativo posterior.

iv) El *tercer objetivo específico*, centrado en obtener y analizar mapas acústicos de velocidad de partícula mediante *Scan & Paint* y medidas ultrasónicas mediante *CARGO-SAFE*, puede considerarse igualmente cumplido. A lo largo del trabajo se han registrado, procesado e interpretado mapas acústicos correspondientes a diferentes configuraciones de ensayo, al mismo tiempo que se han analizado las respuestas obtenidas con *CARGO-SAFE* en función del diámetro del orificio, el estado del poro y la proximidad de la medida.

v) El *cuarto objetivo específico*, dirigido a estudiar la correlación entre los resultados de ambas técnicas y valorar su complementariedad y coherencia diagnóstica, puede considerarse cumplido de forma satisfactoria. El análisis experimental ha puesto de manifiesto que *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE* no ofrecen exactamente la misma clase de respuesta, pero sí dos miradas que, al combinarse, enriquecen mucho la interpretación. *Scan & Paint* ha resultado especialmente útil para visualizar cómo se distribuye la respuesta acústica sobre la superficie, mientras que *CARGO-SAFE* ha ofrecido una lectura más clara en los recorridos próximos al defecto. En ese punto, quizá esté una de las aportaciones más interesantes del trabajo: haber podido justificar, con resultados propios, que el planteamiento híbrido tiene sentido.

vi) El *quinto objetivo específico*, referido a realizar una evaluación comparativa de la detectabilidad, la resolución espacial y el tiempo de inspección de ambas técnicas, puede considerarse cumplido parcialmente. La comparación de la detectabilidad sí se ha abordado de forma experimental, y los resultados han permitido comprobar cómo influyen el tamaño del orificio y su estado sobre la respuesta de ambas metodologías. Sin embargo, esta comparación debe interpretarse con cierta prudencia. Más que una validación cerrada o definitiva, lo que ofrece este trabajo es una primera aproximación experimental, útil y reveladora, pero todavía condicionada por las limitaciones concretas del estudio.

Puede afirmarse que el TFG ha cumplido de manera satisfactoria los objetivos relacionados con el estudio experimental de poros artificiales y con la comparación entre *Scan & Paint* y *CARGO-SAFE*, aunque solo de forma parcial el objetivo general inicialmente planteado, al no haberse podido desarrollar la parte correspondiente a pérdidas de espesor. Por eso, el principal resultado del trabajo no debe entenderse como la validación completa de un método híbrido para poros y adelgazamientos, sino más bien como la construcción de una base experimental sólida y útil para defender la complementariedad de ambas técnicas en la detección de poros localizados y para orientar futuras campañas de ensayo más completas y ambiciosas.

8.3 Aportaciones del Trabajo Fin de Grado

La principal aportación de este Trabajo Fin de Grado es haber desarrollado un caso experimental propio en el que se combinan dos técnicas de inspección no destructiva sobre un mismo cajón de ensayos metálico con poros controlados. Esta aportación tiene valor porque permite pasar de una comparación teórica entre técnicas a una evaluación práctica de su comportamiento sobre una configuración real de laboratorio.

Otra aportación importante es la elaboración de una matriz organizada de ensayos y de un conjunto de fichas individuales que permiten trazar la respuesta de cada configuración experimental. Esto permite dejar una base útil para futuras campañas, facilitando la repetición de ensayos y la comparación entre resultados.

Asimismo, el trabajo aporta una interpretación aplicada del uso de *Scan & Paint* en un contexto distinto al de la localización clásica de fuentes acústicas, orientándolo hacia la detección de cambios locales en la respuesta de una chapa metálica. Aunque los resultados muestran limitaciones en poros pequeños, también ponen de manifiesto que la técnica puede aportar información espacial útil cuando el defecto tiene una entidad mayor o cuando se integra dentro de una estrategia híbrida. Desde esta perspectiva, la aportación del TFG no está en haber demostrado una solución cerrada, sino en haber construido un punto de partida sólido para seguir desarrollando el método.

8.4 Líneas futuras de investigación y mejora del método

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones que han ido apareciendo durante la campaña experimental, se abren varias líneas futuras de trabajo que podrían mejorar de forma notable tanto el método empleado como el alcance real del estudio:

i) La primera, y probablemente una de las más necesarias, pasa por perfeccionar el banco experimental para reducir la influencia de la cavidad interior y de la vibración global de la chapa. Durante los ensayos se ha visto que parte de la respuesta del sistema no depende solo del defecto, sino también del propio comportamiento del cajón como conjunto. Por eso, una mejora especialmente interesante sería revestir el interior con material absorbente en varias caras y controlar mejor el cierre de la abertura superior. Con ello se reducirían las resonancias internas, se ganaría repetibilidad y, en definitiva, se trabajaría sobre un sistema menos condicionado por efectos ajenos al defecto que realmente se quiere estudiar.

ii) En esa misma línea, también sería importante desacoplar la fuente acústica de la estructura metálica. Si el altavoz apoya directamente sobre el cajón o sobre la chapa, una parte de la respuesta

registrada puede deberse a vibración mecánica transmitida por contacto, y no únicamente al campo acústico generado en el interior. Ese matiz, que puede parecer pequeño, cambia bastante la interpretación de los resultados. Por ello, en futuros trabajos sería recomendable suspender la fuente o montarla sobre elementos elásticos que limiten esa transmisión directa. Así, la excitación del sistema dependería principalmente del campo sonoro interior y no del contacto mecánico con la estructura, lo que haría el ensayo más limpio y fiable.

iii) Otra línea de mejora bastante clara consiste en introducir una excitación más controlada. En este trabajo se ha empleado ruido rosa, que ha resultado útil como punto de partida, pero en campañas posteriores sería muy interesante trabajar con bandas seleccionadas o con barridos más dirigidos. Eso permitiría reducir el peso de ciertas resonancias dominantes y comparar de manera más sistemática la respuesta entre agujeros abiertos y sellados. Además, ayudaría a centrar el análisis en aquellas zonas del espectro donde el defecto realmente destaca, en lugar de repartir la atención sobre un rango amplio donde a veces la información útil queda diluida.

iv) Por último, otra línea futura sería incorporar de forma experimental el estudio de pérdidas de espesor. Para ello sería necesario modificar el banco de ensayos y realizar el fresado de la chapa o del cajón empleado, de manera que pudiesen generarse reducciones de espesor controladas y comparables. Esta parte no ha podido desarrollarse en el presente trabajo por falta de medios, por lo que el estudio ha quedado limitado a poros pasantes. En futuras campañas, disponer de este tipo de configuración permitiría ampliar el alcance del método y evaluar su comportamiento frente a defectos más próximos a los que aparecen en estructuras navales reales.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Ok, «The effects of corrosions and fatigue induced cracks on strength degradation in ageing ships», Thesis, Newcastle University, 2006. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/129>
- [2] M. Jakubowski, «Influence of pitting corrosion on strength of steel ships and offshore structures», *Pol. Marit. Res.*, vol. 18, n.º 4, pp. 54-58, ene. 2012, doi: 10.2478/v10012-011-0027-6.
- [3] «International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-%28solas%29%2C-1974.aspx>
- [4] «Ship Design and Stability». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/shipdesignandstability-default.aspx>
- [5] «NDT in Transportation - Vehicle, Rail & Marine Safety». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.asnt.org/what-is-nondestructive-testing/industries/transportation>
- [6] «Ultrasonic Testing (UT): PAUT, TOFD & NDT Inspection Techniques». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.asnt.org/what-is-nondestructive-testing/methods/ultrasonic-testing>
- [7] «Marine corrosion diagnosis - TWI». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/media-and-events/insights/marine-corrosion-diagnosis>
- [8] «NDE - Liquid Penetrant and Magnetic Particle Inspection - TWI». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/non-destructive-examination-nde-part-1-liquid-penetrant-and-magnetic-particle-inspection-122>
- [9] «Radiography Testing - NDT Inspection». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/radiography-testing.aspx>
- [10] «Ultrasonic examination in Non-Destructive Examination (NDE)». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-ultrasonic-examination-in-non-destructive-examination-nde.aspx>
- [11] «Predictive Maintenance, IBM Research Zurich». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.zurich.ibm.com/predictivemaintenance/>

- [12] «What is Predictive Maintenance? | IBM». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/think/topics/predictive-maintenance>
- [13] «ISO 16810:2024», ISO. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/86362.html>
- [14] «ISO 17640:2017», ISO. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/69611.html>
- [15] «About us», Safer and Cleaner Shipping - IACS. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://iacs.flumeserver.co.za/about-us/>
- [16] «An Introduction to Ultrasonic Thickness Gauging». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ims.evidentscientific.com/en/applications/introductory-ultrasonics/introduction-thickness-gauging>
- [17] «2.5 Wave Front Dynamics | Evident». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ims.evidentscientific.com/en/learn/ndt-tutorials/flaw-detection/wave-front>
- [18] «5.2 Angle Beam Inspection | Evident». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ims.evidentscientific.com/en/learn/ndt-tutorials/flaw-detection/weld-inspection>
- [19] «Medición de espesores en buques y plataformas». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://spain.apave.com/es-ES/Nuestras-lineas-de-actividad-/Inspeccion-reglamentaria/Naval/Medicion-de-espesores-en-buques-y-plataformas>
- [20] «Navantia avanza en el desarrollo de tecnologías 4.0 aplicadas en subbloques y en eólica marina», Navantia. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/actualidad/notas-prensa/navantia-avanza-en-el-desarrollo-de-tecnologias-4-0-aplicadas-en-subbloques-y-en-eolica-marina/>
- [21] P. P. Urone y R. Hinrichs, «13.1 Types of Waves - Physics | OpenStax». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://openstax.org/books/physics/pages/13-1-types-of-waves>
- [22] «Introduction to the Governing Equations and Scope of Acoustics». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/multiphysics/acoustics>
- [23] «Sound | Properties, Types, & Facts | Britannica». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/sound-physics>
- [24] P. P. Urone y R. Hinrichs, «14.1 Speed of Sound, Frequency, and Wavelength - Physics | OpenStax». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://openstax.org/books/physics/pages/14-1-speed-of-sound-frequency-and-wavelength>
- [25] W. Moebs, S. J. Ling, y J. Sanny, «17.3 Sound Intensity - University Physics Volume 1 | OpenStax». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-3-sound-intensity>
- [26] «Sound - Decibel, Frequency, Amplitude | Britannica». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/sound-physics/The-decibel-scale>
- [27] «Noise-Induced Hearing Loss Signs | Healthy Schools | CDC». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/healthyschools/noise/signs.htm
- [28] «How Does Sound Travel? | Waves, Speed, Frequency, & Amplitude | Britannica». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/How-Does-Sound-Travel>
- [29] «Sound intensity | Decibels, Waveforms & Pressure | Britannica». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/sound-intensity>

- [30] «PU regular GEN2», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/standard-probes/pu-regular-gen2>
- [31] «Particle Velocity Sensors», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/acoustic-particle-velocity-sensors>
- [32] «High-Resolution Acoustic Imaging System | Scan&Paint 2D», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/sound-localization-systems/scan-paint-2d>
- [33] «Scan and Paint: theory and practice of a sound field visualization method», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/resources/scientific-papers/scan-and-paint-theory-and-practice>
- [34] «MFPA-2», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/pre-amplifiers-frontends/mfpa-2>
- [35] D. Fernandez Comesana, «Scan-based sound visualisation methods using sound pressure and particle velocity», phd, University of Southampton, 2014. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://eprints.soton.ac.uk/366935/>
- [36] «Troubleshooting and noise mapping of a large gas compressor», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/case-studies/troubleshooting-and-noise-mapping-of-a-large-gas-compressor>
- [37] «Scan & Paint for acoustic leakage inside the car», Microflown. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/resources/scientific-papers/scan-paint-for-acoustic-leakage-inside-the-car>
- [38] C. Manager, «CARGO-SAFE | Ultrasonic Hatch Cover Tester | Class Instrumentation», Class Instrumentation Ltd. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.classltd.com/cargo-safe-ultrasonic-hatch-cover-tester/>
- [39] Armada, «Dirección de Sostenimiento (DISOS) - Organización - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosorganizacion/prefLang-es/04Apoyofuerza--02jal--02disos>
- [40] «Estimaciones del coste de la fase de operación y servicio de una plataforma naval a lo largo del ciclo de obtención - CESEDEN - Liferay DXP», CESEDEN. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.gob.es/ceseden/-/estimaciones-coste-fase-operacion-servicio-plataforma-naval-articulo>

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 no es solo una exigencia técnica, sino una responsabilidad directa con las personas que trabajan a bordo. Una perforación pequeña, casi imperceptible en una primera inspección, puede terminar comprometiendo la resistencia del casco y derivar en una situación mucho más seria de lo que parecía al principio. Detectar este tipo de anomalías con antelación permite adelantarse al problema y evitar incidentes que podrían poner en riesgo a la dotación, a la propia embarcación y al entorno en el que opera. Además, el empleo de técnicas acústicas avanzadas aporta una ventaja nada menor: permite realizar evaluaciones sin afectar de forma drástica a la operatividad del buque y reduce la exposición de los inspectores a zonas complejas o potencialmente peligrosas, algo que también repercute de forma positiva en su seguridad y en sus condiciones de trabajo.

Desde el punto de vista económico e industrial, este trabajo refuerza una idea que hoy resulta casi inevitable en cualquier sistema técnico exigente: es mucho más eficiente anticiparse al fallo que reaccionar cuando el problema ya se ha producido. Detectar un defecto a tiempo evita reparaciones de emergencia, que suelen ser bastante más costosas, y reduce las paradas no previstas, con todo lo que eso implica en términos de retrasos, reorganización y pérdida de disponibilidad. Un enfoque de mantenimiento predictivo, apoyado por herramientas como *Scan & Paint* y complementado con técnicas como *CARGO-SAFE*, permite planificar mejor las intervenciones y actuar en el momento más conveniente, en lugar de hacerlo bajo presión y con menos margen de maniobra. Al final, esto se traduce en un uso más racional de los recursos, en una mayor vida útil de las estructuras y en una mejora de la fiabilidad operativa. Y eso, en un sector como el naval, tiene un peso económico evidente.

En el plano ambiental, la repercusión también es clara. Un mantenimiento más atento y anticipativo reducen la probabilidad de fallos estructurales repentinos que puedan acabar provocando vertidos, filtraciones o situaciones con impacto contaminante. Al mismo tiempo, afinar mejor la detección permite intervenir solo donde realmente hace falta, evitando reparaciones innecesarias, exceso de material sustituido y generación adicional de residuos. En otras palabras, inspeccionar mejor no solo ayuda a proteger la estructura, también ayuda a actuar con más criterio y con un impacto ambiental menor. Aunque pueda parecer un efecto indirecto, en realidad forma parte del valor real que tienen este tipo de metodologías cuando se piensa en una aplicación práctica a medio y largo plazo.

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, aparece de forma bastante clara una dimensión que va más allá de lo puramente técnico. Aunque el núcleo del estudio se sitúa en el uso del software *Scan & Paint* para localizar pequeñas aberturas en superficies metálicas, especialmente dentro de un contexto naval, el sentido último del trabajo conecta de lleno con cuestiones de seguridad, responsabilidad profesional y compromiso social. Al final, no se trata solo de medir mejor, sino de entender para qué y para quién se mide.

La posibilidad de localizar de forma temprana un orificio en una estructura como el casco de un buque no puede entenderse únicamente como un avance instrumental o metodológico. En realidad, supone anticiparse a riesgos que, si no se detectan a tiempo, pueden desembocar en consecuencias serias: entradas de agua, pérdida de estanqueidad, deterioro estructural progresivo o situaciones que comprometan la seguridad de la embarcación y de quienes van a bordo. Ahí es donde aparece con más fuerza la reflexión ética de este trabajo. Detrás de cada mapa acústico, de cada señal interpretada y de cada decisión tomada durante el análisis, hay una posible aplicación real. Y eso obliga a asumir que la ingeniería no trabaja en el vacío: lo que se ensaya en laboratorio puede terminar teniendo un efecto directo en escenarios donde están en juego la seguridad, la operatividad e incluso la vida humana.

También hay una dimensión ética en la forma de plantear el propio trabajo. Ser riguroso en la interpretación de los resultados, reconocer las limitaciones del método y no atribuir a una técnica más capacidad de la que realmente ha demostrado son cuestiones que forman parte de la responsabilidad del ingeniero. En este sentido, el proyecto no solo ha buscado obtener resultados, sino también tratarlos con honestidad, distinguiendo con claridad entre lo que ha podido demostrarse y lo que todavía requiere más estudio. Esa prudencia, aunque a veces reste rotundidad, también es una forma de compromiso ético.

Desde el punto de vista social, el uso de herramientas de este tipo abre además la puerta a procedimientos de inspección más ágiles, más organizados y, en ciertos casos, menos invasivos. Eso puede traducirse en mejores condiciones de trabajo para el personal encargado del mantenimiento, en una mayor tranquilidad para las dotaciones embarcadas y en una reducción del impacto que tienen los fallos estructurales imprevistos sobre la operación del buque. En el fondo, avanzar en este tipo de técnicas no solo significa mejorar un proceso de diagnóstico, también significa contribuir a una navegación más segura, a una gestión más responsable del mantenimiento y a una ingeniería más conectada con las personas a las que sirve.

ANEXO III: FICHAS DE ENSAYO

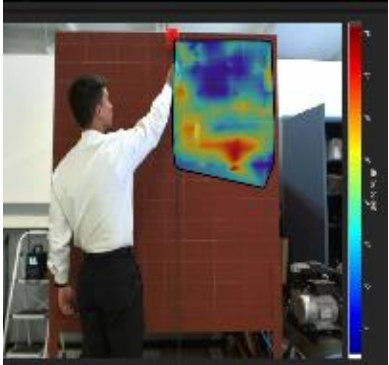
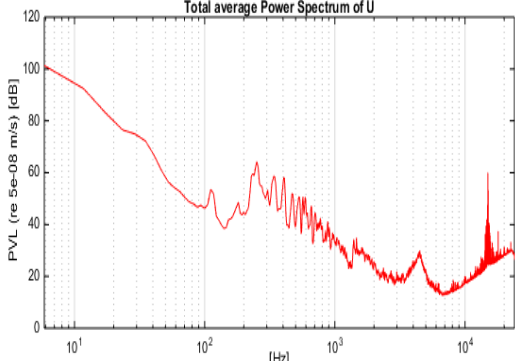
En este anexo se incluyen las fichas correspondientes a todos los ensayos desarrollados durante la fase experimental en laboratorio. Con el fin de facilitar su consulta y organización, se ha elaborado una matriz que reúne el conjunto de pruebas realizadas, clasificándolas en función del diámetro del orificio, de su estado (abierto o tapado) y del nivel de potencia de emisión empleado en el transmisor durante cada ensayo. Esta disposición permite obtener una visión general y ordenada de todos los ensayos llevados a cabo.

Tamaño Agujero / Estado	1,5mm	5mm	8mm	10mm
Sin Tapar a 95dB	#EN01	#EN04	#EN07	#EN10
Sin Tapar a 100dB	#EN02	#EN05	#EN08	#EN11
Sin Tapar a 105dB	#EN03	#EN06	#EN09	#EN12
Tapado a 105dB	#EN13	#EN14	#EN15	#EN16
CARGO-SAFE Sin Tapar	#CS01	#CS03	#CS05	#CS07
CARGO-SAFE Tapado	#CS02	#CS04	#CS06	#CS08

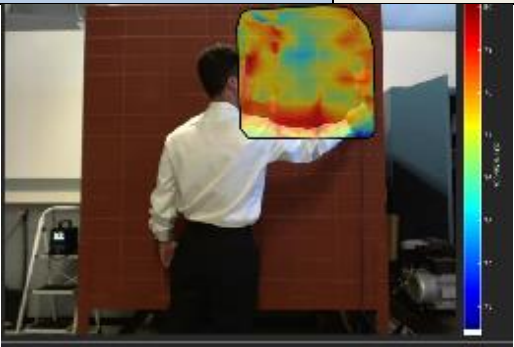
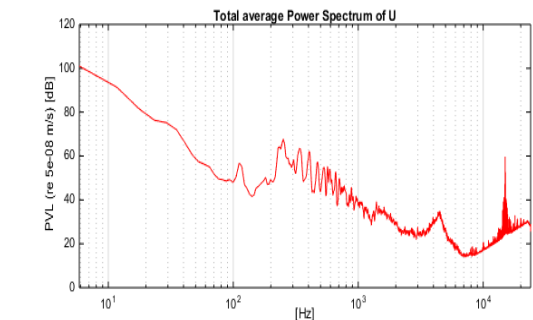
Tabla 5 Matriz de ensayos Scan & Paint. (Elaboración propia).

Tamaño Agujero / Estado	1,5mm	5mm	8mm	10mm
Sin Tapar a 20 cm	38	38	45	50
Sin Tapar a 15 cm	40	43	50	52
Sin Tapar a 10 cm	45	49	60	71
Sin Tapar a 5 cm	65	79	85	90
Sin Tapar a 0 cm	93	99	99	99
Tapado a 20 cm	32	33	33	33
Tapado a 15 cm	32	35	37	38
Tapado a 10 cm	35	40	42	46
Tapado a 5 cm	37	45	50	55
Tapado a 0 cm	45	58	66	75

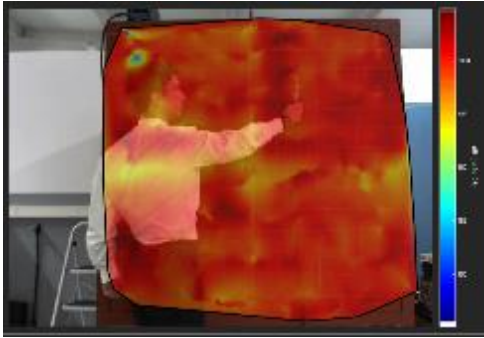
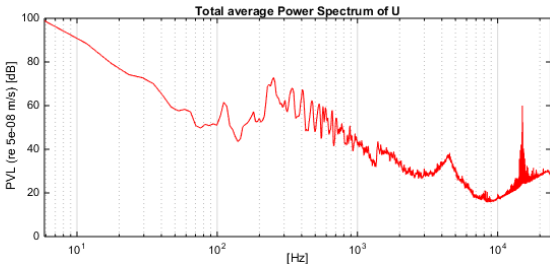
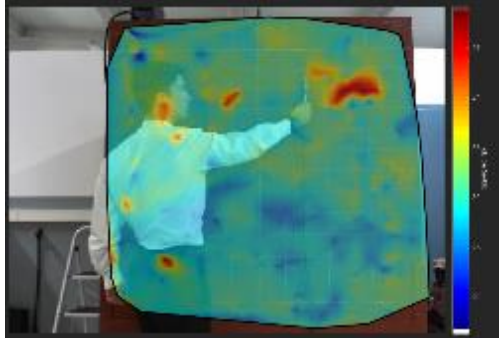
Tabla 6 Matriz de ensayos CARGO-SAFE (BASE = 30% OHV). (Elaboración propia).

CÓDIGO ENSAYO: EN01 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 1,5mm SIN TAPAR A 95dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-1 Chapa metálica con orificio de 1,5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-2 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa detrás de la superficie atenuado a -25dB. La sonda PU se desliza justo por encima del agujero.
 Figura 0-3 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-4 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)

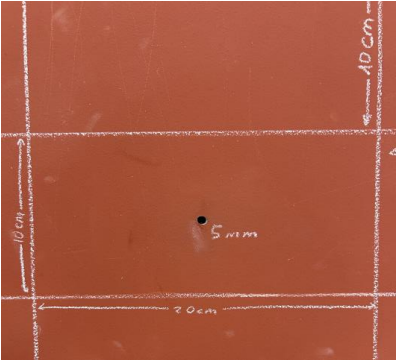
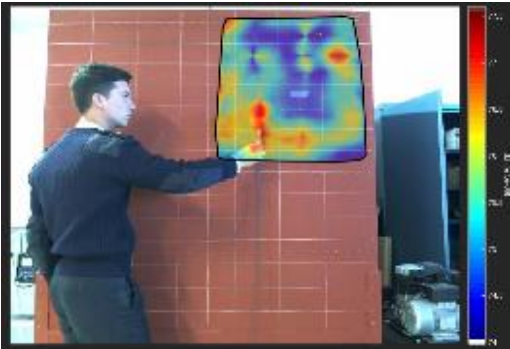
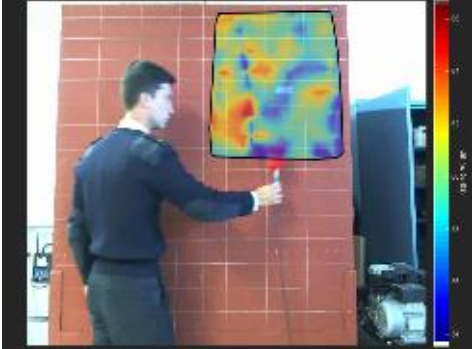
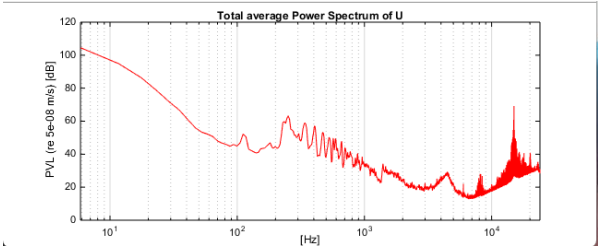
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial se sitúa entre el valor mínimo (71 dB) y el valor máximo (78 dB), es decir, 7 dB. En esta ficha no se ha considerado un mapa acotado adicional, ya que la respuesta obtenida no mejoraba la localización del orificio y no aportaba una interpretación más fiable.

CÓDIGO ENSAYO: EN02 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 1,5mm SIN TAPAR A 100dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-5 Chapa metálica con orificio de 1,5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-6 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa detrás de la superficie atenuado a -20dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-7 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-8 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)

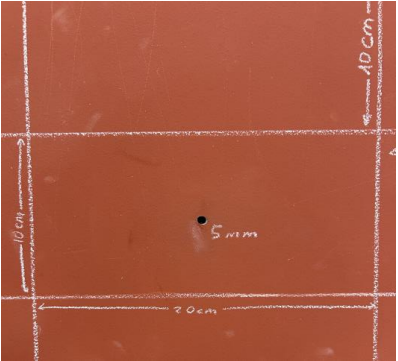
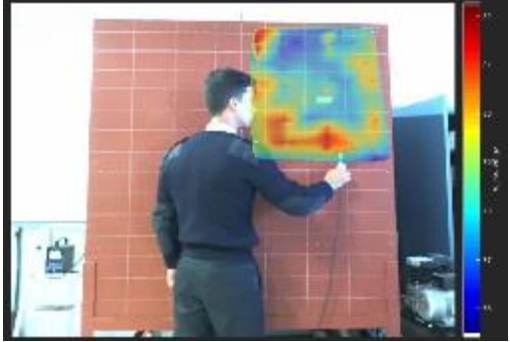
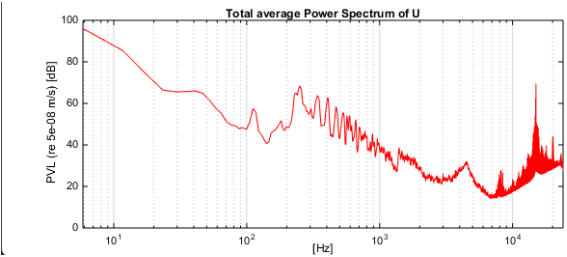
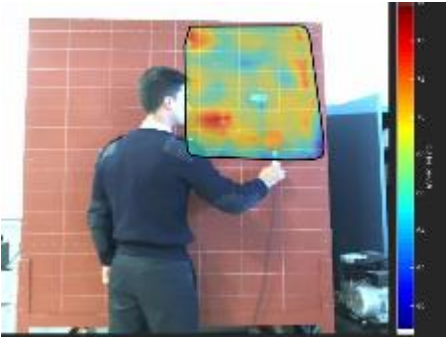
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial se sitúa entre el valor mínimo (74 dB) y el valor máximo (80 dB), lo que supone una diferencia de 6 dB. En esta configuración tampoco se ha considerado un mapa acotado adicional, ya que no ofrecía una mejora clara en la detección del orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN03 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 1,5mm SIN TAPAR A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-9 Chapa metálica con orificio de 1,5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-10 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm, con el altavoz emitiendo ruido rosa detrás de la superficie atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-11 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura 0-13 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura 0-12 Mapa Acústico entre 8700-8800 Hz (Elaboración propia)

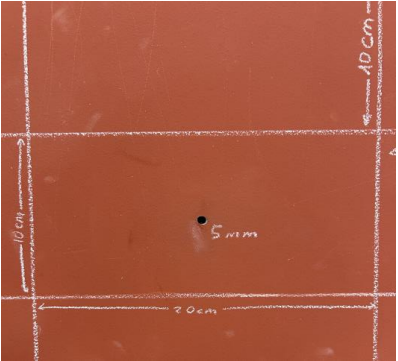
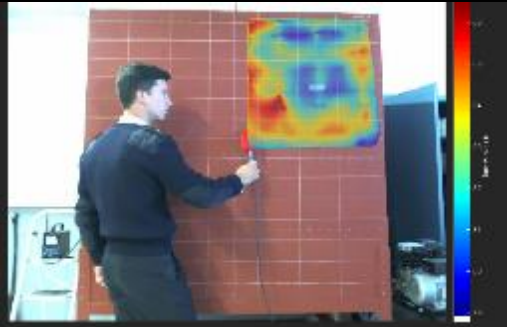
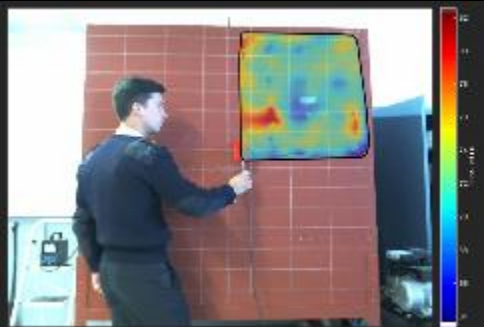
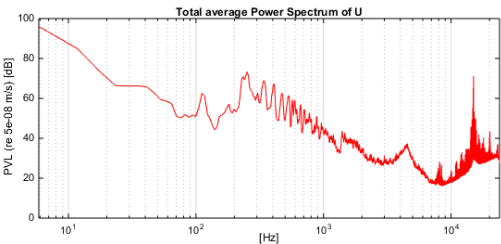
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (85 dB) hasta el valor máximo (103 dB), lo que supone una diferencia de 18 dB. Este contraste es amplio en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 8700 y 8800 Hz, los valores se sitúan entre 24 dB y 48 dB, por lo que el rango dinámico es de 24 dB. En esta banda, el contraste resulta aún más favorable, aunque esa mejora no se traduce en una localización completamente definida del orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN04 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 5mm SIN TAPAR A 95dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-14 Chapa metálica con orificio de 5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-15 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm pasando por encima. (Elaboración propia).
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 5 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -25dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-16 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-17 Mapa Acústico entre 200-230 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-18 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

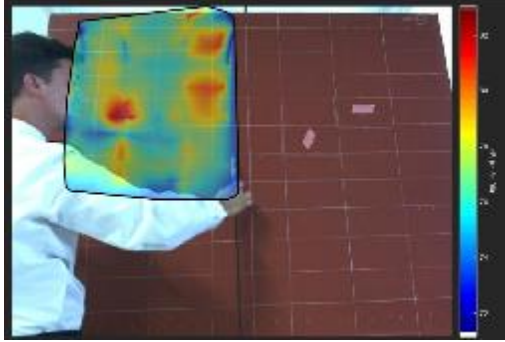
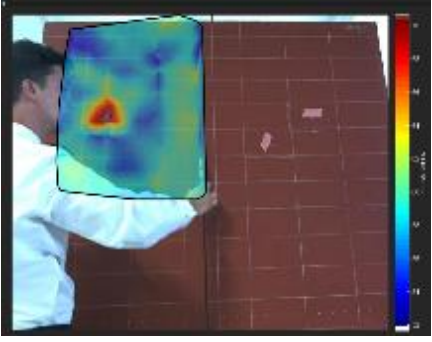
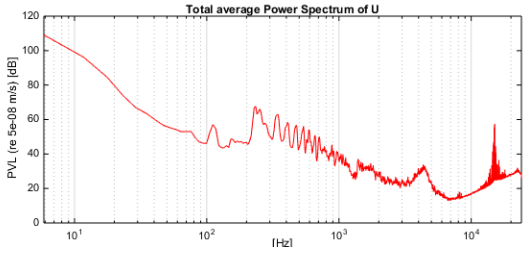
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (74,5 dB) hasta el valor máximo (77 dB), lo que supone una diferencia de 2,5 dB. Este contraste es reducido en la representación global y limita la lectura del mapa. Por otro lado, en el mapa acotado entre 200 y 230 Hz, los valores se sitúan entre 54 dB y 66 dB, por lo que el rango dinámico es de 12 dB. En esta banda, el contraste mejora de forma clara, aunque la localización del orificio sigue siendo solo moderadamente definida.

CÓDIGO ENSAYO: EN05 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 5mm SIN TAPAR A 100dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-19 Chapa metálica con orificio de 5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-20 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 5 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -20dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-21 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura 0-23 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura 0-22 Mapa Acústico entre 200-240 Hz (Elaboración propia)

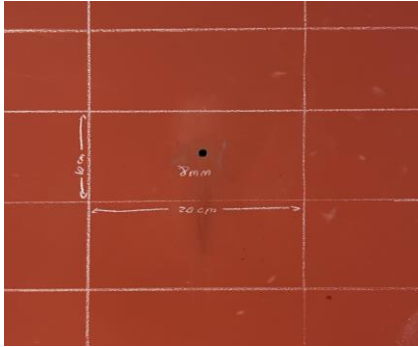
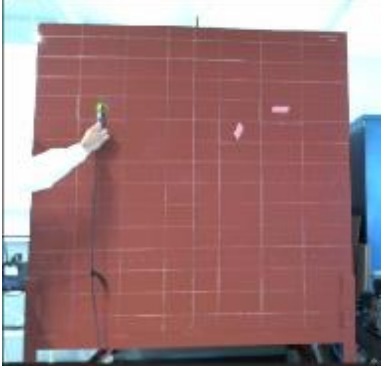
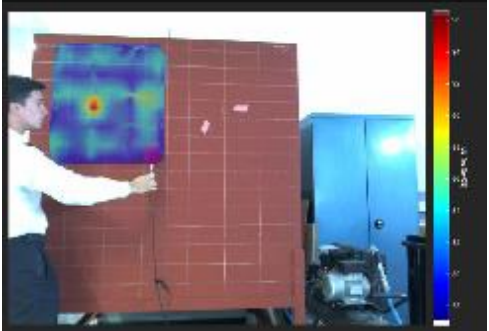
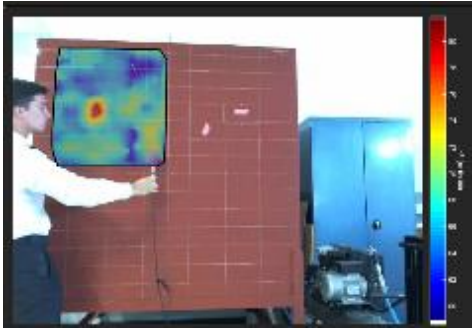
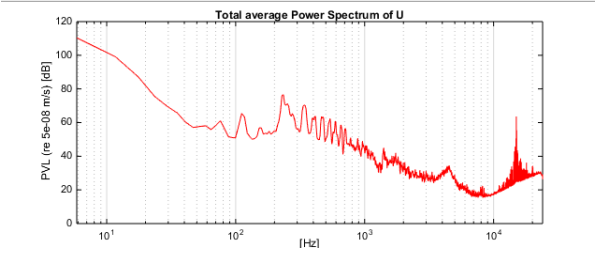
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (76 dB) hasta el valor máximo (81 dB), lo que supone una diferencia de 5 dB. Este contraste es reducido en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 200 y 240 Hz, los valores se sitúan entre 64 dB y 76 dB, por lo que el rango dinámico es de 12 dB. En esta banda, el contraste mejora de forma clara, lo que favorece una interpretación más útil de la zona asociada al orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN06 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 5mm SIN TAPAR A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-24 Chapa metálica con orificio de 5 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-25 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 5 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-26 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-27 Mapa Acústico entre 200-240 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-28 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

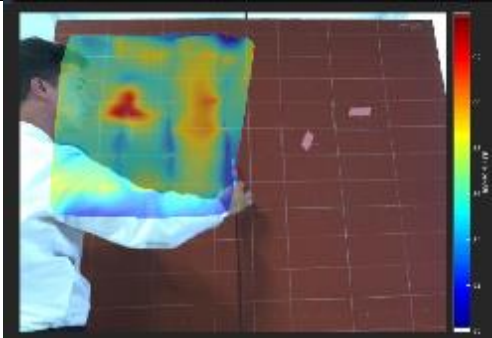
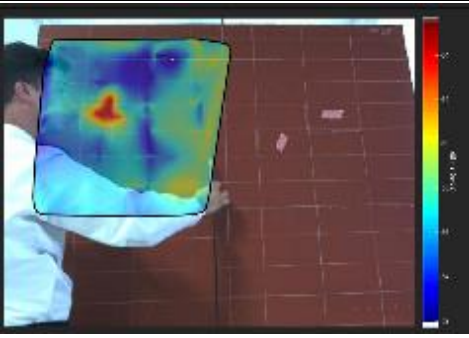
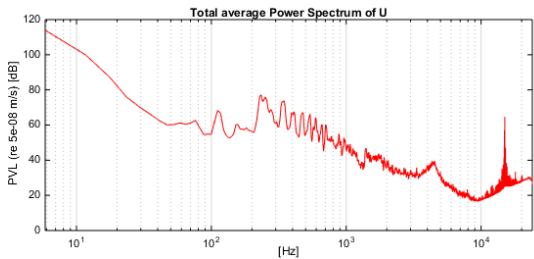
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (50 dB) hasta el valor máximo (56 dB), lo que supone una diferencia de 6 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 200 y 240 Hz, los valores se sitúan entre 68 dB y 82 dB, por lo que el rango dinámico es de 14 dB. En esta banda, el contraste resulta más favorable y permite una lectura más clara de la respuesta del orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN07 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 95dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-29 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-30 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm pasando por encima. (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 atenuado a -25dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-31 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-32 Mapa Acústico entre 416-463 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-33 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

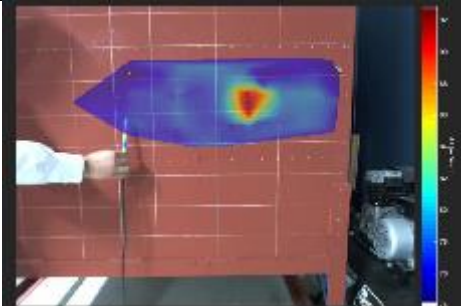
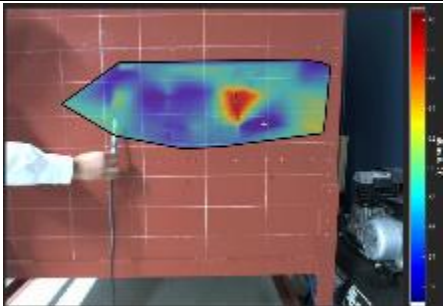
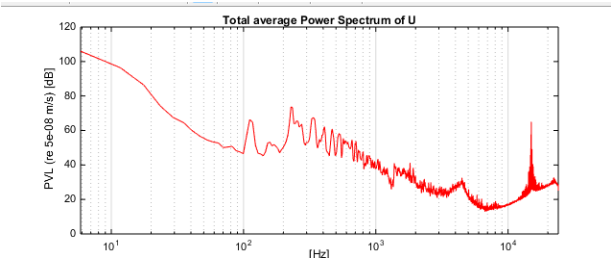
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (74 dB) hasta el valor máximo (81 dB), lo que supone una diferencia de 7 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 416 y 463 Hz, los valores se sitúan entre 56 dB y 70 dB, por lo que el rango dinámico es de 14 dB. En esta banda, el contraste mejora y hace más evidente la respuesta asociada al orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN08 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 100dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-34 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-35 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm pasando por encima. (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 atenuado a -20dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-36 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-37 Mapa Acústico entre 430-480 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-38 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

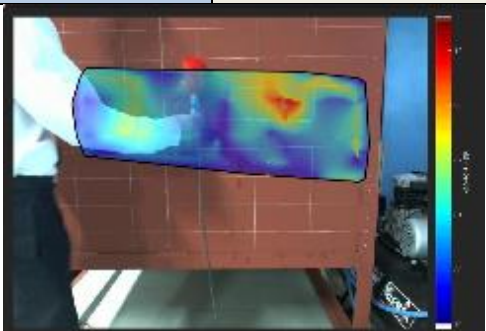
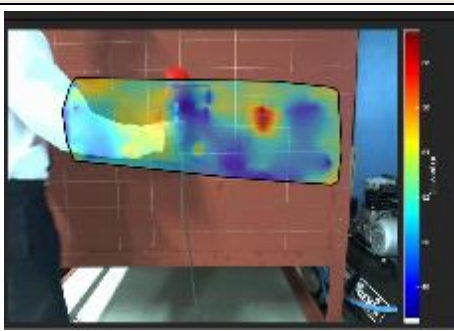
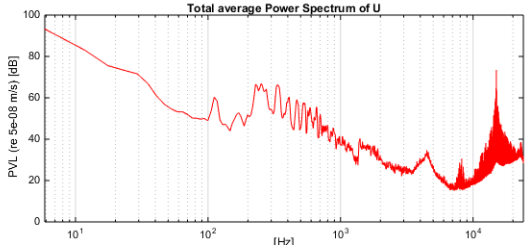
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (78 dB) hasta el valor máximo (96 dB), lo que supone una diferencia de 18 dB. Este contraste es amplio en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 430 y 480 Hz, los valores se sitúan entre 60 dB y 82 dB, por lo que el rango dinámico es de 22 dB. En esta banda, el contraste resulta aún más favorable y refuerza la interpretación espacial del orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN09 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 8mm SIN TAPAR A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-39 Chapa metálica con orificio de 8 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-40 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm pasando por encima. (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 atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-41 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-42 Mapa Acústico entre 808-855 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-43 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

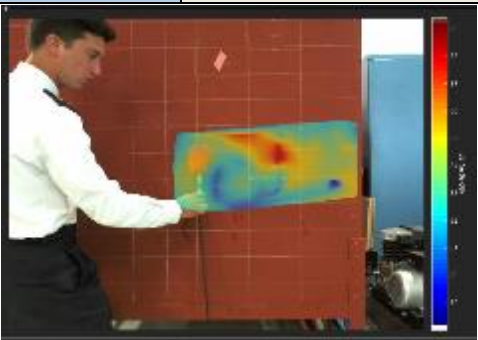
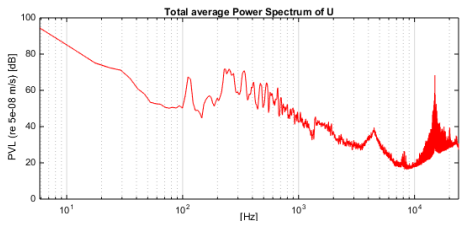
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (82 dB) hasta el valor máximo (94 dB), lo que supone una diferencia de 12 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 808 y 855 Hz, los valores se sitúan entre 52 dB y 66 dB, por lo que el rango dinámico es de 14 dB. En esta banda, el contraste mejora, aunque sin aportar una diferencia tan marcada como en el ensayo anterior.

CÓDIGO ENSAYO: EN10 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 10 mm SIN TAPAR A 95dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-44 Chapa metálica con orificio de 10 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-45 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 10 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -25dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-46 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-47 Mapa Acústico entre 662-709 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-48 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

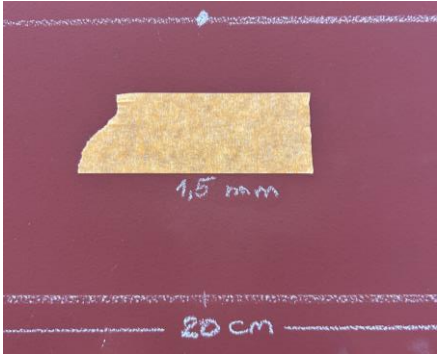
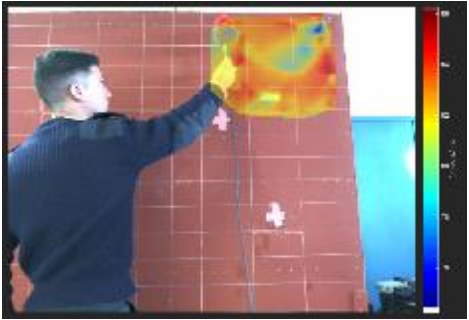
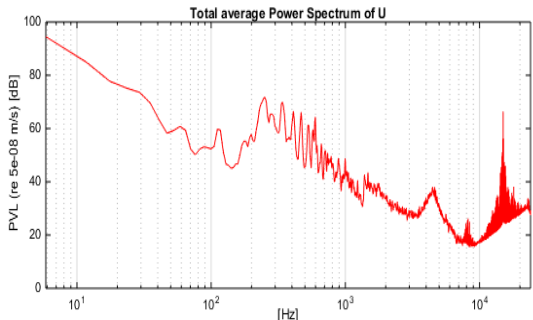
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (76 dB) hasta el valor máximo (92 dB), lo que supone una diferencia de 16 dB. Este contraste es amplio en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 662 y 709 Hz, los valores se sitúan entre 52 dB y 70 dB, por lo que el rango dinámico es de 18 dB. En esta banda, el contraste mejora ligeramente y contribuye a una lectura más limpia del orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN11 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 10mm SIN TAPAR A 100dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-49 Chapa metálica con orificio de 10 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-50 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 10 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -20dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-51 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-52 Mapa Acústico entre 879-926 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-53 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

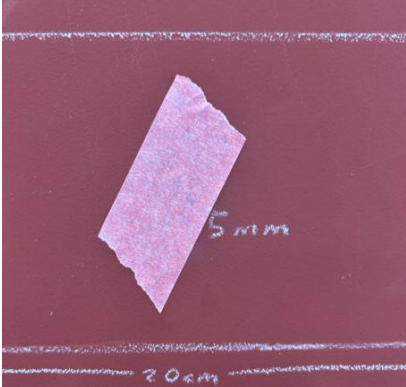
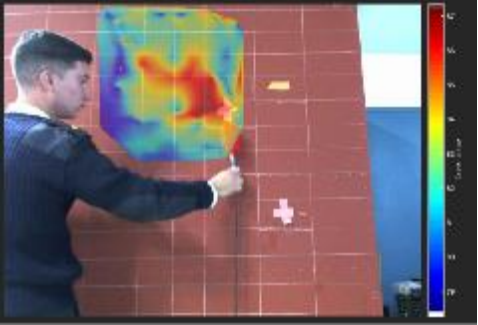
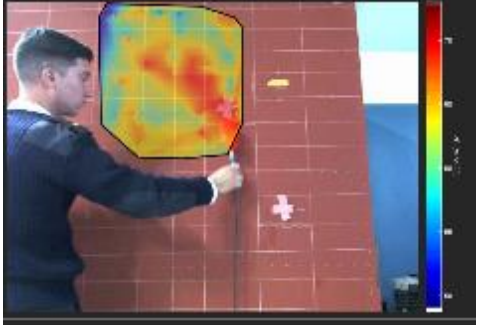
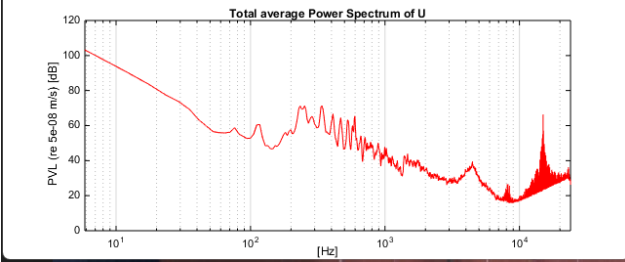
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (80 dB) hasta el valor máximo (84 dB), lo que supone una diferencia de 4 dB. Este contraste es reducido en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 879 y 926 Hz, los valores se sitúan entre 48 dB y 60 dB, por lo que el rango dinámico es de 12 dB. En esta banda, el contraste mejora de forma apreciable, lo que favorece la identificación del orificio frente a la representación global.

CÓDIGO ENSAYO: EN12 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO 10 mm SIN TAPAR A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-54 Chapa metálica con orificio de 10 mm perforado en el centro. (Elaboración propia)	 Figura 0-55 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10 mm pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 10 mm permanece sin tapar, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-56 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura 0-58 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura 0-57 Mapa Acústico entre 1277-1324 Hz (Elaboración propia)

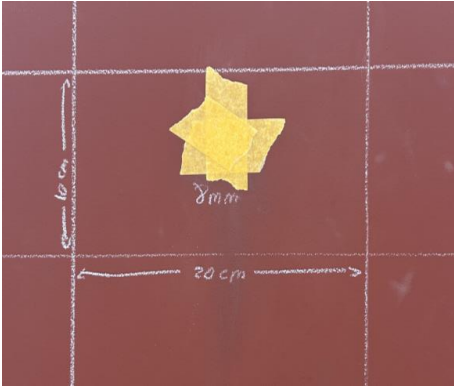
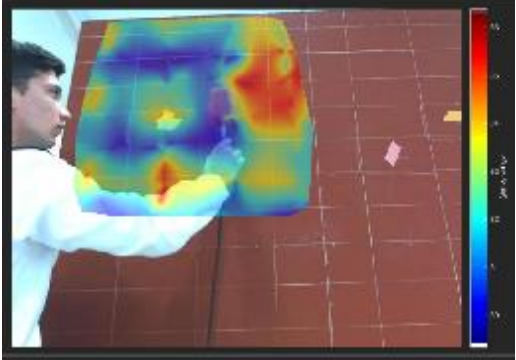
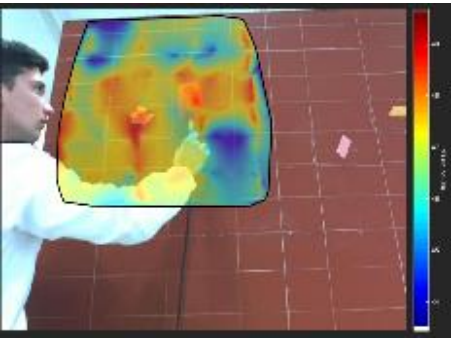
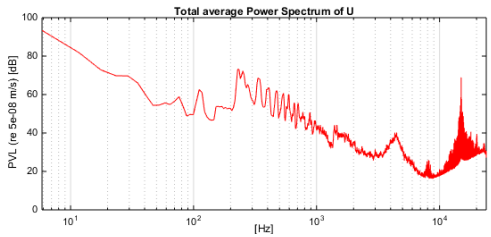
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (79 dB) hasta el valor máximo (89 dB), lo que supone una diferencia de 10 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 1277 y 1324 Hz, los valores se sitúan entre 38 dB y 52 dB, por lo que el rango dinámico es de 14 dB. En esta banda, el contraste es más favorable y permite distinguir con mayor claridad la zona asociada al orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN13 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 1,5mm TAPADO A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-59 Chapa metálica con orificio de 1,5mm tapado. (Elaboración propia)	 Figura 0-60 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 1,5mm permanece tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-61 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-62 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)

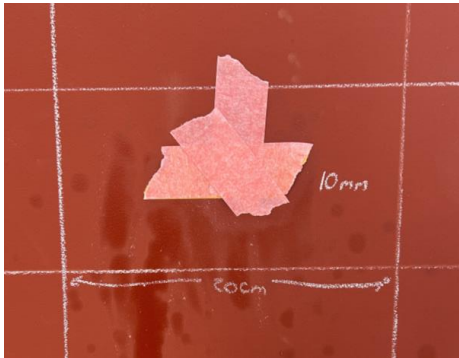
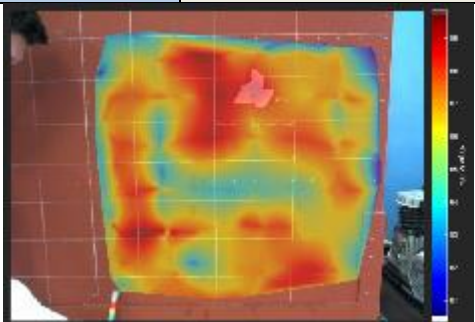
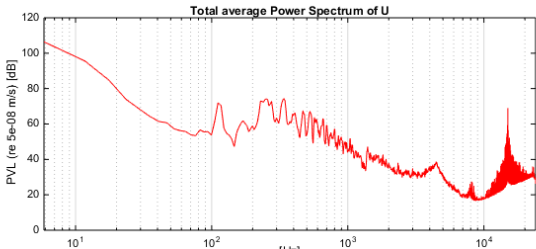
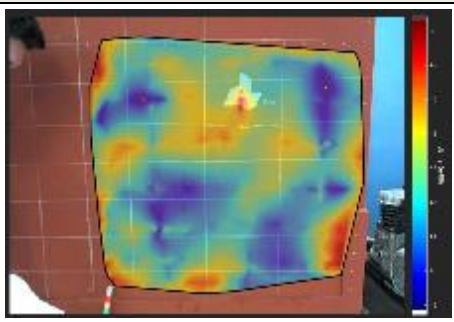
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (26 dB) hasta el valor máximo (38 dB), lo que supone una diferencia de 12 dB. Este contraste puede considerarse moderado. Sin embargo, no se traduce en una localización útil del defecto, ya que la distribución espacial sigue siendo demasiado difusa y no justifica un análisis acotado adicional.

CÓDIGO ENSAYO: EN14 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 5mm TAPADO A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-63 Chapa metálica con orificio de 5 mm tapado. (Elaboración propia)	 Figura 0-64 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 5 mm permanece tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-65 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-66 Mapa Acústico entre 300-330 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-67 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

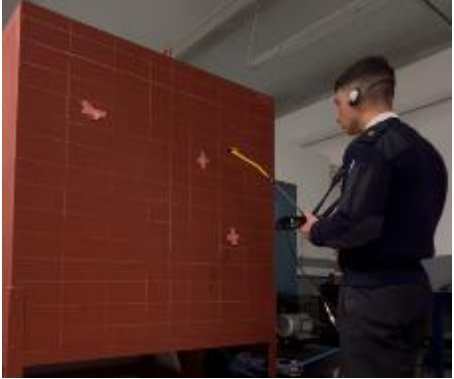
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (79 dB) hasta el valor máximo (87 dB), lo que supone una diferencia de 8 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 300 y 330 Hz, los valores se sitúan entre 60 dB y 74 dB, por lo que el rango dinámico es de 14 dB. En esta banda, el contraste mejora, aunque esa mejora no llega a traducirse en una localización clara del defecto.

CÓDIGO ENSAYO: EN15 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 8mm TAPADO A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-68 Chapa metálica con orificio de 8 mm tapado. (Elaboración propia)	 Figura 0-69 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 8 mm permanece tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-70 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)	 Figura 0-71 Mapa Acústico entre 4710-4810 Hz (Elaboración propia)
 Figura 0-72 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	

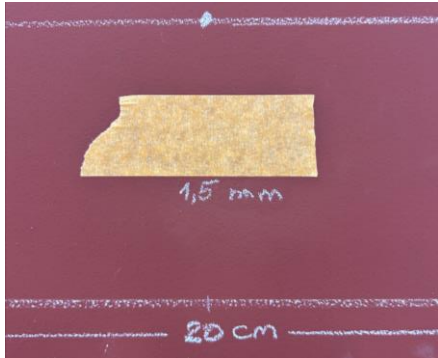
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (80 dB) hasta el valor máximo (86 dB), lo que supone una diferencia de 6 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 4710 y 4810 Hz, los valores se sitúan entre 44 dB y 49 dB, por lo que el rango dinámico es de 5 dB. En esta banda, el contraste apenas mejora, aunque la selección frecuencial sí permite una lectura algo más dirigida de la zona del orificio.

CÓDIGO ENSAYO: EN16 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 10mm TAPADO A 105dB
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-73 Chapa metálica con orificio de 10 mm tapado. (Elaboración propia)	 Figura 0-74 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	En este ensayo, el orificio de 10 mm permanece tapado, mientras el altavoz emite ruido rosa desde la parte posterior de la chapa atenuado a -15dB. La sonda PU se desplaza justo por encima del agujero.
 Figura 0-75 Mapa acústico en todo el espectro frecuencial (Elaboración propia)  Figura 0-77 Espectro frecuencial del parámetro velocidad de partícula. (Elaboración propia)	 Figura 0-76 Mapa Acústico entre 1927-1974 Hz (Elaboración propia)

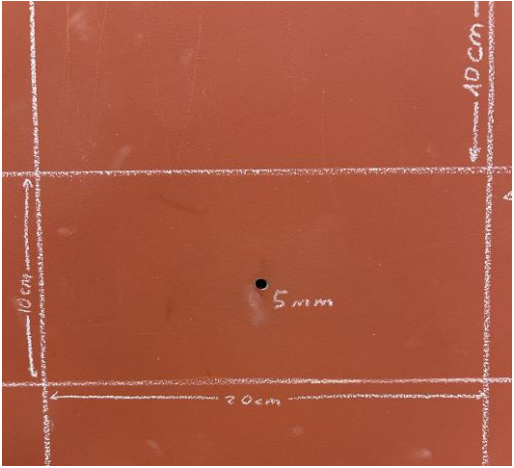
El rango dinámico del parámetro velocidad de partícula en el mapa que abarca todo el espectro frecuencial va desde el valor mínimo (82 dB) hasta el valor máximo (89 dB), lo que supone una diferencia de 7 dB. Este contraste es moderado en la representación global. Por otro lado, en el mapa acotado entre 1927 y 1974 Hz, los valores se sitúan entre 42 dB y 50 dB, por lo que el rango dinámico es de 8 dB. En esta banda, el contraste mejora solo ligeramente, por lo que la interpretación del orificio sigue siendo limitada.

CÓDIGO ENSAYO: CS01 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 1,5mm SIN TAPAR
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-78 Chapa metálica con orificio de 1,5mm sin tapar. (Elaboración propia)	 Figura 0-79 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm sin tapar pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 1,5 mm sin tapar. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.

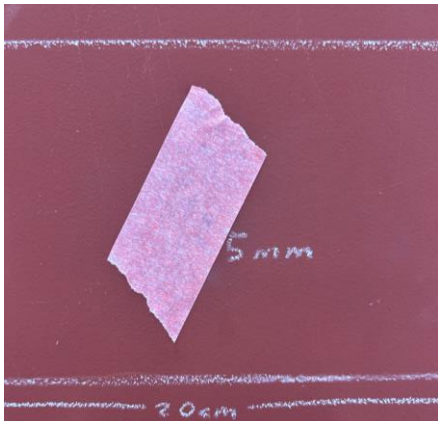
En este ensayo, la respuesta obtenida con CARGO-SAFE aumenta de forma progresiva al reducir la distancia al defecto, pasando de valores moderados a 20 y 15 cm a una lectura muy alta a 0 cm. Aunque la señal es claramente detectable en las posiciones más próximas, el contraste sigue siendo más limitado que en los diámetros mayores. El ensayo permite identificar el orificio, sobre todo a corta distancia, pero con una detectabilidad menor que en los orificios de mayor tamaño.

CÓDIGO ENSAYO: CS02 Volver a la matriz		TÍTULO: AGUJERO de 1,5mm TAPADO	
MUESTRA ENSAYADA			
			
Figura 0-80 Chapa metálica con orificio de 1,5mm tapado. (Elaboración propia)		Figura 0-81 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 1,5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	
Descripción de la muestra del ensayo		Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 1,5 mm tapado. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.	

En esta configuración, la respuesta también crece al acercar el receptor a la zona del orificio, pero los valores se mantienen claramente por debajo de los obtenidos en la condición abierta. La señal registrada a corta distancia sigue siendo apreciable, aunque el sellado reduce de forma notable la transmisión ultrasónica. El orificio tapado puede detectarse, pero con menor claridad y menor contraste que en la condición abierta.

CÓDIGO ENSAYO: CS03 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 5mm SIN TAPAR
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-82 Chapa metálica con orificio de 5mm sin tapar. (Elaboración propia)	 Figura 0-83 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 5 mm sin tapar. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.

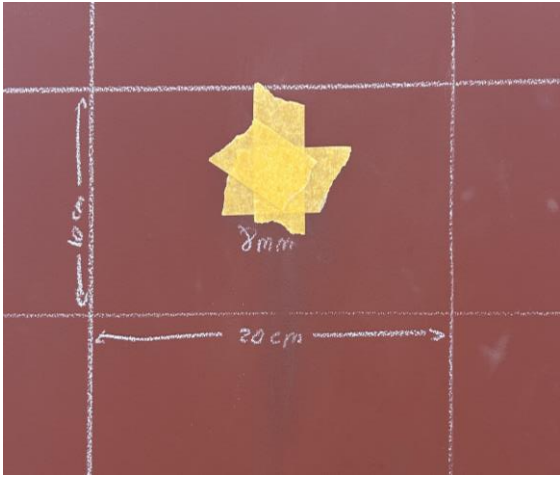
En este ensayo, la respuesta ultrasónica presenta una evolución creciente bien definida al disminuir la distancia al orificio, alcanzando valores muy altos en las posiciones más próximas. El comportamiento resulta más claro que en el caso de 1,5 mm, especialmente a 10 cm, 5 cm y 0 cm, donde la señal aumenta de forma marcada. El ensayo muestra una detectabilidad favorable del orificio, con una respuesta clara y fácil de interpretar a corta distancia.

CÓDIGO ENSAYO: CS04 Volver a la matriz		TÍTULO: AGUJERO de 5mm TAPADO
MUESTRA ENSAYADA		
		
Figura 0-84 Chapa metálica con orificio de 5mm tapado. (Elaboración propia)	Figura 0-85 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 5 mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 5 mm tapado. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.	

En la condición tapada, la señal registrada vuelve a aumentar al aproximarse al defecto, aunque con valores inferiores a los del agujero abierto en todas las distancias. Aun así, la respuesta sigue siendo reconocible y mantiene una evolución coherente, especialmente en las posiciones más cercanas. El ensayo permite detectar el orificio sellado, aunque con un contraste más moderado que en la condición abierta.

CÓDIGO ENSAYO: CS05 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 8mm SIN TAPAR
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-86 Chapa metálica con orificio de 8mm sin tapar. (Elaboración propia)	 Figura 0-87 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8 mm sin tapar pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 8 mm sin tapar. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.

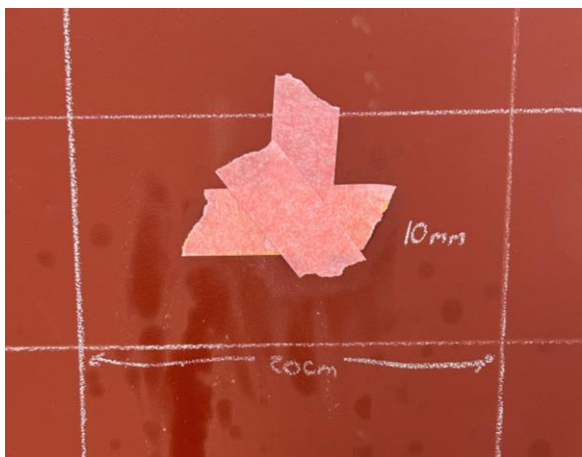
En este ensayo, CARGO-SAFE ofrece una respuesta alta y muy consistente, con un incremento claro de la señal a medida que el receptor se acerca al orificio. Desde distancias intermedias ya se aprecia un comportamiento favorable, y a 5 cm y 0 cm la lectura alcanza valores muy elevados. Se trata de una configuración favorable para la detección, con una respuesta clara, intensa y bien diferenciada.

CÓDIGO ENSAYO: CS06 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 8mm TAPADO
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-88 Chapa metálica con orificio de 8mm tapado. (Elaboración propia)	 Figura 0-89 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 8mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 8 mm tapado. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.

En la condición tapada, la señal mantiene una evolución creciente al acercarse al orificio y conserva valores apreciables incluso con el agujero sellado. Sin embargo, la respuesta sigue siendo inferior a la obtenida en abierto, lo que confirma que el sellado reduce la transmisión ultrasónica. En conjunto, el defecto sigue siendo detectable, aunque con una intensidad menor y con un contraste algo más contenido.

CÓDIGO ENSAYO: CS07 Volver a la matriz	TÍTULO: AGUJERO de 10mm SIN TAPAR
MUESTRA ENSAYADA	
 Figura 0-90 Chapa metálica con orificio de 10mm sin tapar. (Elaboración propia)	 Figura 0-91 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10mm sin tapar pasando por encima. (Elaboración propia)
Descripción de la muestra del ensayo	Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 10 mm sin tapar. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.

En este ensayo se obtiene una de las respuestas más favorables de toda la campaña. La señal aumenta de forma clara y sostenida al disminuir la distancia, y alcanza valores prácticamente máximos en las posiciones más próximas al agujero. La lectura resulta muy estable y fácil de interpretar, lo que confirma una detectabilidad alta del orificio. Esta configuración puede considerarse la más favorable para la inspección con CARGO-SAFE.

CÓDIGO ENSAYO: CS08 Volver a la matriz		TÍTULO: AGUJERO de 10mm TAPADO	
MUESTRA ENSAYADA			
 Figura 0-92 Chapa metálica con orificio de 10mm tapado. (Elaboración propia)		 Figura 0-93 Medición acústica sobre la chapa con orificio de 10mm tapado pasando por encima. (Elaboración propia)	
Descripción de la muestra del ensayo		Ensayo de medición ultrasónica mediante CARGO-SAFE sobre la chapa con agujero de 10 mm tapado. Las medidas se realizaron a distintas distancias respecto al defecto, concretamente a 20 cm, 15 cm, 10cm, 5 cm y 0 cm, con el transmisor situado en el interior del cajón de ensayos y el receptor desplazándose manualmente sobre la cara exterior de la chapa.	

En la condición tapada, la respuesta sigue mostrando una evolución coherente con la proximidad al defecto y alcanza valores relativamente altos a corta distancia, aunque siempre por debajo de la condición abierta. El sistema sigue siendo capaz de registrar con claridad la presencia de la zona alterada, pero con menor intensidad que en el caso sin sellar. El ensayo muestra una detección clara del defecto, aunque con un contraste reducido respecto al orificio abierto.

ANEXO IV: DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Declaro que, durante la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se han utilizado herramientas de inteligencia artificial de forma limitada y exclusivamente como recurso de apoyo en aspectos auxiliares, tales como la revisión lingüística del texto, la mejora de la redacción, la corrección formal y la estructuración de determinados apartados de la memoria.

En ningún caso estas herramientas han sustituido la aportación personal del autor en el desarrollo del trabajo. Tanto el planteamiento del estudio como la realización de los ensayos, el análisis de los resultados obtenidos, la interpretación técnica de las medidas y la formulación de las conclusiones corresponden al trabajo propio realizado a lo largo del proyecto.

Del mismo modo, asumo íntegramente la responsabilidad sobre el contenido final del documento, así como sobre la fiabilidad, coherencia y validez de la información presentada, habiendo revisado y supervisado de forma crítica todos los contenidos incorporados.

Y para que conste a los efectos oportunos, se incorpora la presente declaración a la documentación del Trabajo Fin de Grado.