



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del comportamiento de elementos y sistemas
asociados a la estanqueidad entre compartimentos del buque
mediante técnicas de acústica avanzada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando Gibert Guitart

DIRECTORES: Francisco Javier Rodríguez Rodríguez
Gerardo González-Cela Echevarría

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del comportamiento de elementos y sistemas
asociados a la estanqueidad entre compartimentos del buque
mediante técnicas de acústica avanzada*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

RESUMEN

El incremento de accidentes marítimos a lo largo de los años, así como la multitud de acciones bélicas que ocurren en la actualidad, ha inducido en una mayor concienciación por parte de personal de las Fuerzas Armadas sobre la importancia de la Seguridad Interior a bordo de los buques. Esto está impulsando la implementación de tecnologías innovadoras para fortalecer la defensa ante posibles imprevistos. Entre estas tecnologías emergentes se encuentra el equipo de acústica avanzada *Scan and Paint*, capaz de medir, entre otros, los parámetros de *velocidad de partícula* y *presión sonora*. Este equipo está diseñado para localizar de forma precisa fugas de sonido y facilitar la detección de funcionamientos anómalos en ambientes reverberantes o con ruido de fondo.

En este contexto, se ha decidido evaluar el comportamiento de elementos y sistemas asociados a la estanqueidad entre compartimentos del buque mediante técnicas de acústica avanzada empleando el equipo *Scan and Paint*, con el fin de determinar si esta tecnología podría implementarse en un futuro no muy lejano.

Para ello, en el presente Trabajo de Fin de Grado, se realizan numerosos ensayos y análisis detallados sobre distintos elementos empleando el equipo de acústica para evaluar su estanqueidad y detectar posibles zonas de filtración de sonido. Los resultados obtenidos han permitido extraer una serie de conclusiones y trazar líneas futuras para facilitar y mejorar la implementación de este tipo de tecnologías en la Seguridad Interior en los buques de la Armada.

PALABRAS CLAVE

Estanqueidad, Acústica, *Scan and Paint*, Seguridad Interior, *Velocidad de partícula*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores, por la ayuda durante la realización de este trabajo de fin de grado, sin ellos no habría sido posible.

También me gustaría agradecer a mi familia, por el apoyo que me han ofrecido durante mi periodo de escuela, y a Lucía, por aguantarme estos cinco largos años.

Finalmente me gustaría agradecer al estudio 202, mi estudio, y, sobre todo, mis amigos, por hacer más llevaderos estos años en la escuela y por hacer más amenas las horas pasadas en el estudio, sin ellos tampoco habría sido posible.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	7
Nomenclatura	9
1 Motivación y objetivos	11
1.1 Motivación	11
1.2 Objetivos	11
1.3 Estructura del trabajo	12
2 Antecedentes: conceptos técnicos necesarios para la comprensión de este trabajo	13
2.1 Conceptos acústicos	13
2.1.1 La onda sonora: generación y propiedades.....	13
2.1.2 Características físicas de la onda sonora	14
2.1.3 Tipos de ruido	15
2.1.4 Las magnitudes acústicas: Potencia, presión e intensidad sonora	16
2.1.5 Espectro de frecuencias de un sonido: bandas de octava.....	18
2.1.6 La velocidad de partícula como magnitud protagonista de este trabajo	19
2.1.7 Diferencias entre los parámetros acústicos velocidad de partícula y presión sonora	19
2.1.8 Otros conceptos de interés	20
2.2 La estanqueidad acústica en los buques de la flota	20
2.2.1 Importancia para la Seguridad Interior	20
2.2.2 Metodologías actuales de evaluación de las propiedades de estanqueidad de elementos y sistemas	20
2.2.3 Identificación de los elementos y sistemas cuya estanqueidad resulta crítica desde el punto de vista de la seguridad interior.....	21
2.3 Equipo de acústica avanzada <i>Scan & Paint</i>	26
2.3.1 Componentes del equipo.....	27
2.3.2 Proceso metodológico para la obtención de datos acústicos y su posterior análisis.....	31
2.3.3 Ventajas y novedades aportadas por el equipo de medida	34
2.3.4 Su empleo en los sectores del automóvil, naval y aeronáutico: lecciones aprendidas	36
3 Evaluación del comportamiento de elementos y sistemas asociados a la estanqueidad entre compartimentos de buque mediante técnicas de acústica avanzada: casos de estudio	39
3.1 Desarrollo de la evaluación acústica: ensayos de estanqueidad in situ.....	39
3.1.1 Mediciones realizadas: elementos y sistemas evaluados, características técnicas, estado, emplazamientos	39

3.1.2 Diagnóstico: análisis en laboratorio de la información acústica recogida.....	44
3.1.3 Redacción de conclusiones parciales: principales datos de referencia obtenidos	56
3.2 Comportamiento de elementos y sistemas asociados a la estanqueidad en buques: recomendaciones de actuación	57
4 Conclusiones y líneas futuras	59
4.1 Conclusiones	59
4.2 Líneas futuras	59
5 Bibliografía.....	61
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	65
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	66

Índice de Figuras

Figura 2-1: Generación de la onda sonora ([1])	14
Figura 2-2: Características de la amplitud ([2])	14
Figura 2-3: Relación Frecuencia-Longitud de onda ([7])	15
Figura 2-4: Diferencias tipos de ruidos ([11]).....	16
Figura 2-5: Escala comprimida <i>presión sonora</i> ([1]).....	17
Figura 2-6: Curvas isofónicas ([17])	18
Figura 2-7: Curvas de ponderación ([18])	18
Figura 2-8: Espectro de frecuencias ([20]).....	19
Figura 2-9: Ejemplo compartimentación buque ([24]).....	22
Figura 2-10: Ejemplo mamparos estancos ([25])	22
Figura 2-11: Ejemplo compartimentación estanca ([26]).....	23
Figura 2-12: Puerta estanca de acción rápida ([28]).....	23
Figura 2-13: Puerta estanca con cierre individual ([28]).....	24
Figura 2-14: Escotilla estanca elevada ([28]).....	24
Figura 2-15: Escotilla estanca con portilla ([28]).....	24
Figura 2-16: Buque afectado por el aire contaminado ([29]).....	25
Figura 2-17: Componentes de la defensa NBQR ([30]).....	25
Figura 2-18: Componentes de una ciudadela ([30]).....	26
Figura 2-19: a) Montaje del equipo, b) <i>presión sonora</i> , c) <i>velocidad de partícula</i> [31].....	27
Figura 2-20: Pestaña <i>HW Setup</i> del <i>software Scan and Paint</i> (Elaboración propia).....	27
Figura 2-21: Pestaña <i>Capture</i> del <i>software Scan and Paint</i> (Elaboración propia).....	28
Figura 2-22: Pestaña <i>Process</i> del <i>software Scan and Paint</i> (Elaboración propia).....	28
Figura 2-23: Pestaña <i>Analyse</i> del <i>software Scan and Paint</i> (Elaboración propia).....	29
Figura 2-24: Sonda <i>Microflow</i> P-U, estructura y cables del sensor de <i>velocidad de partícula</i> . ([33])	30
Figura 2-25: Representación de las medidas de presión y <i>velocidad de partícula</i> [34].....	30
Figura 2-26: Componentes equipo <i>Scan and Paint</i> ([37])	31
Figura 2-27: Proceso de obtención de datos ([37])	31
Figura 2-28: Proceso de obtención de datos en el CASI de la Escuela Naval Militar. (Elaboración propia).	32

Figura 2-29: División del área en celdas ([38]).....	33
Figura 2-30: Método de cuadrícula del <i>software Scan and Paint</i> con tamaño de bloque 30 cm. (Elaboración Propia).	33
Figura 2-31: Método de cuadrícula del <i>software Scan and Paint</i> con tamaño de bloque 20 cm. (Elaboración Propia).	34
Figura 2-32: Representación de los distintos procedimientos de medida ([38]).....	35
Figura 2-33: Espuma original ([40]).....	36
Figura 2-34: Espuma final ([40]).....	36
Figura 2-35: UAV <i>Scan Eagle</i> sobre la cubierta del Buque Galicia ([42]).....	37
Figura 2-36: Pasos para la obtención de datos del turbocompresor ([33]).....	37
Figura 2-37: <i>Velocidad de partícula</i> 2kHz-10kHz a 40 km/h ([43])	38
Figura 2-38: <i>Velocidad de partícula</i> 2kHz-10kHz en estático ([43])	38
Figura 2-39: Medición parámetro <i>velocidad de partícula</i> para evaluar la estanqueidad de un vehículo ([44]).....	38
Figura 3-1: Montaje equipo para prueba en puerta acceso cuartel AFM. (Elaboración propia).	39
Figura 3-2: Altavoz <i>Ultimate Ears Megablast</i> en el lado contrario de la puerta a medir. (Elaboración propia).	40
Figura 3-3: Disposición del equipo para la realización de la prueba. (Elaboración propia).	40
Figura 3-4: Disposición altavoz <i>Ultimate Ears Megablast</i> para el desarrollo de la prueba. (Elaboración propia).	41
Figura 3-5: Montaje del equipo y cubo de chapa. (Elaboración propia).	41
Figura 3-6: Grieta realizada en el cubo. (Elaboración propia).	42
Figura 3-7: Grieta taponada con cinta aislante. (Elaboración propia).....	42
Figura 3-8: Montaje del equipo para prueba. (Elaboración propia).	43
Figura 3-9: Puerta estanca. (Elaboración propia) Figura 3-10: Puerta estanca. (Elaboración propia).	43
Figura 3-11: <i>Velocidad de partícula</i> empleando el método de cuadrícula. (Elaboración propia). ..	44
Figura 3-12: Hueco para el cierre de la puerta. (Elaboración propia).	44
Figura 3-13: <i>Velocidad de partícula</i> empleando método de cuadrícula. (Elaboración propia).	45
Figura 3-14: <i>Velocidad de partícula</i> empleando método por puntos. (Elaboración propia).....	45
Figura 3-15: Parte inferior del marco de la puerta. (Elaboración propia).	45
Figura 3-16: Junta de goma de la puerta. (Elaboración propia).	45
Figura 3-17: Grieta de la parte inferior del mamparo. (Elaboración propia).	46
Figura 3-18: Grieta taponada con cinta americana. (Elaboración propia).....	46

Figura 3-19: <i>Velocidad de partícula</i> empleando cinta americana en la grieta. (Elaboración propia).	47
Figura 3-20: Región de la puerta no estanca debido al cierre. (Elaboración propia).	47
Figura 3-21: Goma dañada de la puerta estanca. (Elaboración propia).	48
Figura 3-22: Frisado de la puerta con pintura azul. (Elaboración propia).	48
Figura 3-23: Junta de goma de la puerta con marcas de pintura azul. (Elaboración propia).	48
Figura 3-24: <i>Velocidad de partícula</i> en cubo sin reducción de espesor. (Elaboración propia).	49
Figura 3-25: <i>Velocidad de partícula</i> en cubo con reducción de espesor. (Elaboración propia).	49
Figura 3-26: <i>Velocidad de partícula</i> con grieta de 2 cm en el cubo. (Elaboración propia).	50
Figura 3-27: <i>Velocidad de partícula</i> con la grieta sellada. (Elaboración propia).	50
Figura 3-28: Escaneo de la puerta. (Elaboración propia).	51
Figura 3-29: <i>Velocidad de partícula</i> con método de mallado. (Elaboración propia).	51
Figura 3-30: <i>Velocidad de partícula</i> con método de punto. (Elaboración propia).	52
Figura 3-31: <i>Velocidad de partícula</i> con método de mallado. (Elaboración propia).	52
Figura 3-32: Puntos escaneados. (Elaboración propia).	53
Figura 3-33: <i>Velocidad de partícula</i> con método de punto. (Elaboración propia).	53
Figura 3-34: Gráfica <i>presión sonora</i> VS <i>velocidad de partícula</i> . (Elaboración propia).	54
Figura 3-35: <i>Velocidad de partícula</i> a 105 Hz. (Elaboración propia).	54
Figura 3-36: <i>Velocidad de partícula</i> a 175 Hz. (Elaboración propia).	55
Figura 3-37: Burlete dañado de la puerta estanca. (Elaboración propia).	55
Figura 3-38: Escaneo de la puerta. (Elaboración propia).	56
Figura 3-39: <i>Velocidad de partícula</i> . (Elaboración propia).	56

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Características de la sonda Microflow P-U ([19])	29
---	----

Nomenclatura

Db= Decibelio

Hz=Hercio

W= Vatios

UAV= Unmanned Air Vehicle (Vehículo aéreo teledirigido)

BNC= Bayonet Neill-Concellman

IMO= Organización Marítima Internacional

CIC= Centro de Información de Combate

CASI= Centro de Adiestramiento de Seguridad Interior

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

La Seguridad Interior en los buques adquiere una importancia vital para el cumplimiento de la misión que se ha de abordar, maximizando la capacidad de supervivencia ante cualquier incidencia. Para ello, resulta imprescindible mantener la estanqueidad entre compartimentos.

Además de evitar o limitar las inundaciones, la compartimentación estanca también absorbe la onda explosiva, el fogonazo y el efecto de los fragmentos resultantes de una posible explosión de un arma, al igual que evita la propagación de los incendios.

Existen distintas maneras de perder estanqueidad en elementos y sistemas: corrosiones de las estructuras, fallos en cierres, reparaciones mal efectuadas, etc. Por ello, debe establecerse un plan de inspecciones y pruebas para corregir cualquier anomalía de la manera más rápida posible.

Actualmente, el plan de inspecciones y pruebas que se desarrollan para comprobar la estanqueidad entre compartimentos del buque implica métodos poco rigurosos, sin embargo, compañías de alto nivel como Porsche, Ferrari, Airbus o Dassault aplican técnicas de acústica avanzada para mejorar la calidad de sus productos e incrementar la eficiencia de sus programas de mantenimiento. Se trata de una novedosa técnica de medida y evaluación acústica (cámara, software, sonda y portátil) que permite la detección de anomalías en elementos y sistemas que implican radiación sonora o necesidad de propiedades de estanqueidad. En este contexto, el presente TFG pretende aplicar esta técnica para conocer cómo se comportan dichos elementos y sistemas asociados a la estanqueidad entre compartimentos de buques, pues el ámbito militar no debe ser ajeno al empleo de este novedoso equipo de diagnóstico. Sobre todo, teniendo en cuenta la decisiva importancia que adquieren las propiedades de estanqueidad en la Seguridad Interior.

1.2 Objetivos

En este contexto, este proyecto pretende analizar, en diferentes situaciones de uso, estado, dimensiones, mantenimiento y anomalías recientes, la estanqueidad entre locales del buque en relación con el comportamiento de los elementos y sistemas asociados a la propiedad de estanqueidad. Para ello, inicialmente se recoge información acústica mediante medidas in situ, posteriormente se realiza un diagnóstico de resultados en laboratorio y, finalmente, se obtienen las conclusiones derivadas del proceso.

Por tanto, los objetivos principales del trabajo residen en: Conocer cómo se comportan los elementos y sistemas asociados a la estanqueidad entre espacios del buque, definir medidas de mejora, identificar un conjunto de lecciones aprendidas de cara a perfeccionar la Seguridad Interior y,

principalmente, verificar la capacidad del equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* para detectar pérdidas de estanqueidad en distintos elementos.

1.3 Estructura del trabajo

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado en seis partes bien diferenciadas para facilitar al lector una lectura clara y fluida.

En primer lugar, se trata de dar a conocer la importancia que adquiere la Seguridad Interior en los buques, así como de explicar la motivación que ha impulsado a la realización de este trabajo. Al mismo tiempo se destaca, de manera breve, la importancia de mantener la estanqueidad en los barcos y como las nuevas tecnologías están ayudando a la evaluación de esta cualidad. También se proponen una serie de objetivos que se tendrán presentes a lo largo de la realización de este proyecto.

A continuación, se introducen una serie de conceptos fundamentales de acústica necesarios para la correcta comprensión del trabajo. Para empezar, se define la onda sonora, se describe como se genera y se mencionan sus propiedades y características. Posteriormente, se comparan los distintos tipos de ruido que existen, ya que es importante tener un conocimiento básico sobre el ruido que se empleará en el presente trabajo. Seguidamente se introducen las magnitudes de *potencia*, *presión* e *intensidad sonora*. En este subapartado se hace énfasis en el Decibelio, unidad empleada en este estudio. También se proporciona una explicación de las curvas isofónicas y las curvas de ponderación. Finalmente, se explica el parámetro de *velocidad de partícula*, y se hace especial hincapié en la importancia que adopta en este trabajo, explicándose además la diferencia que tiene respecto al parámetro de *presión sonora*.

Para continuar, se explica de manera detallada la importancia que adquiere la estanqueidad dentro de la Seguridad Interior en los buques. A continuación, se explican las tres metodologías de evaluación de estanqueidad; inspecciones visuales, prueba de aire y prueba de la tiza. Acto seguido se identifican los elementos y sistemas cuya estanqueidad resulta crítica desde el punto de vista de la Seguridad Interior, como son los mamparos, las puertas estancas, las escotillas y la ciudadela.

En cuarto lugar, se presenta el equipo de acústica avanzada *Scan and Paint*, empleado durante la fase de desarrollo de este proyecto. Se ofrece una descripción detallada de su composición, así como de su funcionamiento y del procedimiento a seguir para realizar una medición. También se destacan las ventajas y novedades que aporta respecto a otros métodos de medida para la caracterización del campo sonoro. Finalmente, se introducen diferentes trabajos en los que se ha empleado el equipo y una variedad de lecciones aprendidas tras su uso.

Por otro lado, se lleva a cabo la fase de desarrollo, en la que se realizan múltiples ensayos sobre distintos elementos, seguido de su posterior análisis y se proponen una serie de conclusiones parciales. A su vez se ofrecen una variedad de consejos para mantener o mejorar las propiedades de estanqueidad de dichos elementos.

Finalmente, en los dos últimos apartados, se presentan las conclusiones generales derivadas de todo el trabajo realizado, así como una serie de líneas futuras a implementar, destinadas a perfeccionar las capacidades del equipo.

2 ANTECEDENTES: CONCEPTOS TÉCNICOS NECESARIOS PARA LA COMPRENSIÓN DE ESTE TRABAJO

2.1 Conceptos acústicos

Para comprender algunos de los aspectos que recoge este trabajo son necesarias unas nociones básicas sobre acústica. Por ello, en los siguientes apartados se explicarán conceptos acústicos para facilitar la lectura del documento.

2.1.1 La onda sonora: generación y propiedades

La onda acústica se origina a partir de las vibraciones producidas por una perturbación inicial que provoca variaciones de presión. Se denominan ondas acústicas a todas aquellas que tienen lugar en un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso). Aquellas que no requieren de un medio material para su propagación se clasifican como electromagnéticas. Cuando la onda acústica es audible, se le denomina onda sonora.

Las vibraciones de un cuerpo dan lugar al movimiento de las partículas que lo rodean, éstas se mueven como si fuera un movimiento armónico y chocan con las partículas adyacentes, y así de una forma sucesiva. De tal forma que, al agruparse varias partículas en el mismo lugar, se producen incrementos de presión respecto a la presión atmosférica (zona de compresión) o, por el contrario, decrementos de presión, al quedar zonas con muchas menos partículas (zona de rarefacción). Todo esto se puede observar en la figura 2-1. En la onda generada se puede apreciar como $P = P_t - P_{at}$. Las variaciones de presión se desarrollan en la misma dirección que viaja la onda, por ello estas ondas se denominan longitudinales. Estos cambios de presión son captados por el oído humano que lo transforma en estímulos nerviosos para la posterior interpretación del cerebro, produciéndose la sensación de sonido.[1]

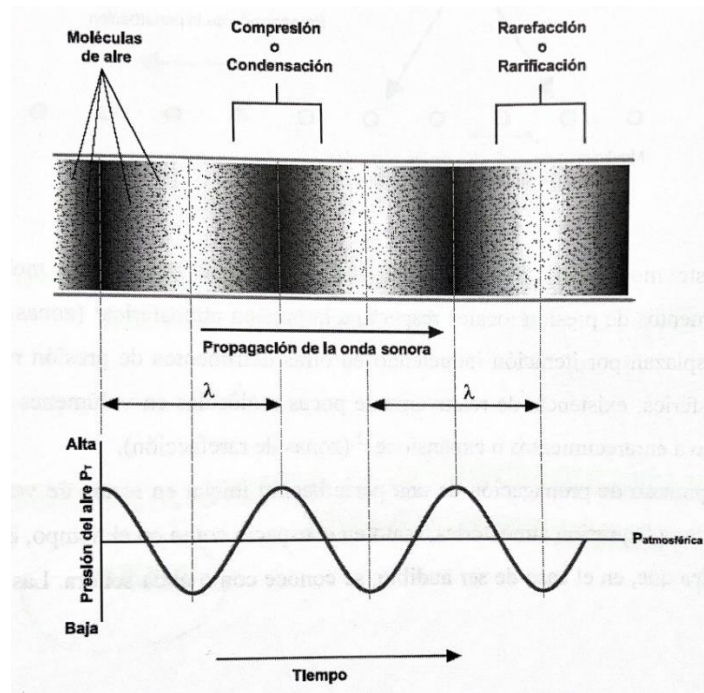


Figura 2-1: Generación de la onda sonora ([1])

2.1.2 Características físicas de la onda sonora

La onda sonora se caracteriza principalmente por dos propiedades, la amplitud y la frecuencia. La amplitud es la separación máxima de la onda respecto a la posición de equilibrio. Indica la magnitud de las variaciones de presión en una relación en la que, a mayor amplitud, mayor será la intensidad del sonido que se percibe. Se utiliza una escala logarítmica (decibelios) para facilitar la valoración del sonido percibido. El mínimo valor de variación de presión respecto a la presión atmosférica que puede detectar el oído humano es de 0 dB y el máximo valor es de 120 dB, a partir de este valor se producirían daños irreversibles en el sistema auditivo.[2] Posteriormente se desarrollará más el concepto del decibelio.

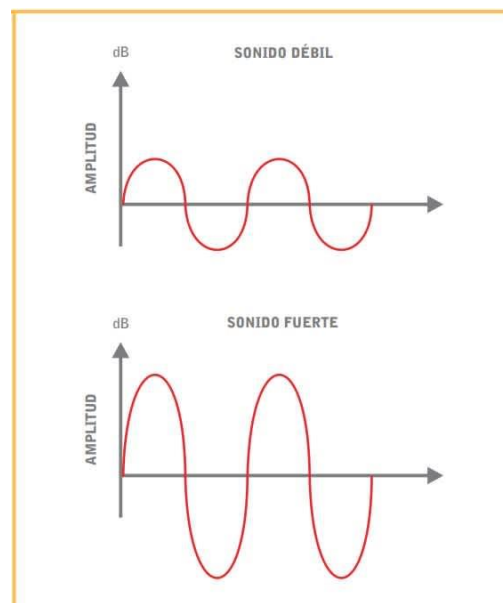


Figura 2-2: Características de la amplitud ([2])

Por otro lado, la frecuencia indica la velocidad de las variaciones de presión por segundo, también se puede interpretar como el número de ondas o de ciclos completos realizados por segundo. Esta magnitud se mide en Hercios, ciclos por segundo, y determina el tono del sonido. El ser humano es capaz de percibir un rango de frecuencias entre 20 y 20.000 Hz, este rango se suele caracterizar en tres intervalos diferenciados: bajas, medias y altas. Las frecuencias bajas dan lugar a sonidos más graves y las altas a sonidos más agudos.[1]

La medición de estas magnitudes parece sencilla, no obstante, cuando se habla de sonido, no se puede mencionar una única frecuencia. Si solo existiera una frecuencia, la onda sería mucho más sencilla, sin embargo, esto no es nada habitual. Normalmente, los sonidos están compuestos por multitud de amplitudes y frecuencias, por lo que es importante conocer el concepto de frecuencia fundamental.[1]

La frecuencia fundamental es la frecuencia más baja de todas y aquella en la que la presión acústica es máxima, es la que indica la nota que hemos escuchado, pero no es el tono de mayor amplitud.[3][4]

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

- Tono: Permite distinguir si un sonido es grave o agudo. Depende directamente de la frecuencia, como ya se ha mencionado anteriormente, a mayores frecuencias mayor agudez del sonido.[4]
- Duración: Proporciona la diferencia entre un sonido largo y uno corto.[4]
- Intensidad: Depende de la amplitud, también mencionada anteriormente. Permite distinguir si un sonido es fuerte o si es suave.[4]
- Timbre: Permite distinguir entre diferentes instrumentos de igual intensidad y tono o reconocer la voz de un individuo en concreto.[5] [1]

Por último, es de gran importancia en acústica conocer el concepto de longitud de onda. En la figura 2-3 se puede observar que la longitud de onda es el espacio en el que se realiza un ciclo, es decir, dos puntos en los que la fase es la misma. Es inversamente proporcional a la frecuencia por lo que longitudes de onda pequeñas implican sonidos agudos.[6]

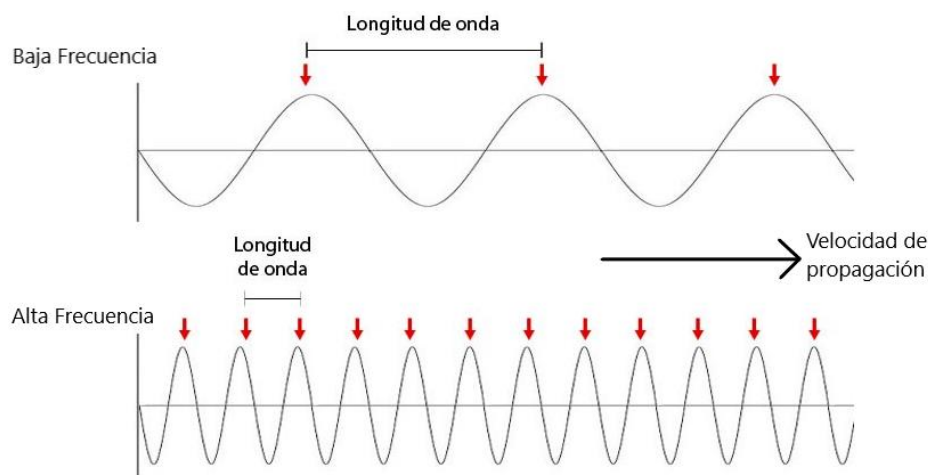


Figura 2-3: Relación Frecuencia-Longitud de onda ([7])

2.1.3 Tipos de ruido

Conocer y entender los distintos tipos de ruidos es esencial de cara a la realización de pruebas de estanqueidad para mejorar la precisión, la eficiencia y la fiabilidad del proceso. Al ajustar los

parámetros según la naturaleza del ruido esperado, se mejora la sensibilidad de las pruebas. Principalmente existen tres tipos:

- **Ruido blanco:** Incluye sonidos de baja, media y alta frecuencia. Combina frecuencias de ondas sonoras de igual intensidad, pero aleatorias dentro de un amplio ancho de banda. El resultado es un sonido constante sin ningún tono destacable.[8]
- **Ruido rosa:** Dentro de este ruido se encuentra el rango de frecuencias audibles para el ser humano, 20 a 20.000 Hz. La potencia disminuye a medida que aumenta la frecuencia. Si bien es muy parecido al ruido blanco, éste se caracteriza por tener frecuencias inferiores más fuertes y con mayor poder que las frecuencias superiores.[9]
- **Ruido marrón:** También conocido como ruido rojo, es un ruido más fuerte y profundo que los mencionados anteriormente. Además, a medida que aumenta la frecuencia la potencia disminuye más que lo que lo hace en el ruido rosa.[10]

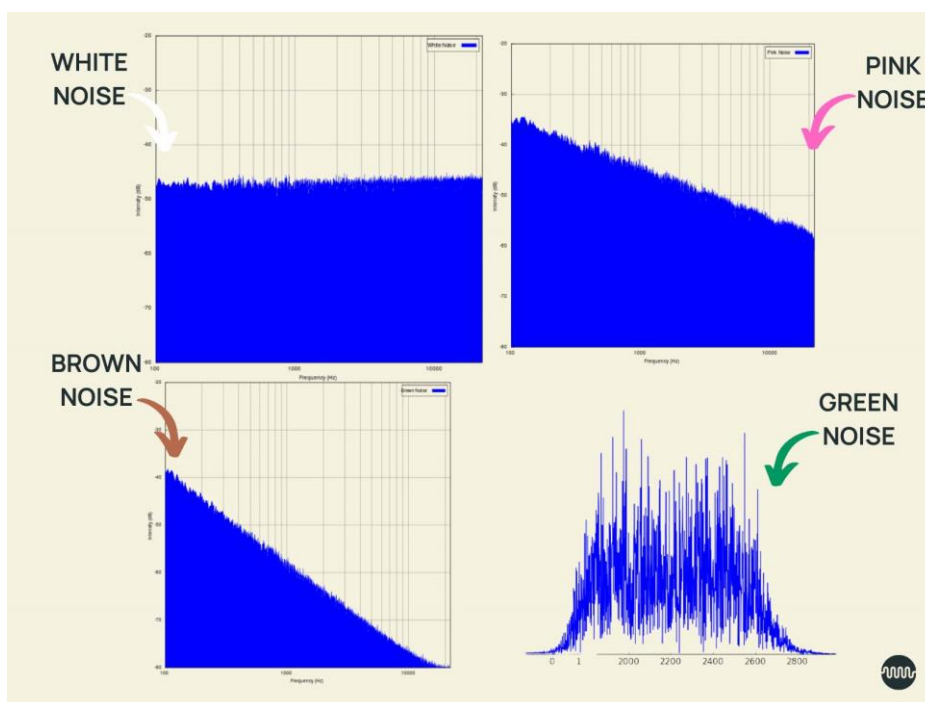


Figura 2-4: Diferencias tipos de ruidos ([11])

En la figura 2-4 se pueden comparar las características mencionadas anteriormente. En el eje X se encuentra el espectro de frecuencias de los distintos tipos de ruido y en el eje Y la potencia sonora, viendo como para el ruido blanco la intensidad es prácticamente constante durante todo el espectro.

Para el correcto desarrollo de las pruebas y análisis de los resultados, el ruido empleado en las medidas del presente trabajo será ruido blanco, de este modo todas las frecuencias tendrán la misma intensidad y, por ende, el micrófono escuchará todas de la misma manera.

2.1.4 Las magnitudes acústicas: Potencia, presión e intensidad sonora

A continuación, se definirán las tres magnitudes acústicas fundamentales:

- **Potencia sonora:** Se define como la cantidad de energía que emite una fuente determinada. No depende del medio ni de las condiciones en las que se propaga, sino que es un valor intrínseco de la fuente emisora. Es un valor constante a lo largo del tiempo y se mide en vatios (W).[12]
- **Intensidad sonora:** También conocida como intensidad acústica, es la energía que fluye en una unidad de tiempo a través de una superficie en dirección perpendicular a la dirección de

propagación. Básicamente es la *potencia sonora* por unidad de superficie, es por ello que se mide en W/m^2 . Depende del medio en el que se propaga y de la distancia al foco emisor.[1]

- *Presión sonora*: Consiste en la diferencia entre la presión atmosférica y la presión debida al sonido generado por fuentes sonoras. Es un valor que, a diferencia de la *potencia sonora*, depende de la distancia a la fuente y de las condiciones del medio en el que se encuentra. Se mide en N/m^2 . [13][1]

Para entender bien la relación que tienen las tres, lo más sencillo será poner un ejemplo. Un taladro tiene una determinada *potencia sonora*; es decir, emite siempre la misma energía por unidad de tiempo, independientemente del lugar en el que se encuentre. Sin embargo, no generará la misma *presión sonora* si se encuentra en una habitación de grandes dimensiones sin objetos, que en una habitación pequeña repleta de objetos, y tampoco producirá la misma a un metro del taladro que a 20 metros. No obstante, para conocer la *potencia sonora* de una fuente emisora, en este caso el taladro, a través exclusivamente de su *presión sonora* son necesarios unos recintos muy concretos, por ello se mide la *intensidad acústica*, ya que se puede medir en cualquier campo sonoro.[14]

Todas estas magnitudes, a pesar de tener sus propias unidades naturales, se expresan en decibelios, debido principalmente a que los umbrales de audición y de dolor para la *presión sonora* son de $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ y 20 N/m^2 respectivamente, un margen demasiado amplio. El decibelio emplea una escala comprimida, con un margen mucho menor, como se puede observar en la figura 2-5.

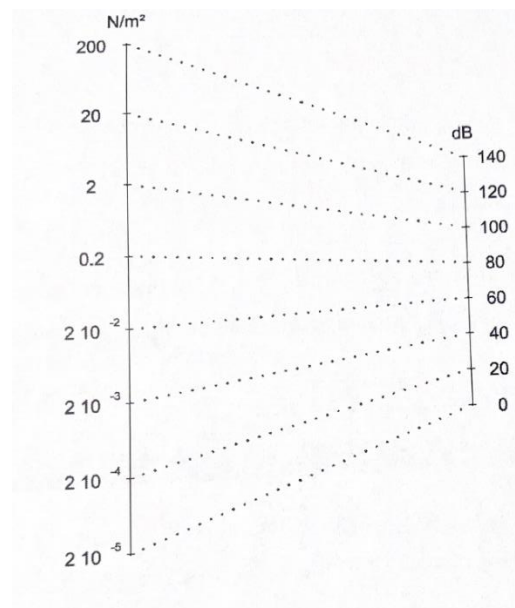


Figura 2-5: Escala comprimida presión sonora ([1])

La conversión de unidades naturales a decibelios se realiza mediante ecuaciones logarítmicas, por lo que no se pueden simplemente sumar dos lecturas de dB. Así, si se tienen dos fuentes sonoras que emiten 90 dB cada una, la lógica lleva a pensar que el sonido resultante será de 180 dB, sin embargo, el valor final es 93 dB.[15] Por ejemplo, para agregar 10 dB a un valor inicial, sería necesario multiplicar la *presión sonora* por 10.

Por otra parte, por si no fuese suficientemente complicado, la respuesta del oído no es la misma para las distintas frecuencias, sino que sigue unas curvas denominadas curvas isofónicas. Éstas indican la intensidad que debe tener un sonido para que el oído tenga la misma sensación sonora subjetiva, de tal forma que las frecuencias bajas y las altas deben poseer mayor nivel de *presión sonora* que las frecuencias centrales para generar igual sensación sonora.[16] [1]

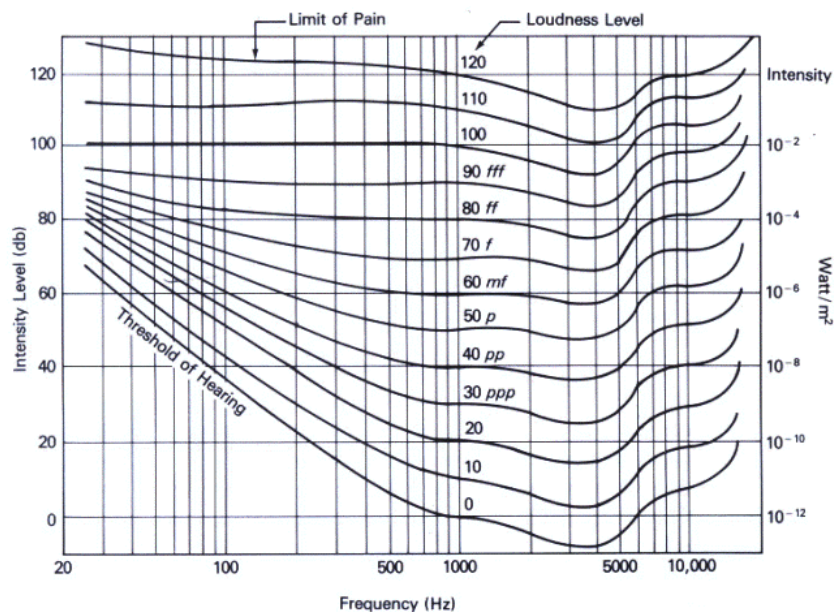


Figura 2-6: Curvas isofónicas ([17])

Para la correcta comprensión de este trabajo también es necesario conocer las curvas de ponderación. Estas curvas nacieron con el objetivo de aproximar los analizadores acústicos a la respuesta del oído. Son una simplificación de la respuesta en frecuencia del oído a diferentes niveles. Hay tres tipos de ponderaciones, A, B y C. La primera se usa para niveles bajos de *presión sonora* y es adecuada para la medida de ruidos de fondo. La segunda se usa para niveles intermedios y, al igual que la A, atenúa mucho más los niveles bajos, es la adecuada para medir ruido musical. Por último la C, es muy similar a la B en agudos y preferible para la medida de ruidos de alto nivel.[18]

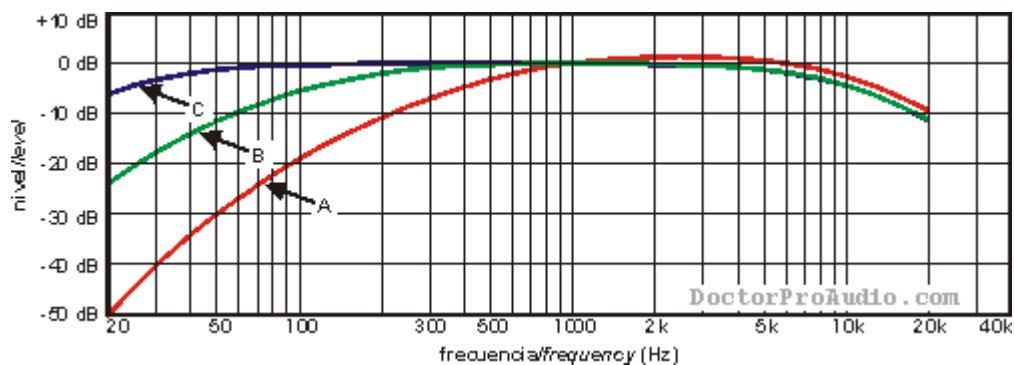


Figura 2-7: Curvas de ponderación ([18])

La ponderación A es la más utilizada y será la que se emplee en este trabajo para las mediciones, pues cubre todo el rango de frecuencias que el oído percibe, desde 20 Hz a 20.000 Hz. Esta ponderación ajusta las lecturas de *presión sonora* para reflejar la sensibilidad del oído humano, dicho de otra forma, permite adecuar los valores medidos al comportamiento del oído humano.[15]

2.1.5 Espectro de frecuencias de un sonido: bandas de octava

Como ya se comentó en el apartado 2.1.2 *Características físicas de la onda sonora*, en los sonidos naturales no se puede hablar de una única frecuencia, sino que cada fuente creadora de ruido es portadora de distintas frecuencias. Es por este motivo que las frecuencias acústicas se agrupan en bandas cuyos anchos están normalizados. Además, esta división de frecuencias en bandas ofrece la posibilidad de conocer los niveles sonoros que emite cada componente de frecuencia.[1]

Entre los anchos más empleados se encuentran los de una octava y los de 1/3 de octava. Una octava es una banda en la que la frecuencia más alta es el doble de la frecuencia más baja. El espectro audible (20 Hz a 20.000 Hz) se divide en 10 octavas. Por otro lado, 1/3 de octava es una banda algo más compleja y corresponde a la tercera parte de una octava.[19]

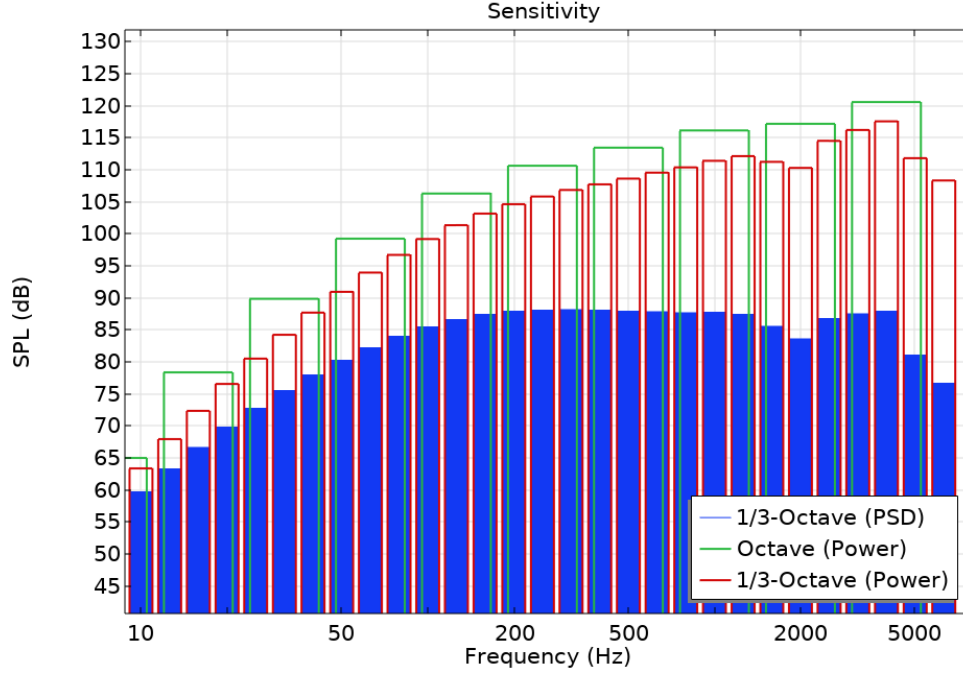


Figura 2-8: Espectro de frecuencias ([20])

2.1.6 La velocidad de partícula como magnitud protagonista de este trabajo

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*. Ésta puede ser positiva o negativa dependiendo de la dirección en la que se desplace y se puede representar mediante la expresión mostrada a continuación:

$$\vec{u}(t) = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} [21]$$

Siendo $\partial \vec{\xi}$ el desplazamiento de la partícula y ∂t la variación en el tiempo.

La medición de la *velocidad de partícula* se puede realizar de dos maneras distintas; la primera de ellas es usando un *Microflown* (primer sensor para medir la *velocidad de partícula*, creado en 1994), capaz de medir todo el espectro audible de manera precisa, el segundo método sería calculando el gradiente de presión entre dos micrófonos en una pequeña parte del espectro.[21]

2.1.7 Diferencias entre los parámetros acústicos velocidad de partícula y presión sonora

La *velocidad de partícula* se puede relacionar con la *presión sonora* considerando únicamente la velocidad perpendicular a la fuente:

$$u_n(t) = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(t)}{\partial \vec{n}} dt [17]$$

En cuando a los mapas de *presión sonora*, mediante su representación se pueden llegar a encontrar altos niveles de presión en zonas en las que, quizás, no hay una fuente de ruido, además tiene un rango

dinámico bastante limitado (la diferencia entre valores extremos de presión es aproximadamente 12 dBs). Por el contrario, la *velocidad de partícula*, al medirse solo la vibración en sentido perpendicular a la fuente, no se ve afectada por reflexiones de ningún tipo, logrando así tener mediciones de mucha más precisión y sin la influencia del ruido de fondo. Más aún, el rango dinámico es mucho mayor, logrando obtener mejor relación señal a ruido.[21]

Por estos motivos, con el objetivo de tener una mayor claridad y precisión, las mediciones de este trabajo se basarán principalmente en los mapas de *velocidad de partículas*.

2.1.8 Otros conceptos de interés

- Estanqueidad: Propiedad de un objeto o compartimento para evitar la entrada de cualquier fluido.
- Anecoico: Capaz de absorber las ondas sonoras sin reflejarlas.
- Frecuencia de resonancia: Aquellas que tienden a vibrar con una mayor amplitud.

2.2 La estanqueidad acústica en los buques de la flota

2.2.1 Importancia para la Seguridad Interior

Se define Seguridad Interior como la combinación de procedimientos y medios materiales y humanos en un buque cuyo fin es prevenir, reducir y corregir los efectos que puedan derivarse de accidentes o de acciones ofensivas por parte del enemigo. Por ello, en tiempo de paz, la supervivencia del buque está casi exclusivamente en manos de la Seguridad Interior. La probabilidad de supervivencia aumenta cuando también lo hace la capacidad de resistir el daño causado por un impacto, que depende, entre otros factores, de la capacidad de mantener la estanqueidad del buque.

El objetivo de la Seguridad Interior reside en permitirle al buque el desarrollo de su misión y su posterior regreso a puerto mientras que limita, controla y repara los daños recibidos. La tendencia actual está enfocada a la automatización de los barcos y, por consiguiente, a la reducción de las dotaciones. Por este motivo, es cada vez más importante el adiestramiento y la concienciación de todo el personal. Entre otros factores, deben conocer la importancia de mantener la integridad estanca y saber establecer dicha condición.

La Seguridad Interior se divide en tres etapas: **preparación** antes de que ocurra el daño, mediante la preservación de la integridad estanca, mantenimientos preventivos, etc., **acción** una vez ocurre el daño, localizando, conteniendo y minimizando los daños, y **recuperación** después de que se produzca el daño, llevando a cabo las reparaciones correspondientes.

Uno de los objetivos de la etapa de preparación es preservar las características de proyecto y construcción del buque en lo concerniente a la integridad estanca y resistencia estructural. En este sentido, una de las funciones del equipo de acústica avanzada que se empleará en el presente trabajo (*Scan and Paint*) es determinar aquellas zonas de un compartimento o puerta estanca en las que se pierde estanqueidad; por este motivo, el equipo de acústica avanzada formaría parte de la etapa de preparación, constituyendo una parte vital en la misma.[22]

“Las probabilidades de éxito ante una emergencia o avería se basan en un 90% en la etapa de preparación y solamente en un 10% en la etapa de acción.” Esta frase, obtenida del manual doctrinal de Seguridad Interior a bordo, define a la perfección la importancia que podría adoptar el equipo *Scan and Paint* en la Seguridad Interior.

2.2.2 Metodologías actuales de evaluación de las propiedades de estanqueidad de elementos y sistemas

El control de daños tiene cuatro objetivos básicos: tomar todas las medidas necesarias para prevenir daños, minimizarlos, controlarlos y realizar reparaciones. Se deben realizar inspecciones para comprobar la integridad estanca del barco y sus compartimentos. El sistema de mantenimiento

programado (PMS) especifica los detalles para la realización de estas pruebas e inspecciones. En este apartado se explicarán distintas pruebas para la comprobación de la integridad estanca.[23]

- **Inspecciones visuales:** En ocasiones se pueden descubrir agujeros o grietas simplemente observando de manera visual. Estas inspecciones se deben realizar de manera regular, en prácticamente todos los compartimentos del buque. El procedimiento es el siguiente: En primer lugar, hay que cerrar completamente el compartimento y asegurarse que no existe ningún modo de que entre luz en el mismo. Posteriormente, es preciso asegurarse de que todas las luces en el exterior estén encendidas. Es necesario que un observador permanezca dentro para comprobar si hay alguna filtración en el interior del compartimento. El hecho de que entre luz significará que se aprecia algún defecto que debe ser reparado de manera inmediata para asegurar la integridad estanca.[23] No obstante, en la Armada, este método está en desuso debido a su falta de precisión.
- **Prueba de aire:** Existe un plan de trabajo en el que se reflejan las fechas en las que se deben realizar estas inspecciones. También contiene información de cada compartimento estanco, así como el tipo de prueba que se realizó para comprobar la estanqueidad del mismo. Los compartimentos designados para realizar este tipo de pruebas están equipados con conexiones para conectar el equipo de prueba de aire. Es importante seguir de manera rigurosa las instrucciones que aparecen en el plan. La presión nunca debe exceder el valor señalado, ya que, si se supera este valor, podrían ocurrir graves daños en las estructuras y en los límites del compartimento.

Antes de comenzar este tipo de pruebas se deben realizar inspecciones visuales para detectar y reparar cualquier tipo de filtración, empleando el mayor número de observadores posible. A su vez, es necesario informar que se va a llevar a cabo una de estas pruebas. Asimismo, siempre debe haber un electricista encargado de cortar el suministro eléctrico a los elementos fijos de contraincendios, ya que, en caso de no realizarse, estos elementos se activarían al admitir el aire a presión.

El aire a presión que se emplea en este tipo de pruebas es de reducida intensidad, sin embargo, puede llegar a aparecer una fuerza peligrosa en puertas y escotillas, por lo que es necesario que nadie las abra mientras el compartimento está bajo presión.

Cualquier pérdida de presión que supere a la permitida en el plan, significa que existe cierto deterioro de la integridad estanca del compartimento. Las filtraciones serán identificadas por los silbidos generados por el aire al escaparse. Estas filtraciones deben ser marcadas y registradas para realizar las correcciones correspondientes. Otra manera para identificar la localización por donde se pierde aire es aplicando un jabón en los límites, juntas y cierres del compartimento. Cuando se introduzca el aire a presión se generarán unas burbujas indicando la posición de las filtraciones.[23]

- **Prueba de tiza:** Es la prueba más común para comprobar la efectividad de una puerta estanca. Simplemente consiste en pintar con una tiza el frisado de la puerta, previamente habiendo limpiado las juntas y el frisado, y cerrarla a continuación. Posteriormente se abre la puerta y se observa la tiza en la junta. Si la tiza no sigue una línea continua, el cierre no es estanco y requiere una reparación. Esta prueba, aunque es muy sencilla, no es del todo exacta, no obstante, si la junta y los pernos están en buen estado, el resultado proporciona una precisión razonable.

2.2.3 Identificación de los elementos y sistemas cuya estanqueidad resulta crítica desde el punto de vista de la seguridad interior

Las juntas de goma defectuosas son la principal fuente de filtraciones a través de los cierres. Se colocan en puertas y escotillas para proporcionar un cierre hermético, pero cuando se exponen a aceites, calor, grasas, etc. éstas comienzan a deteriorarse. Otro lugar común donde se suelen producir fugas es a través de los pernos que forman parte del mecanismo de cierre de la puerta, ya que éstos

atraviesan los marcos de la puerta. Para evitar estas pérdidas de estanqueidad, cada perno debe estar empaquetado. Otros factores que afectan a la estanqueidad de una puerta son que la puerta no este colocada correctamente en sus bisagras con respecto al marco de la puerta, que la superficie de apoyo al cierre no sea recta y uniforme, o que los cierres no ejerzan la misma presión en todos los lados de la puerta o escotilla.[23]

La compartimentación adquiere un papel de gran importancia en la estanqueidad de un buque. Divide el interior del casco en espacios más reducidos empleando elementos estructurales como mamparos, cubiertas, cuadernas, puntales, varengas, etc. Los mamparos son el elemento que separa un compartimento de otro. Se podría definir como una pared vertical que se extiende tanto transversal como longitudinalmente. La mayoría de ellos únicamente tienen la función de separar compartimentos sin cumplir la función de hermeticidad que impida la entrada de agua; sin embargo, los mamparos estancos, que se extienden desde la quilla hasta la cubierta principal, están ubicados en lugares concretos del barco para proporcionar una mayor resistencia a la entrada de agua y dividir el buque en secciones, de tal manera que si una sección se inunda el resto permanezcan secas.[23] A continuación, se mostrarán unas ilustraciones para reflejar claramente, de manera visual, lo comentado en este párrafo.

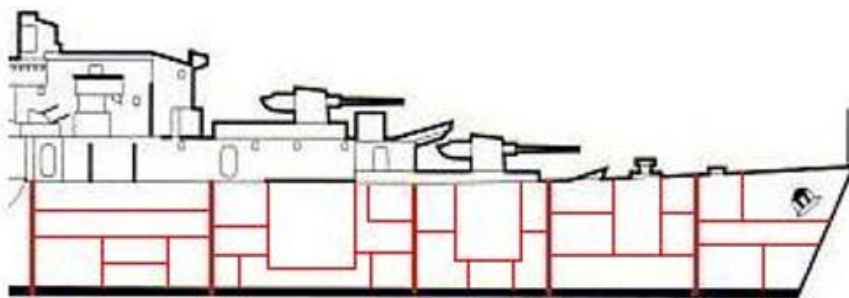


Figura 2-9: Ejemplo compartimentación buque ([24])

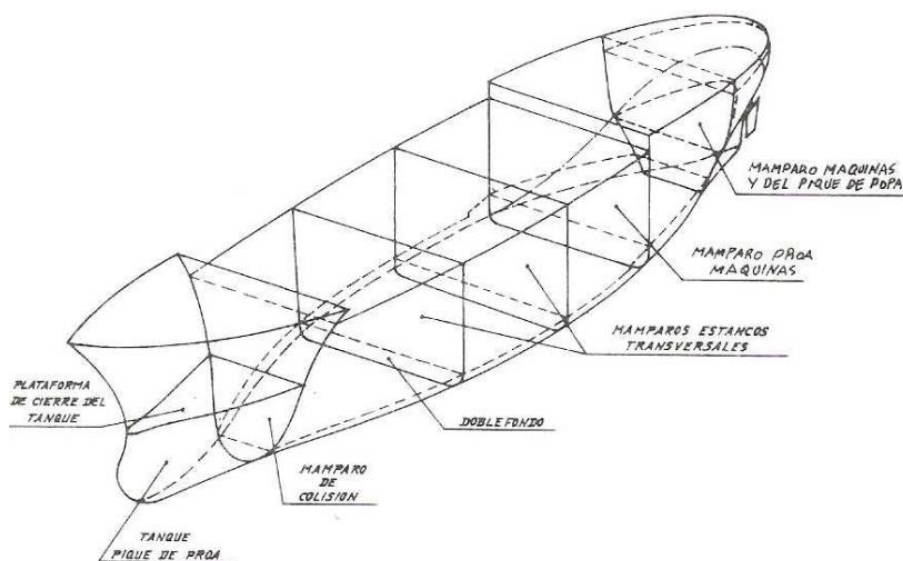


Figura 2-10: Ejemplo mamparos estancos ([25])

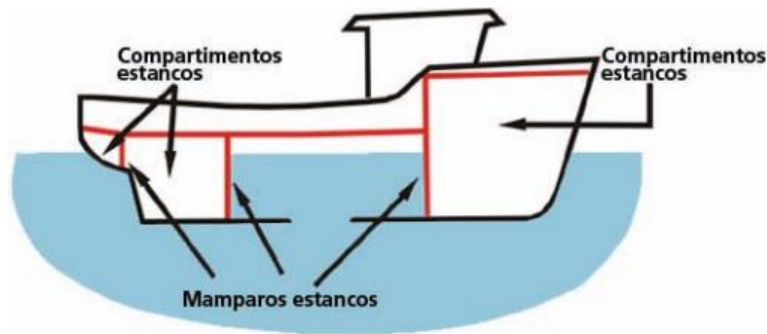


Figura 2-11: Ejemplo compartimentación estanca ([26])

Otro elemento fundamental para lograr la estanqueidad de un compartimento es la escotilla o la puerta estanca, elemento protagonista del presente trabajo. Están localizadas en los mamparos y deben de poseer el mismo grado de estanqueidad que la estructura en la que se encuentren. A su vez, los cierres estancos deben de ser capaces de soportar la presión de estanqueidad sin que se filtre agua. Según la regla 16.2 de la IMO, “puertas estancas deben de someterse a prueba mediante una presión de agua a una altura desde el suelo del mamparo hasta el borde inferior de abertura de la puerta, o hasta el plano de agua final o intermedio más desfavorable durante la inundación”. Las puertas de gran tamaño o las escotillas que dificulten la realización de estas pruebas están exentas del cumplimiento de esta prueba, siempre y cuando se demuestre, mediante cálculos, que mantienen la estanqueidad a la presión de diseño. Estos cálculos se realizan mediante la prueba de aire mencionada anteriormente.[27]

Las puertas y escotillas se caracterizan, principalmente, en función de sus cierres estancos. A continuación, se propondrán una serie de ejemplos con sus respectivas características.

- **Puerta estanca de acción rápida (figura 2-12):** Este tipo de puertas se emplean para el tránsito y acceso o salida entre la superestructura y la cubierta exterior. También para los pasillos principales o salas como el CIC, sala de máquinas, etc.[28]

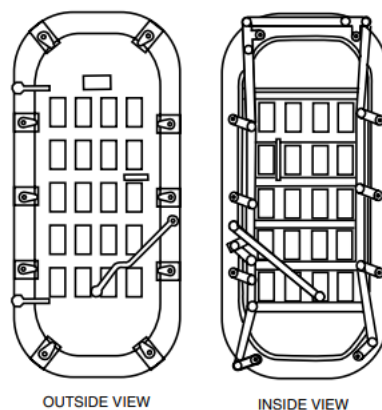


Figura 2-12: Puerta estanca de acción rápida ([28])

- **Puerta estanca con cierre individual (figura 2-13):** Este tipo de puertas puede tener entre cuatro y doce cierres individuales, las de diez normalmente se encuentran debajo de la línea de flotación para asegurar un nivel más alto de estanqueidad. Debido a la falta de velocidad de abertura de este tipo de puertas, suelen usarse en zonas en las que se genera poco tránsito de personal.[28]

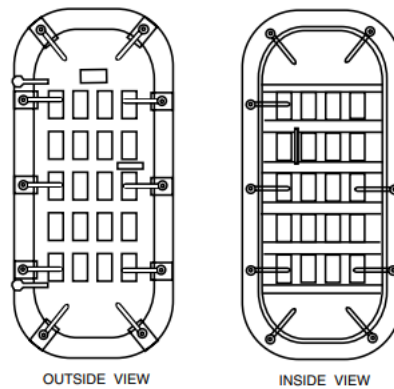


Figura 2-13: Puerta estanca con cierre individual ([28])

- **Escotilla estanca elevada (figura 2-14):** Ubicadas en áreas de tránsito poco denso, tanto en exteriores como en interiores, en las que no se requiere un acceso rápido. [28]

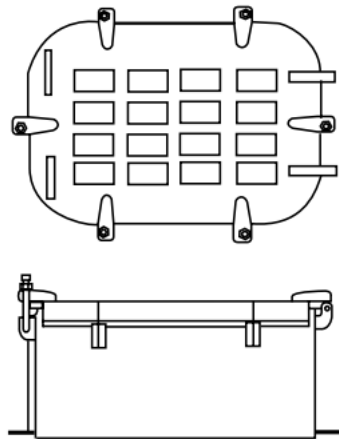


Figura 2-14: Escotilla estanca elevada ([28])

- **Escotilla estanca con portilla (figura 2-15):** A diferencia de la escotilla anterior, esta se instala en zonas que requieren acceso rápido y en las que se produce tráfico denso de personal. Tienen portillas de escape para que la entrada y salida sea más veloz.[28]

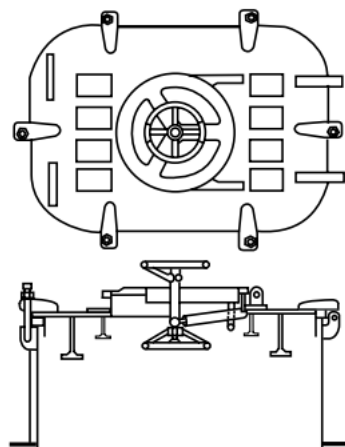


Figura 2-15: Escotilla estanca con portilla ([28])

Como ya se ha mencionado anteriormente, las puertas estancas se localizan en los mamparos, en una gran cantidad de compartimentos; sin embargo, se aprecian algunos más críticos que otros en lo

que respecta a mantener la estanqueidad. Uno de los más importantes es la ciudadela. Antes de explicar qué es la ciudadela, es necesario explicar que es la defensa NBQR.

La defensa NBQR (Nuclear, Biológica, Química y Radioactiva) consiste en el empleo de medios disponibles para proteger al buque y a las personas de cualquiera de estos agentes. Esta defensa no solo consiste en sobrevivir a este tipo de ataque, sino en mantener la máxima capacidad operativa durante un tiempo prolongado.

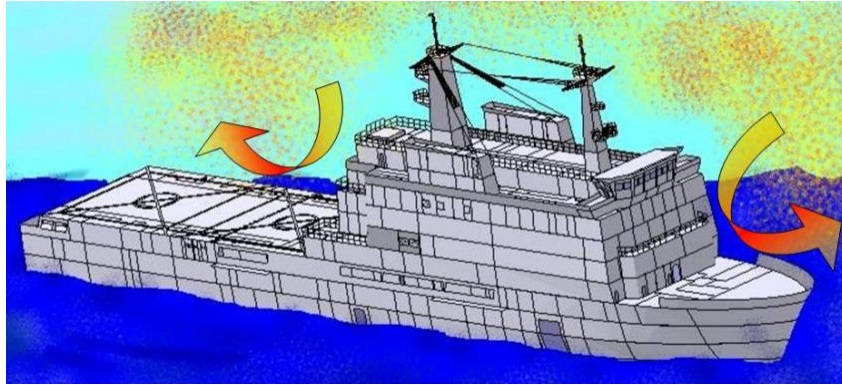


Figura 2-16: Buque afectado por el aire contaminado ([29])

Debido a la multitud de amenazas NBQR, las unidades desplegadas en cualquier zona de operaciones pueden sufrir ataques de este tipo, por lo que es fundamental estar bien preparado para resistir este tipo de ambiente.

La defensa NBQR está compuesta por distintos componentes como se puede observar en la figura 2-17. No obstante, solo será necesario abordar la protección física para entender qué es la ciudadela.



Figura 2-17: Componentes de la defensa NBQR ([30])

Se entiende por protección física como las medidas encaminadas a reducir al mínimo posible los daños que se puedan derivar de ataque NBQR. Se distinguen dos tipos de medidas: individuales y colectivas, en las que se encuentra la ciudadela. [30]

La ciudadela no se trata de un único compartimento, sino de un conjunto de compartimentos adyacentes protegidos contra una posible contaminación, mediante el empleo de aire filtrado, y manteniendo una presión en su interior de 5mbar superior a la atmosférica exterior. Esta diferencia de presión impedirá que el aire contaminado procedente del exterior entre en el compartimento y permitirá quitarse el equipo de protección individual.

A su vez, la ciudadela tratará de abarcar el mayor número de compartimentos posibles, véase espacios de habitabilidad como sollados, compartimentos operativos como el CIC o el puente de gobierno o compartimentos de armas. También sería deseable abarcar a la cámara de máquinas,

aunque, debido al gran volumen de aire que poseen, resulta prácticamente inviable lograr mantener la presión de 5 mbar que requiere la ciudadela, no obstante, su presión sigue siendo considerablemente superior a la atmosférica, concretamente 4mbar. [29]

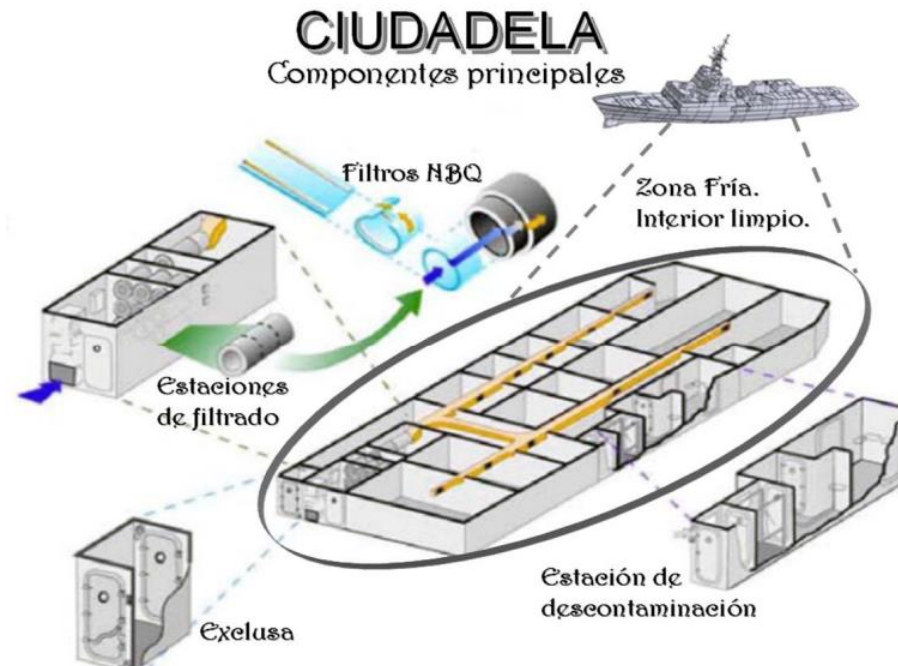


Figura 2-18: Componentes de una ciudadela ([30])

Como se puede observar, las puertas estancas adoptan una posición fundamental de cara a mantener un ambiente limpio de agentes NBQR, ya que, si fallara la estanqueidad, por mucho incremento de presión que haya en el interior del compartimento, sería inevitable la entrada de aire contaminado.

2.3 Equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*

El equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* que se utiliza en el presente estudio permite la obtención de información sonora mediante el uso de una sonda P-U, así como la información de su posición en relación con el elemento evaluado empleando una cámara de video. Mediante su empleo se generan mapas sonoros de los parámetros de *presión sonora*, *velocidad de partícula*, *intensidad sonora* e impedancia acústica, como se puede ver en la figura 2-19.

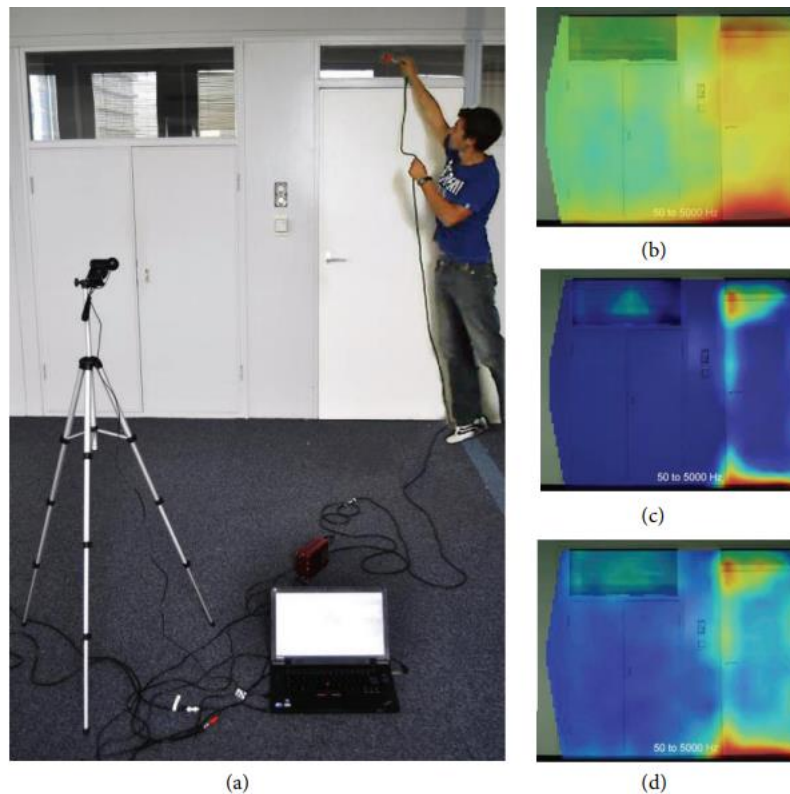


Figura 2-19: a) Montaje del equipo, b) presión sonora, c) velocidad de partícula [31]

2.3.1 Componentes del equipo

Los componentes del equipo de acústica avanzada son los siguientes:

- **Cámara de video WebCam Pro 9000:** Permitirá grabar todo el recorrido que realice la sonda sobre la superficie a medir.
- **Software de Scan and Paint Microflow Velo 4.A:** Dividido en pestañas que le permiten al usuario seguir el proceso de adquisición y análisis de datos de forma ordenada. La mejor manera de explicar el funcionamiento del software es mediante imágenes.

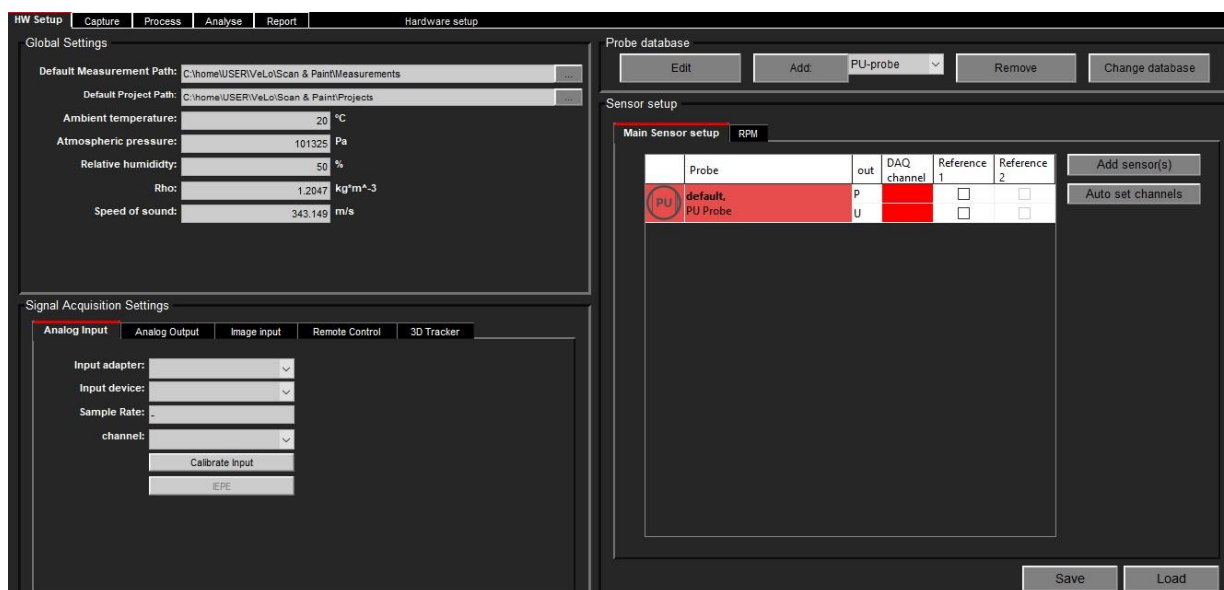


Figura 2-20: Pestaña HW Setup del software Scan and Paint (Elaboración propia)

En la figura 2-20 se muestra la pestaña de *HW Setup* del *Software Scan and Paint*. Es la primera pestaña de las 5 disponibles. En ella se pueden seleccionar las condiciones ambientales del medio en el que se va a realizar la medición, con el objetivo de mejorar la precisión de los datos obtenidos. A su vez, es en esta pestaña donde se selecciona la cámara de vídeo empleada para grabar el proceso.

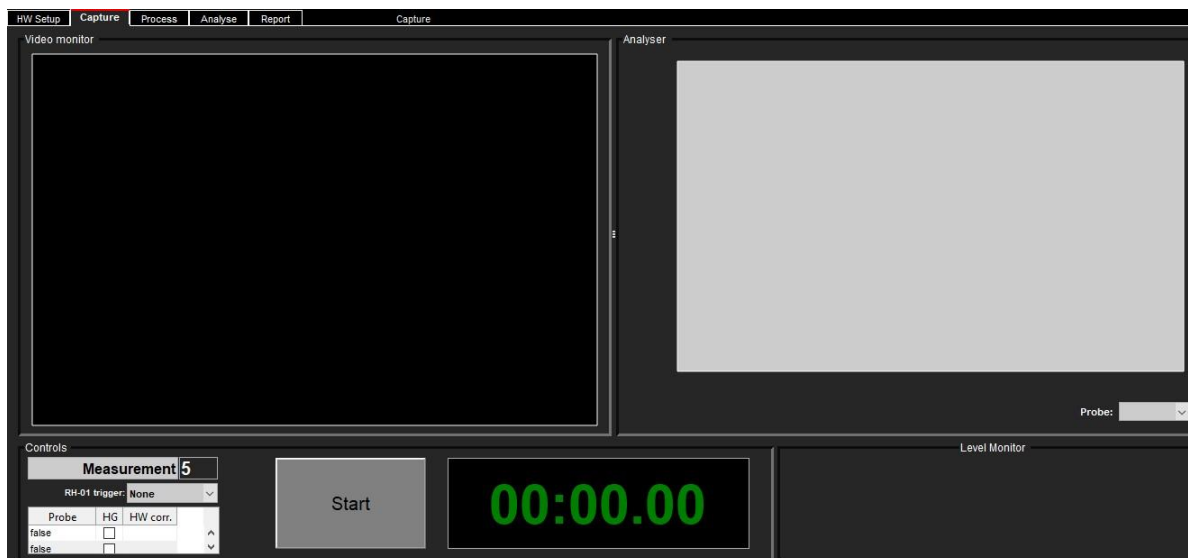


Figura 2-21: Pestaña *Capture* del software *Scan and Paint* (Elaboración propia)

En la figura 2-21 se aprecia el apartado de *Capture*. Es aquí donde se representa la imagen de la cámara de vídeo y donde se eligen los parámetros de la misma como el contraste, el brillo, el tono, etc. Al pulsar el botón *start* comienza a grabarse todo el recorrido realizado por la sonda P-U, mostrándose los valores de *presión sonora* y *velocidad de partícula* en la parte inferior derecha de la pantalla.

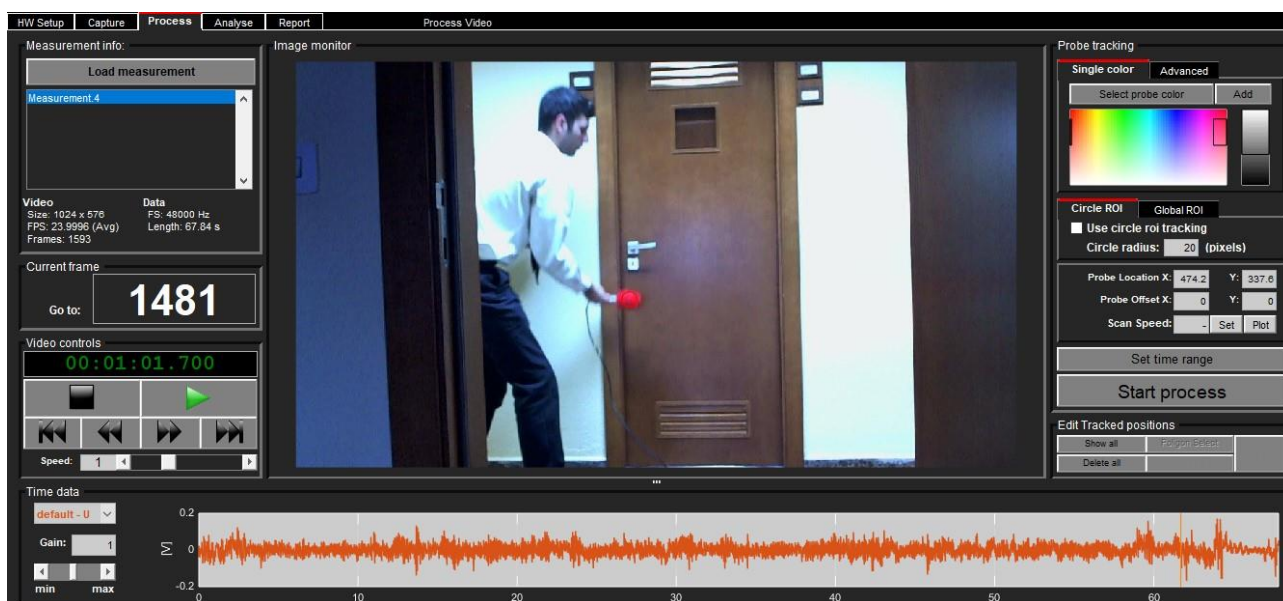


Figura 2-22: Pestaña *Process* del software *Scan and Paint* (Elaboración propia)

En la figura 2-22 se observa la pestaña de *Process*. En esta pestaña en primer lugar es necesario cargar el video obtenido de la pestaña anterior pinchando en *Load measurement*. A continuación, se debe seleccionar el color de la sonda para que el algoritmo de rastreo de color sepa

cuál es el color al que tiene que hacer seguimiento, en este caso el rojo. También es importante destacar el botón de *set time range*, ya que es ahí donde se pueden eliminar los fragmentos del vídeo que no se desean medir, bien porque ha aparecido un ruido externo no esperado o porque el video es excesivamente largo. Finalmente, para comenzar la medición, es necesario pulsar *Start Process*.

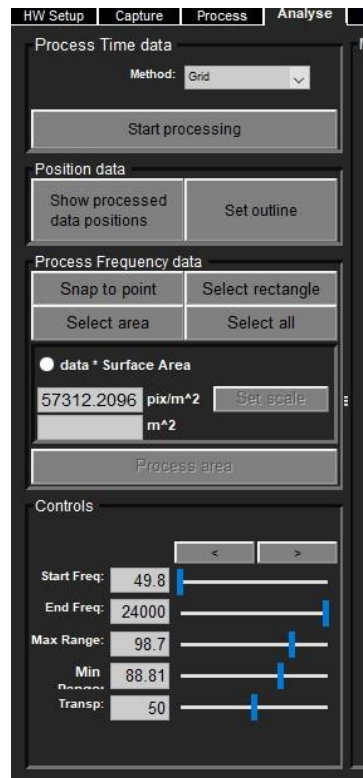


Figura 2-23: Pestaña *Analyse* del software *Scan and Paint* (Elaboración propia)

En la figura 2-23 se muestra la pestaña de *Analyse*, empleada para seleccionar el método de discretización de datos, por puntos o de cuadrícula, explicados detalladamente en el siguiente subapartado. A su vez, se puede seleccionar el rango de frecuencias medidas que se desean representar.

- **Sonda *Microflow* P-U:** Permite la medición simultánea de la *velocidad de partícula* y de la *presión sonora*. Tiene una banda de 20 Hz hasta 20 kHz.[32]

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

Tabla 2-1: Características de la sonda *Microflow* P-U ([32])

Está compuesta por un sensor de *velocidad de partícula* y un micrófono. El sensor de *velocidad de partícula* consiste en dos cables de platino de tamaño muy pequeño y muy cercanos entre sí, calentados a unos 300 °C. La resistencia de los cables depende de la temperatura. Una señal acústica de la *velocidad de partícula* en dirección perpendicular cambia la distribución de la temperatura instantáneamente, ya que uno de los cables es enfriado más que el otro por el flujo acústico. Esta

diferencia de resistencia proporciona una señal proporcional a la *velocidad de partícula*. [33] A la izquierda de la figura 2-24 se puede observar la sonda *Microflow* P-U, en el centro su estructura y a la derecha los dos cables de platino.

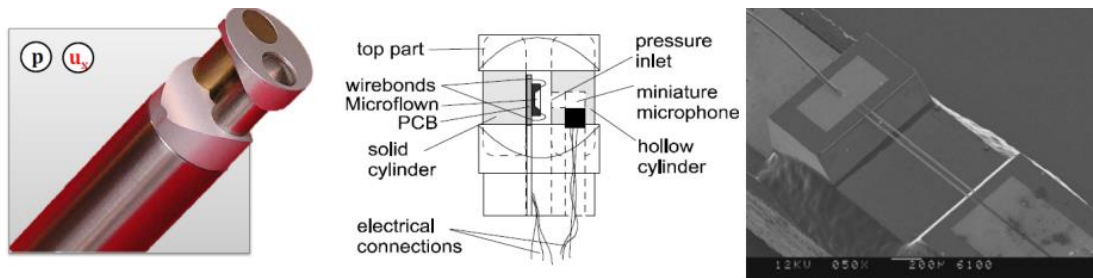


Figura 2-24: Sonda *Microflow* P-U, estructura y cables del sensor de *velocidad de partícula*. (I33I)

Por otro lado, el micrófono que incorpora la sonda P-U se encarga de medir la *presión sonora*. En la figura 2-25 se puede observar el resultado que se obtiene de una sonda PU: *velocidad de partícula* (U) mediante el sensor de *velocidad de partícula* y *presión sonora* (P) mediante el micrófono.

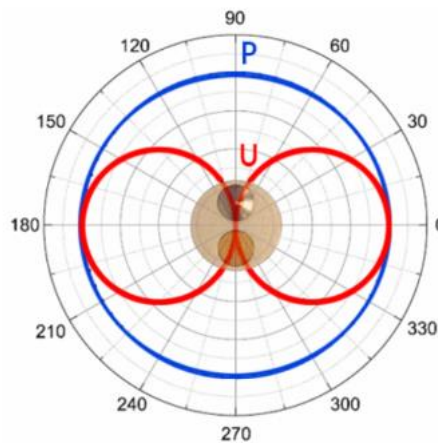


Figura 2-25: Representación de las medidas de presión y *velocidad de partícula* [34]

Marca de color: Objeto situado en la sonda que le permite al algoritmo de rastreo de color automático distinguir entre el fondo y la sonda, al igual que evita que la sonda se vea afectada por el ruido ambiental (viento principalmente).

Acondicionador de la señal (MFPA-2): Se emplea para alimentar las sondas P-U y para amplificar las señales de *presión sonora* y *velocidad de partícula* recibidas a dos salidas BNC configuradas a un nivel de línea. [35]

Módulo de adquisición de datos (Scout V2): El Scout V2 es un sistema de adquisición de datos USB de 24 bits de alta precisión, diseñado para mediciones de ruido y vibración con sensores *Microflow*. Tiene la gran ventaja de ser perfecto para mediciones portátiles, al funcionar por USB. [36]



Figura 2-26: Componentes equipo *Scan and Paint* ([37])

2.3.2 Proceso metodológico para la obtención de datos acústicos y su posterior análisis

El proceso es sencillo, no se requiere tener un conocimiento amplio del software previo a su empleo, y muy rápido en comparación con otros métodos. En primer lugar, es necesario colocar la cámara justo en frente, de manera perpendicular, de la superficie a medir. Posteriormente se recorre, haciendo un barrido, esta superficie con una sonda P-U a una distancia de aproximadamente 5 centímetros (a menor distancia, mayor precisión tendrán los datos obtenidos). En la figura 2-28 se muestra la disposición adecuada del equipo para llevar a cabo la medición. En el post procesado, la posición de la sonda se extrae de manera automática empleando un algoritmo de rastreo automático de color en cada fotograma del video. En el caso de que la sonda y la superficie de medición tengan el mismo color, se usará la marca de color mencionada en el subapartado anterior. Todo este proceso finaliza con la obtención de los distintos mapas acústicos. [37]

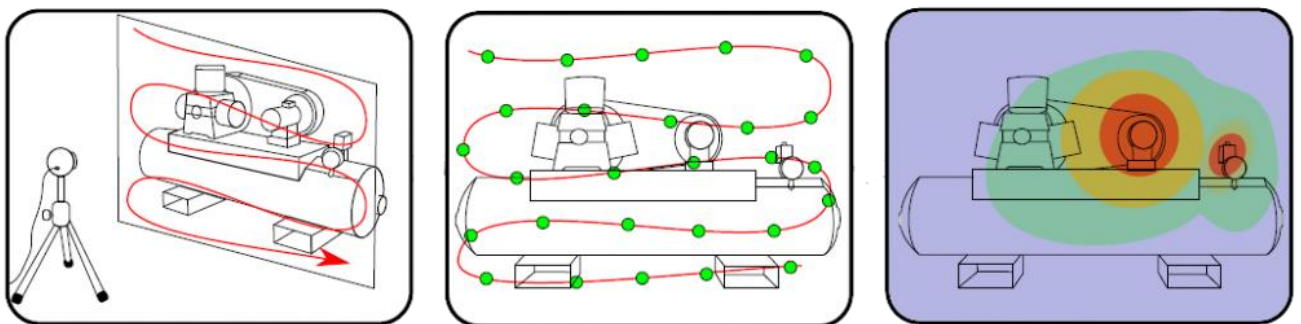


Figura 2-27: Proceso de obtención de datos ([37])



Figura 2-28: Proceso de obtención de datos en el CASI de la Escuela Naval Militar. (Elaboración propia).

Uno de los pasos más importantes consiste en la fragmentación de los datos adquiridos. Para ello se ha de definir un método que garantice la precisión de esta división de datos. *Scan and Paint* permite seleccionar entre dos métodos de discretización de datos: *Método de la cuadrícula plana* y *método por puntos*.

Método de cuadrícula plana. Este tipo de discretización proporciona una descomposición de un dominio continuo en un conjunto finito de elementos de igual tamaño. Como resultado, se logran estimaciones homogéneas en toda la cuadrícula, manteniéndose la resolución y la precisión a lo largo del espacio.

El sistema de seguimiento de *Scan and Paint* estima la posición del sensor analizando fragmentos de video individuales. No obstante, este seguimiento no es completamente exacto ya que puede haber errores debido a la profundidad de la imagen, por ejemplo. Sin embargo, estos errores se pueden minimizar posicionando la cámara de manera perpendicular a la superficie de medición y manteniendo una distancia de medida constante.

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

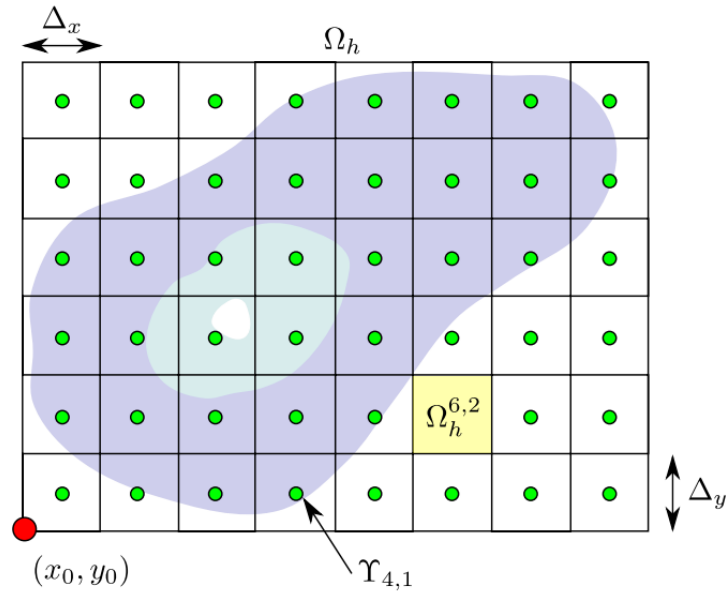


Figura 2-29: División del área en celdas ([38])

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

Una vez el dominio espacial está discretizado, se puede establecer un vínculo entre los datos adquiridos con un transductor móvil y la cuadrícula establecida. El recorrido que sigue el sensor se divide en distintos segmentos utilizando la estructura de la cuadrícula, asignando así una posición en el área de medición a cada segmento. Una celda puede tener asociada distintas secciones de la señal original si el sensor pasa por el mismo área en múltiples ocasiones. El uso de una sonda que incorpore un micrófono de nivel de *presión sonora* y un sensor de *velocidad de partícula* permite la medición de ambas magnitudes simultáneamente. En consecuencia, la aplicación del método de cuadrícula a una medición de escaneo proporciona la relación entre los datos de tiempo medidos y las diferentes celdas. La ruta seguida por la sonda determina qué celdas tienen datos asignados a ella y cuales están vacías. Por ende, es necesario realizar una media si múltiples señales de tiempo están asociadas a una misma celda. [38]

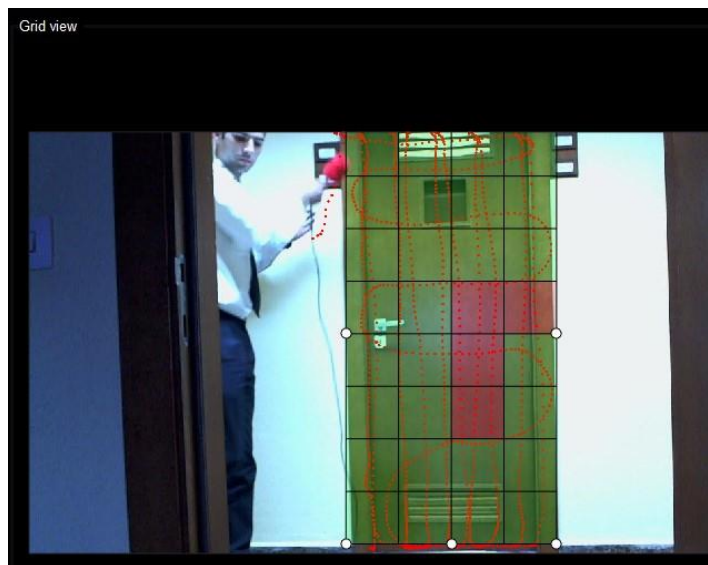


Figura 2-30: Método de cuadrícula del software Scan and Paint con tamaño de bloque 30 cm. (Elaboración Propia).

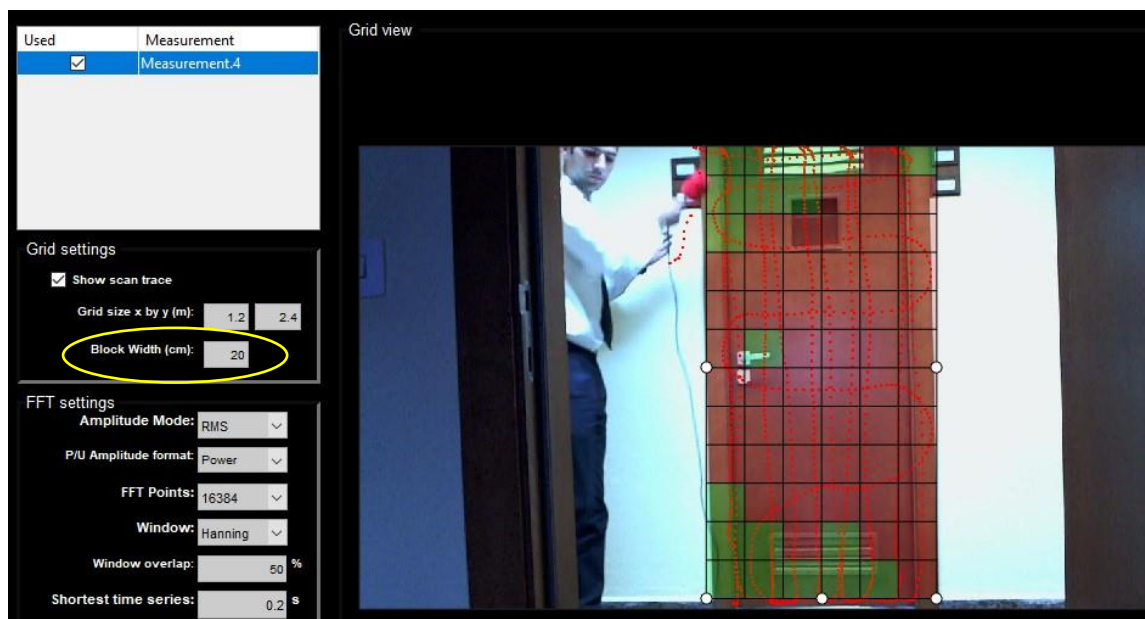


Figura 2-31: Método de cuadrícula del software *Scan and Paint* con tamaño de bloque 20 cm. (Elaboración Propia).

En la figura 2-30 se muestra un ejemplo del método de cuadrícula aplicado en el *Software Scan and Paint*. Como se puede apreciar hay cuadrículas verdes y cuadrículas rojas. Las cuadrículas se marcan en rojo cuando no se dispone de suficientes puntos para calcular un promedio, por lo tanto, el objetivo es maximizar el número de cuadrículas verdes. Para ello se emplea el elemento *block width* (ancho de bloque). En la figura 2-31 el tamaño de cuadrícula se reduce a 20 cm en lugar de 30 cm, lo que induce un mayor número de cuadrículas rojas en comparación con la figura 2-30.

Método por puntos. A diferencia del método anterior, en lugar de una descomposición bidimensional del espacio cartesiano, éste emplea un enfoque de discretización de una sola dimensión. Se basa en la segmentación de los datos de seguimiento adquiridos en el proceso de escaneo. Puesto que el número de puntos de seguimiento es un número finito, es posible definir un conjunto de posiciones asociadas a la señal de audio adquirida. El resultado final es una cuadrícula de datos dispersos con una cantidad de puntos equivalente al número total de fragmentos del video. En este método no es necesario establecer un vínculo entre el espacio de imagen y el entorno de medición real. Además, este método es más capaz que el de cuadrícula plana en condiciones en las que el área visible de la fuente difiere drásticamente de una geometría plana o si el eje de la cámara no está perpendicular a la superficie a medir. Sin embargo, la falta de promedio entre las mediciones espectrales de puntos cercanos sí da lugar a una mayor variabilidad en los resultados de los mapas sonoros, afectando a la suavidad visual de la representación. Este método no es demasiado práctico si no se disponen de suficientes puntos de medición; sin embargo, permite escuchar cada punto concreto medido. Esto es útil de cara a, por ejemplo, distinguir partes de un motor como un piñón, un cigüeñal, etc.[38]

En resumen, el método por puntos proporciona una mejor resolución espacial y una reducción del error provocado por la posición de la cámara. Por otro lado, el método de cuadrícula plana proporciona mejores resultados estadísticos promediados, mayor robustez contra fuentes de ruido no estacionarias y un procesamiento más rápido. Por tanto, la elección del método a utilizar dependerá de la precisión requerida y de las condiciones de medición.

2.3.3 Ventajas y novedades aportadas por el equipo de medida

Los procedimientos actuales de medida para la caracterización del campo sonoro se pueden agrupar en tres categorías bien diferenciadas: paso a paso, simultáneas y escaneo.

Paso a paso es la técnica más común para la representación espacial de campos acústicos estacionarios. Se basa en la adquisición de datos en un conjunto de posiciones discretas. La principal ventaja de este método es la flexibilidad ya que el número de transductores y su posición espacial es completamente personalizable. El coste del equipo depende principalmente del número de sensores utilizados, sin embargo, cuantos más sensores se usen, menor será el tiempo necesario para realizar un experimento. En el caso de que todas las posiciones sean caracterizadas en el mismo instante de tiempo, es necesario usar un sistema multicanal de cara a realizar **medidas simultáneas**. [31]

Con el objetivo de reducir el tiempo de medición de un experimento sin necesariamente aumentar el coste del equipo se emplea el **método de escaneo**. La principal diferencia de esta técnica respecto a las mencionadas anteriormente reside en que las mediciones ya no se realizan en puntos concretos puesto que el sensor se mueve durante la fase de adquisición de datos. Debido al alto coste de sistemas de seguimiento empleados y la complejidad del montaje necesario para llevar a cabo los experimentos, este método no ha sido tan popular como los otros dos, a pesar de las capacidades que ofrece. No obstante, el método de escaneo *Scan and Paint* simplifica la complejidad de métodos de escaneo anteriores al usarse una única sonda para la medición y al reemplazarse el sistema de seguimiento por un simple sensor de movimiento manual. Además, maximiza la flexibilidad minimizando el coste. Aparte, la sonda mencionada incorpora sensores de *velocidad de partícula* y de *presión sonora*, lo que permite un estudio completo del campo sonoro, a su vez, si se conoce la excitación, también se pueden investigar propiedades del material como la impedancia, la reflexión o la absorción. Por si fuera poco, una de las principales ventajas que presenta es la localización de la fuente en un campo cercano al poder medir la *velocidad de partícula*. Esto es muy útil ya que obtener una respuesta precisa es muy sencillo cuando las condiciones son simples, pero para escenarios complejos como aquellos en los que el lugar de medición es reverberante, sin la *velocidad de partícula* la medida obtenida no sería precisa. Es decir, este método, empleado en el presente trabajo, permite eliminar la influencia del ruido de fondo.

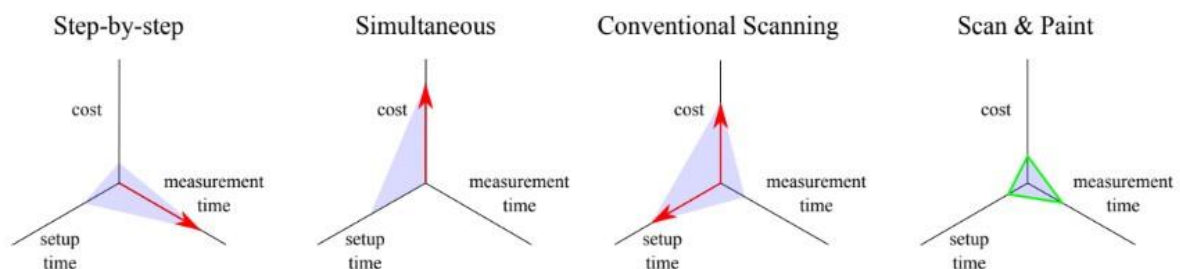


Figura 2-32: Representación de los distintos procedimientos de medida ([38])

Hace unos años, el almirante general Jaime Muñoz Delgado y Díaz del Río expresó: “En los últimos años el mantenimiento de la Fuerza Naval se ha ido transformando... y está obligando a elaborar nuevos procedimientos para mantener nuestros buques e instalaciones y revisar todos los procesos de trabajo relacionados con el mantenimiento en su conjunto.” En este sentido, el equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* podría llegar a formar parte de esta transformación, ya que, para lograr un mantenimiento adecuado, es necesario comprobar la estanqueidad acústica entre los distintos compartimentos del buque.

Otras de las aplicaciones que permite son la visualización de las formas de deflexión operativa (visualización de los patrones de movimiento o deformación que experimenta una estructura en condiciones de operación), visualización de la manera en la que cambia la forma en la que un dispositivo emite energía, o aplicación de técnicas TPA (*Transfer Path Analysis*) para ver cómo se propaga un ruido o vibración en una estructura. Esta última aplicación, al poder medirse en su entorno real de operación, gracias a la *velocidad de partícula*, permite obtener datos que podrían ser

fundamentales de cara a la identificación de posibles irregularidades futuras. Esto permitiría centrar las actividades de supervisión y mantenimiento a aquellos componentes más propensos a tener problemas, bien navegando o en puerto. [31] [39]

2.3.4 Su empleo en los sectores del automóvil, naval y aeronáutico: lecciones aprendidas

El equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* se ha empleado y se sigue utilizando de manera muy efectiva para distintos estudios, principalmente en el sector automovilístico, pero también en el sector naval y aeronáutico. En este apartado se mencionarán algunos de los trabajos realizados previamente con este equipo.

M. Viscardi y otros investigadores realizaron unas mediciones para estimar las propiedades de amortiguamiento de espumas viscoelásticas innovadoras. En las figuras 2-33 y 2-34 se puede observar la diferencia detectada, mediante la evaluación realizada, entre dos espumas estudiadas, apreciándose un mejor comportamiento acústico en la espuma nueva respecto a la original.[40]

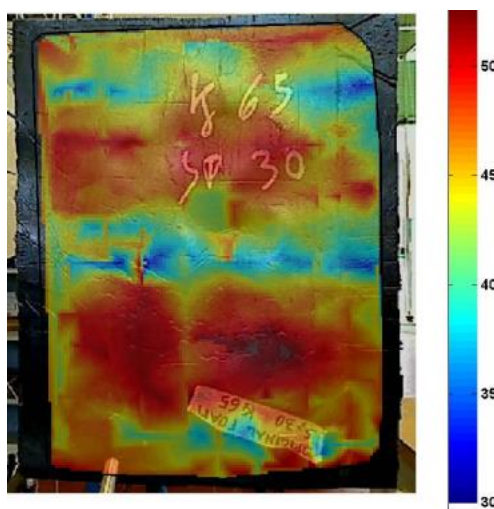


Figura 2-33: Espuma original ([40])

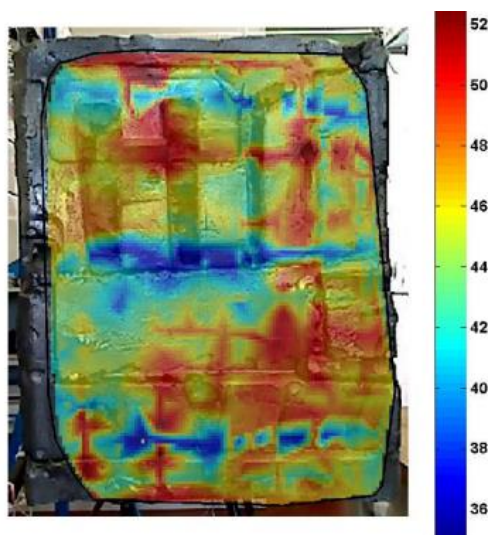


Figura 2-34: Espuma final ([40])

Continuando con ejemplos de trabajos previos, el deseo de lograr reducir el sonido generado por los UAV impulsó a Rowe y otros a investigar la manera de optimizar y disminuir este ruido. Incorporaron unos recubrimientos en el UAV para reducir el remolino que se forma en el borde de la pala, logrando absorber y cambiar distintas frecuencias, disminuyendo también la turbulencia que se

produce en la siguiente pala de la hélice. Para medir la efectividad de este recubrimiento obtuvieron mapas de *intensidad sonora* y de *velocidad de partícula* empleando la sonda P-U. [41]



Figura 2-35: UAV *Scan Eagle* sobre la cubierta del Buque Galicia ([42])

Asimismo, Guiot y otros investigadores emplearon el equipo *Scan and Paint* en un turbocompresor para localizar las fuentes de ruido y su posterior estimación de *potencia sonora* de cada parte del mismo. En la siguiente imagen se pueden observar los pasos realizados para la obtención de estos datos. [33] Se aprecia como la parte más a la derecha del compresor es aquella con mayor nivel de *presión sonora* y *velocidad de partícula*. Es importante añadir que este experimento fue posible debido a que el equipo empleado permite obtener la *velocidad de partícula* incluso en ambientes reverberantes, lo que representa una de las muchas ventajas.



Figura 2-36: Pasos para la obtención de datos del turbocompresor ([33])

Otros investigadores utilizaron esta tecnología para diagnosticar las pérdidas de estanqueidad acústica de un vehículo. Para ello realizaron dos test desde el interior del vehículo, uno en el que el vehículo se movía a distintas velocidades y otro en el que se encontraba estático y la fuente sonora era un altavoz localizado en el exterior. Se crea una fuga artificial en la ventana mediante una pequeña apertura. En el primer test, para bajas frecuencias la fuga artificial se detectaba fácilmente y para frecuencias más altas aparecían filtraciones de sonido también en la parte baja de la ventana.

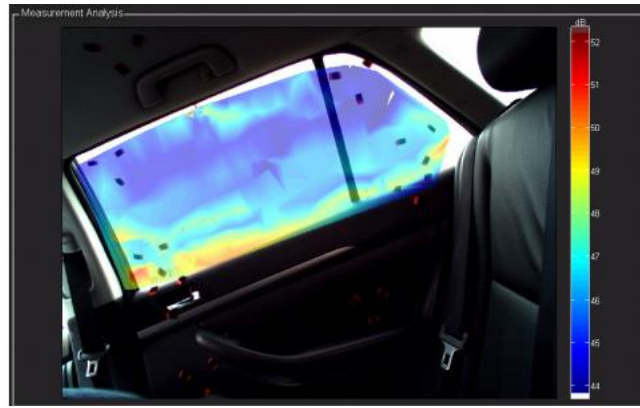


Figura 2-37: Velocidad de partícula 2kHz-10kHz a 40 km/h ([43])

Sin embargo, para el segundo test, cuando el vehículo se encuentra estático, aunque la fuga artificial se identificaba fácilmente, a frecuencias altas las filtraciones en el caso del vehículo en movimiento ya no se observaban.

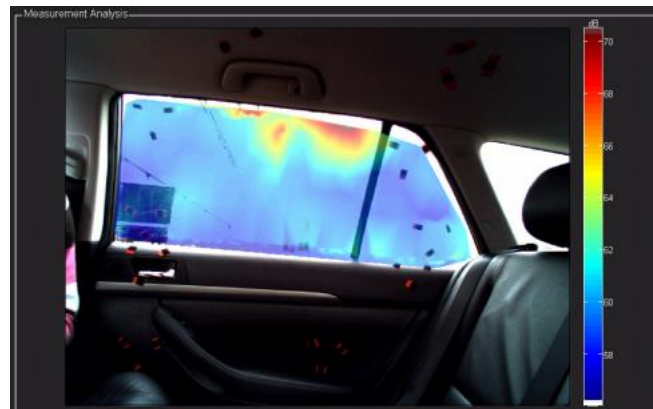


Figura 2-38: Velocidad de partícula 2kHz-10kHz en estático ([43])

Concluyeron que el método del altavoz no era demasiado preciso y que era preferible la prueba en la que el coche se encontraba en movimiento. [43]

En la figura 2-39 se puede visualizar, de manera nítida, la increíble aplicación que se le puede otorgar al equipo *Scan and Paint* de cara a evaluar la calidad y la estanqueidad de la carrocería en vehículos. Se observa que es en la esquina inferior de la ventana delantera donde la estanqueidad resulta más reducida y, por tanto, la zona que ha de ser evaluada en detalle.



Figura 2-39: Medición parámetro velocidad de partícula para evaluar la estanqueidad de un vehículo ([44])

3 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS Y SISTEMAS ASOCIADOS A LA ESTANQUEIDAD ENTRE COMPARTIMENTOS DE BUQUE MEDIANTE TÉCNICAS DE ACÚSTICA AVANZADA: CASOS DE ESTUDIO

3.1 Desarrollo de la evaluación acústica: ensayos de estanqueidad in situ

3.1.1 Mediciones realizadas: elementos y sistemas evaluados, características técnicas, estado, emplazamientos

En primer lugar, debido a la falta de familiaridad con el uso del equipo, se llevaron a cabo pruebas en una puerta de acceso al cuartel de alumnos Almirante Francisco Moreno (AFM). En la figura 3-1 se aprecia la disposición de todo el equipo para la realización de dichas mediciones. La cámara se situó, de manera perpendicular, a unos 3 metros de la puerta para lograr cubrir toda su superficie. Debido a la falta de suministro eléctrico en el lugar de medición fue necesario hacer uso de dos regletas para conseguir prolongar el equipo a la posición adecuada.



Figura 3-1: Montaje equipo para prueba en puerta acceso cuartel AFM. (Elaboración propia).

En el lado opuesto de la puerta se colocó la fuente de ruido, un altavoz *Ultimate Ears Megablast*, cuyo máximo nivel de presión sonora se sitúa en 93 dB.



Figura 3-2: Altavoz *Ultimate Ears Megablast* en el lado contrario de la puerta a medir. (Elaboración propia).

Concluido este primer ensayo para la familiarización con el equipo, se comienzan a desarrollar pruebas para evaluar la estanqueidad de las puertas con características realmente estancas.

Como primera puerta estanca a medir se optó por una ubicada en el CASI de la Escuela Naval Militar, área donde se realizan ejercicios de Seguridad Interior. En la figura 3-3 y figura 3-4 se muestra la disposición tanto del equipo como de la fuente sonora. La cámara se situó a escasos metros de la puerta a medir y la fuente sonora se posicionó sobre una pequeña mesa para obtener una distribución del sonido equitativa sobre todas las partes de la puerta.



Figura 3-3: Disposición del equipo para la realización de la prueba. (Elaboración propia).



Figura 3-4: Disposición altavoz *Ultimate Ears Megablast* para el desarrollo de la prueba. (Elaboración propia).

Posteriormente, se decidió realizar una nueva prueba para determinar la capacidad del equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* de distinguir superficies con distinto espesor. Inicialmente se consideró reducir el grosor del mamparo del CASI, sin embargo, debido a la complejidad de esta tarea, la idea no se llevó adelante. En su lugar, se optó por realizar este ensayo en un cubo de chapa de 2 mm de grosor (figura 3-5). El espesor se redujo 1 mm empleando una radial. El altavoz empleado en la prueba anterior fue nuevamente utilizado como fuente de sonido, colocándose de manera vertical dentro del cubo.



Figura 3-5: Montaje del equipo y cubo de chapa. (Elaboración propia).

Además, se decidió realizar una pequeña fisura en el centro del cubo de, aproximadamente, dos centímetros de longitud. Completada la medición con la grieta para evaluar si el equipo era capaz de detectar la fuga, se procedió a sellar el orificio con cinta aislante y se llevó a cabo una nueva medición. En las figuras 3-6 y 3-7 se pueden ver tanto la grieta realizada en el cubo como el sellado mencionado.



Figura 3-6: Grieta realizada en el cubo. (Elaboración propia).



Figura 3-7: Grieta taponada con cinta aislante. (Elaboración propia).

Finalizada esta prueba, se continuó evaluando el funcionamiento del equipo, esta vez con una puerta *a priori* estanca. En los ensayos previos se sabía de antemano que el objeto bajo evaluación no iba a ser estanco, ya sea debido a su deterioro a lo largo del tiempo o simplemente porque no se requería que cumpliera la propiedad de hermeticidad. No obstante, a pesar de que las demás pruebas resultaron útiles de cara a comprobar y entender el funcionamiento del equipo, en esta ocasión se pretende verificar si realmente es capaz de medir la estanqueidad de un elemento que ha de ser estanco. La idea original era analizar la puerta estanca que da acceso al puente de gobierno de la lancha de instrucción de la Escuela Naval Militar *Guardiamarina Chereguini*, sin embargo, debido a la complejidad a la hora de colocar el equipo, esto resultó imposible. Por ello, para el desarrollo de esta prueba se analizó la puerta estanca del pañol de maniobra de la lancha. La ubicación de esta puerta está en la parte de más a proa de la toldilla del barco, área muy amplia en la que no hubo ningún inconveniente a la hora de situar el equipo, como se puede ver en la figura 3-8.



Figura 3-8: Montaje del equipo para prueba. (Elaboración propia).

El pañol de maniobra asume la función de almacenar todo el material empleado durante cualquier maniobra realizada a bordo. No solo debe guardarlo, sino que también debe protegerlo de la lluvia y del agua salada que pudiera entrar en la lancha. Para ello se emplea la puerta estanca mostrada en las figuras 9 y 10. A simple vista, se aprecia que la puerta no es estanca por la zona de la cerradura, sin embargo, el resto de las partes de la puerta parece que se encuentran en buenas condiciones.



Figura 3-9: Puerta estanca. (Elaboración propia)



Figura 3-10: Puerta estanca. (Elaboración propia).

3.1.2 Diagnóstico: análisis en laboratorio de la información acústica recogida

En este apartado se mostrarán los distintos mapas sonoros obtenidos tras el desarrollo de las pruebas y se realizará un análisis de los mismos.



Figura 3-11: Velocidad de partícula empleando el método de cuadrícula. (Elaboración propia).

En la figura 3-11 se presentan los resultados derivados de la medición de estanqueidad de la puerta de acceso al cuartel Almirante Francisco Moreno. Para la representación de la *velocidad de partícula* se ha empleado el método de cuadrícula con bloques de tamaño de 30 cm. En la imagen se puede apreciar cómo las principales zonas por las que existe una pérdida de estanqueidad acústica son la parte inferior derecha, por donde abre la puerta y la parte central izquierda. Este último es un lugar inesperado, sin embargo, observando con detalle la puerta para averiguar el motivo de este suceso, se localizó un hueco (figura 3-12) para el cierre de la puerta, resultando ser el principal causante de esta fuga de sonido.



Figura 3-12: Hueco para el cierre de la puerta. (Elaboración propia).

El siguiente análisis corresponde al experimento realizado sobre la puerta del CASI. En las figuras 3-13 y 3-14 se representan los mismos resultados del parámetro de *velocidad de partícula* obtenidos empleando el método de cuadrícula y el método por puntos, simplemente para mostrar la diferencia

entre ambos. Como se puede observar, el primero es más agradable a la vista y proporciona una idea de la localización de las filtraciones de sonido, mientras que el segundo muestra la ubicación de estas fugas de manera más detallada.

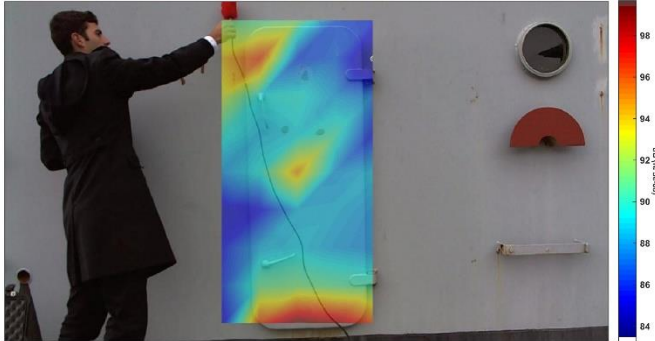


Figura 3-13: *Velocidad de partícula* empleando método de cuadrícula. (Elaboración propia).

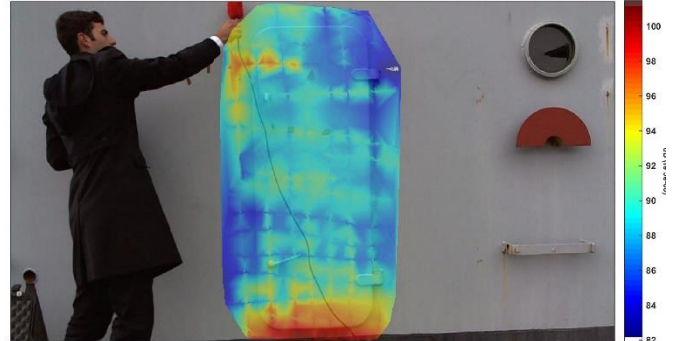


Figura 3-14: *Velocidad de partícula* empleando método por puntos. (Elaboración propia).

Analizando los resultados obtenidos se aprecia como hay dos zonas bien identificadas donde claramente sale el sonido y, por tanto, la puerta pierde su propiedad de estanqueidad. La principal zona de la puerta por donde ocurren las filtraciones de sonido es la inferior. Esto puede ser debido a distintos factores. El primero de ellos es el deterioro de esta zona como se puede apreciar en las figuras 3-15 y 3-16. Estas puertas llevan ya muchos años expuestas a inundaciones debido a que están ubicadas en el CASI. Por tanto, el desgaste de esta puerta se debe a la oxidación que ha ido sufriendo a lo largo de sus años. Este deterioro impide un cierre correcto, lo cual induce que la puerta pierda su propiedad de hermeticidad.



Figura 3-15: Parte inferior del marco de la puerta. (Elaboración propia).



Figura 3-16: Junta de goma de la puerta. (Elaboración propia).

Otra de las causas por las que este elemento puede perder la propiedad de estanqueidad son las grietas que posee la parte inferior del mamparo, como se puede apreciar en la figura 3-17. Aunque en la figura 3-13 y en la figura 3-14 no se ve esta parte del mamparo, lo más probable es que el micrófono haya captado el ruido filtrado en esta zona.



Figura 3-17: Grieta de la parte inferior del mamparo. (Elaboración propia).

Para comprobar si realmente es la parte inferior del mamparo la zona por la que se escapa el sonido, se taponó la grieta con cinta americana (figura 3-18). Aunque la manera de sellar la abertura no es ideal, en la figura 3-19 se aprecia cómo la cantidad de ruido filtrado se ve reducida hasta 8 dB, pasando, de este modo, a ser la parte superior izquierda de la puerta la zona con peor estanqueidad. No obstante, debido al deterioro de la goma y de la región inferior del marco de la puerta mencionados anteriormente, la región inferior de la puerta sigue sin ser completamente hermética.



Figura 3-18: Grieta taponada con cinta americana. (Elaboración propia).

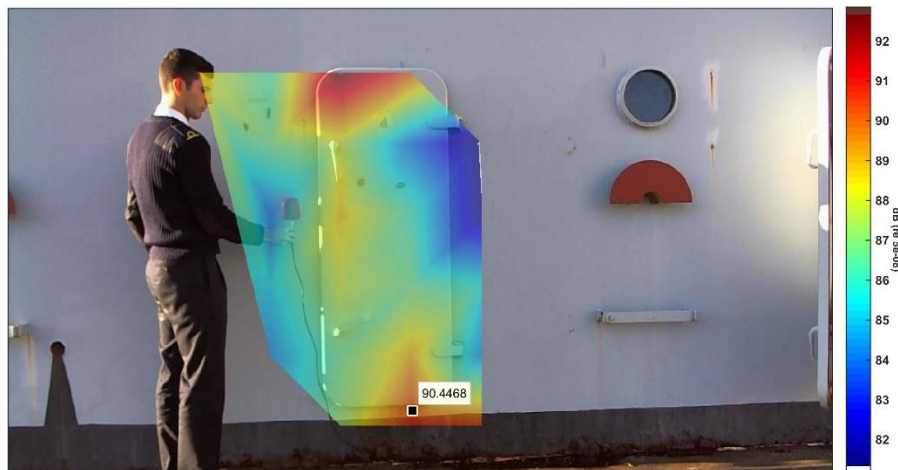


Figura 3-19: Velocidad de partícula empleando cinta americana en la grieta. (Elaboración propia).

La otra parte de la puerta por la cual se detecta una fuga del sonido es la zona superior izquierda. Como se puede observar, la puerta tiene dos cierres, sin embargo, uno de ellos no realiza su función correctamente debido al deterioro de este. Es por ello que, como se aprecia en la figura 3-20, la puerta permite una fuga acústica por esta zona. Por si fuera poco, además del cierre dañado, el burlete de la puerta también está defectuoso (figura 3-21).

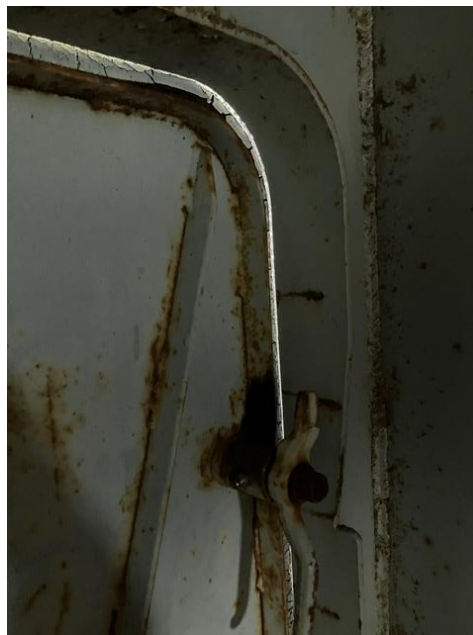


Figura 3-20: Región de la puerta no estanca debido al cierre. (Elaboración propia).



Figura 3-21: Goma dañada de la puerta estanca. (Elaboración propia).

Para contrastar los resultados obtenidos con el equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* se trató de realizar la *prueba de la tiza* con una pintura azul. Como bien se comentó en el subapartado 2.2.2 *Metodologías actuales de evaluación de las propiedades de estanqueidad de elementos y sistemas*, para la correcta realización de esta prueba es necesario pintar el frizado de la puerta y cerrarla. Posteriormente se abre la puerta y se comprueba si la pintura sigue una línea recta en la junta de goma de la puerta. Como se puede apreciar en la figura 3-23, la pintura azul no solo no sigue una línea recta, sino que tampoco sigue una línea continua, demostrando que, efectivamente, la puerta no cumple su condición de estanqueidad.



Figura 3-22: Frizado de la puerta con pintura azul. (Elaboración propia).



Figura 3-23: Junta de goma de la puerta con marcas de pintura azul. (Elaboración propia).

El análisis que se realizará a continuación es el correspondiente a la reducción de espesor del cubo de chapa mencionado en el apartado anterior. La lógica lleva a pensar que, en un compartimento, un espesor menor debería resultar en una mayor emisión de sonido al exterior. Sin embargo, en las figuras 3-24 y 3-25 se observa cómo el resultado es contrario al esperado. Cuando no se ha realizado el corte de chapa, el sonido que sale al exterior por la zona marcada con el puntero es de unos 97 dB, no obstante, cuando se realiza la reducción de grosor, la emisión de sonido se reduce aproximadamente 3 dB. La explicación de este suceso se puede deber principalmente a dos razones:

- **Reflexión interna:** Aunque no es lo normal, es posible que, debido al material y al tamaño del cubo, al reducirse el espesor, las ondas sonoras en lugar de reflejarse al exterior reboten en el cubo quedándose atrapadas en su interior, disminuyendo así la cantidad de sonido emitido al exterior.

- **Menor vibración:** Como se puede observar en las figuras 24 y 25, la zona con mayor *velocidad de partícula* se encuentra en la parte superior del cubo, esto se debe a las características de la tapa, ya que es la zona en la que mayor vibración se produce. En el resto del cubo las vibraciones son menores, por lo que la *velocidad de partícula* también es menor. Lo más probable es que al reducirse el espesor, la cantidad de material disponible para vibrar sea menor y, por ende, la *velocidad de partícula* captada por la sonda es menor.



Figura 3-24: *Velocidad de partícula* en cubo sin reducción de espesor. (Elaboración propia).



Figura 3-25: *Velocidad de partícula* en cubo con reducción de espesor. (Elaboración propia).

Finalizado este primer análisis se procede a realizar la evaluación del cubo con una fisura de 2 cm en su superficie lateral. Como se puede ver en la figura 3-26, mediante su avanzada tecnología

acústica, el equipo es capaz de distinguir claramente, con una gran precisión, imperfecciones de un tamaño considerablemente reducido. Se aprecia cómo la zona en la que se encuentra la grieta tiene una velocidad de partícula de 110 dB, valor muy superior a toda la superficie que lo rodea, indicando de esta manera que es ahí el lugar donde se encuentra la fisura.

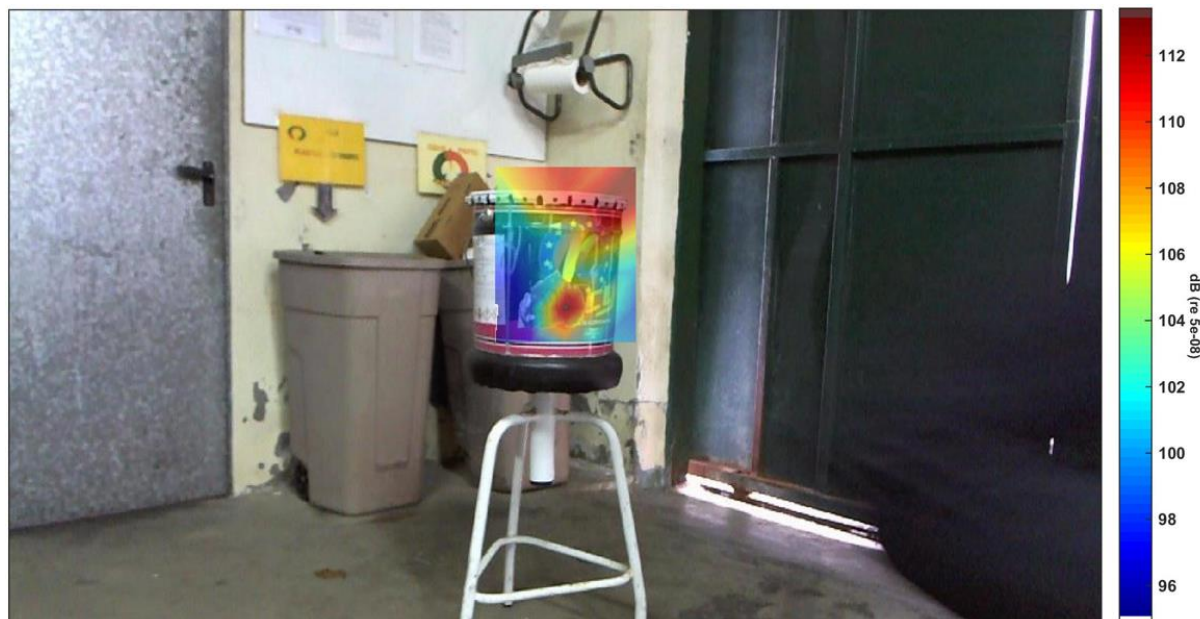


Figura 3-26: Velocidad de partícula con grieta de 2 cm en el cubo. (Elaboración propia).

Una vez sellada con cinta aislante la grieta, se realiza su correspondiente medición. El objetivo de ésta es verificar si, aunque de manera visual no se detecta la fisura, el uso del equipo facilita su localización. Sin embargo, como se puede observar en la figura 3-27, la localización en la que se encuentra la grieta resulta prácticamente imperceptible sin colocar el cursor encima. El motivo de este suceso puede deberse a que las paredes del cubo son demasiado delgadas como para apreciarse una diferencia entre ellas y la cinta aislante. Si esta prueba se realizara sobre un objeto con un grosor considerable, el resultado probablemente sería muy distinto.

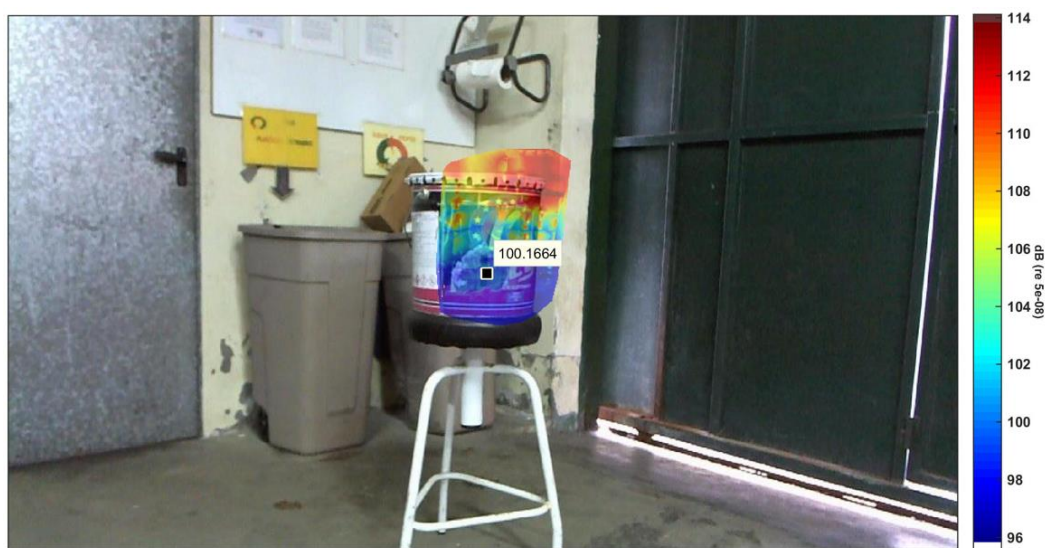


Figura 3-27: Velocidad de partícula con la grieta sellada. (Elaboración propia).

A continuación, se procede a realizar el análisis de la puerta estanca del pañol de maniobra de la lancha de instrucción *Guardiamarina Chereguini* mencionada anteriormente. En primer lugar, se

recorre la sonda únicamente por los bordes de la puerta y por la cerradura (figura 3-28), ya que, en principio, estos son los lugares más susceptibles de perder estanqueidad.

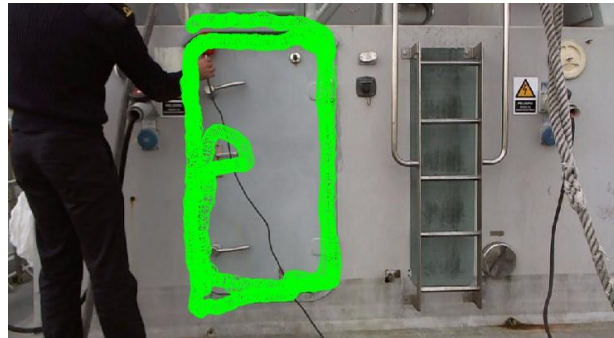


Figura 3-28: Escaneo de la puerta. (Elaboración propia).

Al analizar los mapas sonoros generados a partir de la velocidad de partícula (figura 3-29 y figura 3-30) se observa que estos mapas no representan únicamente la superficie medida, sino que abarcan toda la puerta, incluyendo zonas por las que no ha pasado la sonda. Este suceso se debe a que, como se ha mencionado anteriormente, en el método de mallado se hace la media de los valores en cada una de las celdas y con el método de punto se hace una interpolación de los valores entre los puntos. Esto ocasiona que en las áreas por las que la sonda no ha pasado se registren valores poco reales. Por este motivo, este primer análisis se ha de descartar debido a una falta de precisión por falta de puntos medidos por la sonda.

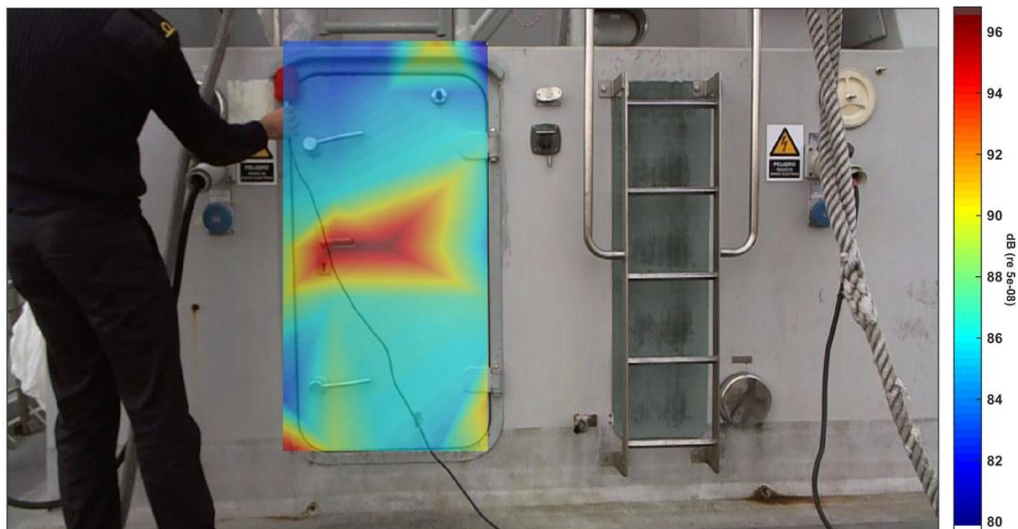


Figura 3-29: Velocidad de partícula con método de mallado. (Elaboración propia).

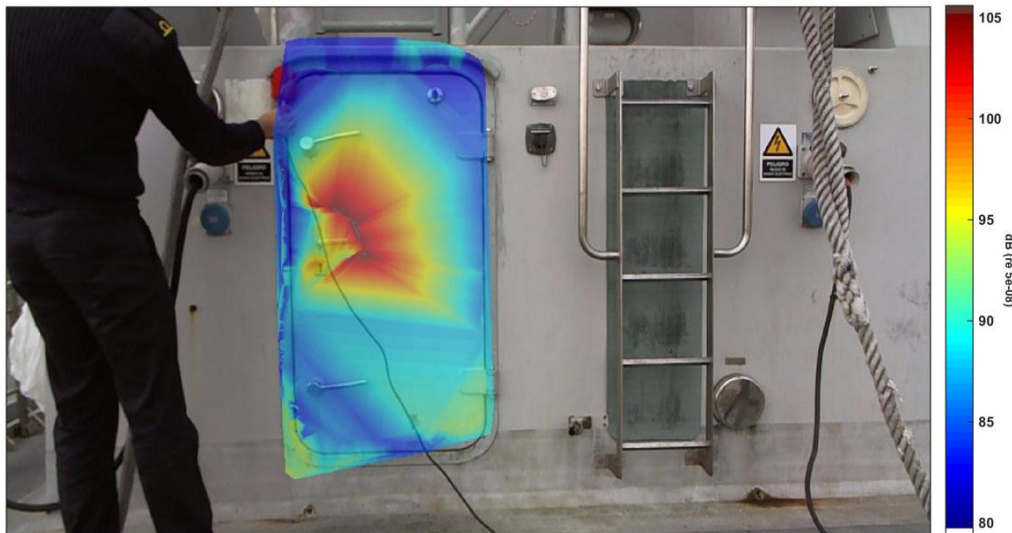


Figura 3-30: Velocidad de partícula con método de punto. (Elaboración propia).

Dado que la primera medición no es válida, se realiza un escaneo completo de toda la superficie de la puerta. En la figura 3-31 se puede apreciar que, *a priori*, hay tres puntos conflictivos principalmente. El cierre superior, la parte inferior de la puerta y, en mayor medida, la cerradura por donde se introduce la llave. La pérdida de estanqueidad en el cierre superior puede atribuirse a dos explicaciones; la primera es que el cierre superior ejerce menos presión que el cierre inferior, la segunda explicación es que, durante el recorrido de la sonda por la puerta, el cierre inferior no ha sido escaneado lo suficiente, como se muestra en la figura 3-32. En relación con la zona inferior, lo más probable es que la razón por la que se pierde estanqueidad es que la junta de goma, debido a su uso continuado a lo largo de los años, no se encuentra en las condiciones óptimas y por tanto permite la filtración de sonido. Por último, como es de esperar, el área por la que mayor cantidad de sonido escapa corresponde al cierre por donde se introduce la llave ya que atraviesa la puerta de un extremo a otro.

A pesar de que el cierre inferior no ha sido escaneado lo suficiente, en la figura 3-31 sí que se aprecia que hay una filtración de sonido en una zona muy cercana al cierre, lo que hace indicar que, o el cierre no realiza su función correctamente o que la junta de goma por este lugar también se encuentra defectuosa.

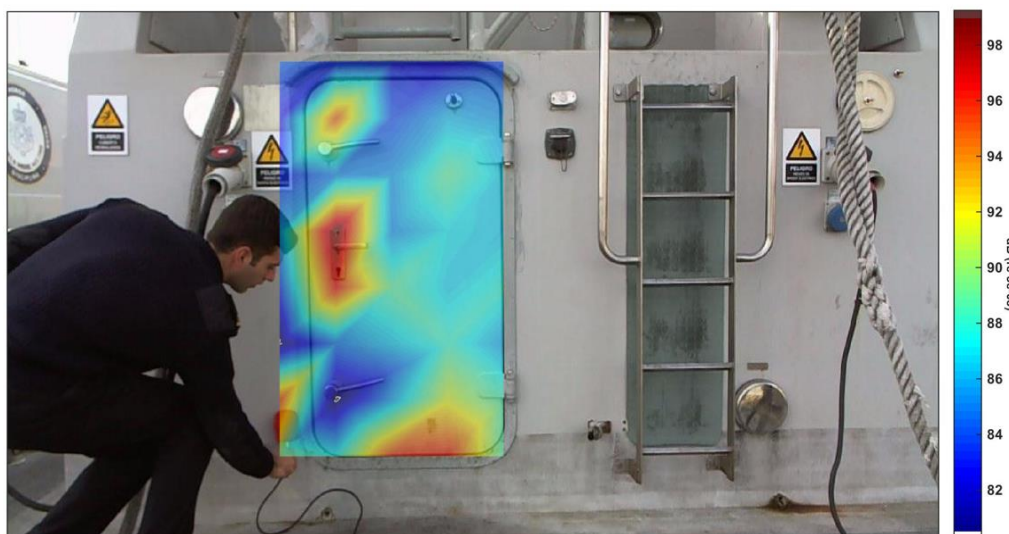


Figura 3-31: Velocidad de partícula con método de mallado. (Elaboración propia).

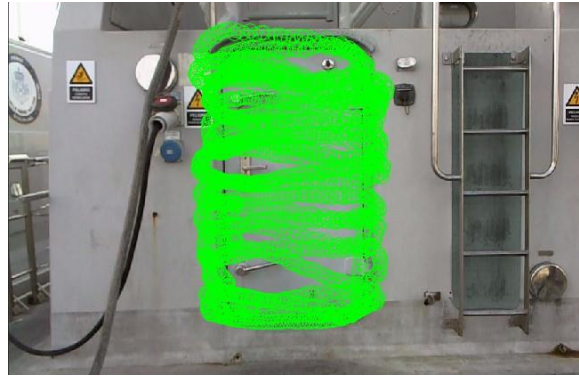


Figura 3-32: Puntos escaneados. (Elaboración propia).

Al observarse que la parte inferior parece crítica en términos de preservación de la estanqueidad, se decide realizar un análisis de ésta. En la figura 3-33 se observa que es el área central de la zona inferior de la puerta aquella en la que hay mayor concentración de sonido. A su vez, se aprecia que la intensidad de sonido aumenta gradualmente de abajo hacia arriba. Esta distribución de la intensidad de sonido puede explicarse por el comportamiento de las juntas de goma ubicadas en la zona inferior de la puerta. Estas juntas amortiguan las vibraciones, lo que resulta en una menor transmisión de sonido. Sin embargo, en la zona inmediatamente superior, donde no se dispone de juntas de goma, las vibraciones se propagan con mayor facilidad, lo que concluye en una mayor intensidad de sonido en esa área.



Figura 3-33: Velocidad de partícula con método de punto. (Elaboración propia).

Asimismo, con el fin de detectar si la puerta presenta otras áreas susceptibles de perder estanqueidad, se obtiene la gráfica mostrada a continuación, reflejando en rojo la *presión sonora* y en azul la *velocidad de partícula*. En el eje de abscisas se muestra el espectro de frecuencias 0 Hz a 24.000 Hz y en el eje de ordenadas el valor en dB de la *presión sonora* y de la *velocidad de partícula*.

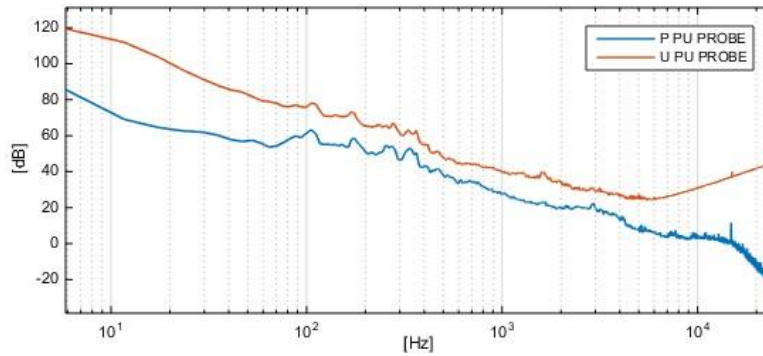


Figura 3-34: Gráfica presión sonora VS velocidad de partícula. (Elaboración propia).

En el espectro anterior se distinguen dos frecuencias de resonancia debido a la diferencia que presentan con respecto a los valores que las suceden. Para estudiar en detalle el comportamiento modal de la puerta, es necesario estudiar los mapas de *velocidad de partícula* a 105 Hz y 175 Hz.

Como se puede apreciar en las figuras 3-35 y 3-36, al analizar la puerta a una frecuencia de 105 Hz, se identifica que la zona más crítica es la cerradura por donde entra la llave. Sin embargo, a 175 Hz se observa que el valor de la *velocidad de partícula* es muy similar tanto en la cerradura como en la parte inferior de la puerta. Además, se distingue un nuevo punto por donde el sonido escapa, la bisagra superior derecha de la puerta. Esto revela la importancia de analizar de manera detallada el espectro de frecuencias ya que la propagación del sonido varía en función de ellas.

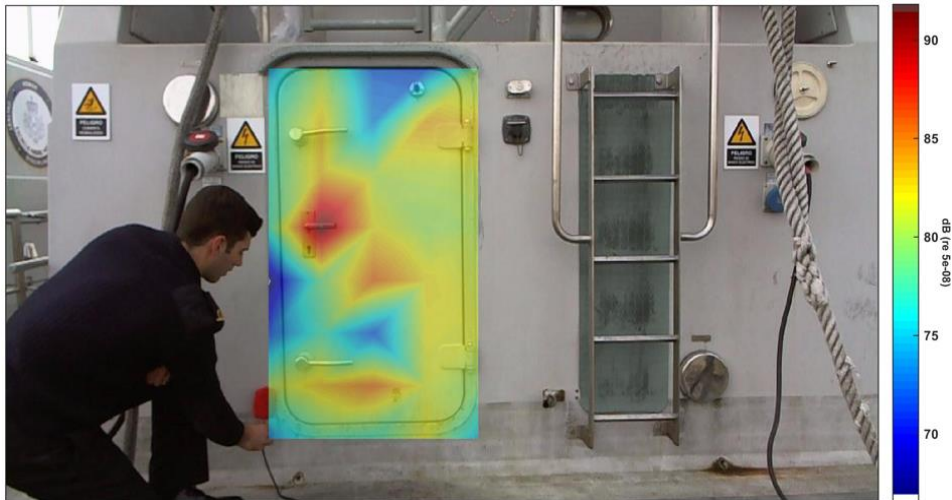


Figura 3-35: Velocidad de partícula a 105 Hz. (Elaboración propia).



Figura 3-36: Velocidad de partícula a 175 Hz. (Elaboración propia).

Para contrastar la información obtenida se lleva a cabo la prueba de la tiza mencionada en el subapartado 2.2.2 *Metodologías actuales de evaluación de las propiedades de estanqueidad de elementos y sistemas*. En la figura se aprecia la grieta que presenta el burlete, lo que induce en pérdidas de estanqueidad en la parte superior derecha de la prueba, como se puede apreciar en la figura 3-36, donde se analiza el parámetro de *velocidad de partícula* a 175 Hz.



Figura 3-37: Burlete dañado de la puerta estanca. (Elaboración propia).

Para obtener una mayor precisión, se realizan nuevas mediciones. En estas mediciones se pretende ser más cuidadoso con el método de escaneo para obtener la mayor cantidad de puntos registrados posibles. Como se puede ver en la figura 3-38, la cantidad de puntos es muy abundante y, por tanto, todas las cuadrículas del método de mallado se encuentran verdes. En la figura 3-39 se observa que el resultado obtenido es muy similar al de la figura 3-31, por lo que el análisis sigue sin ser concluyente.

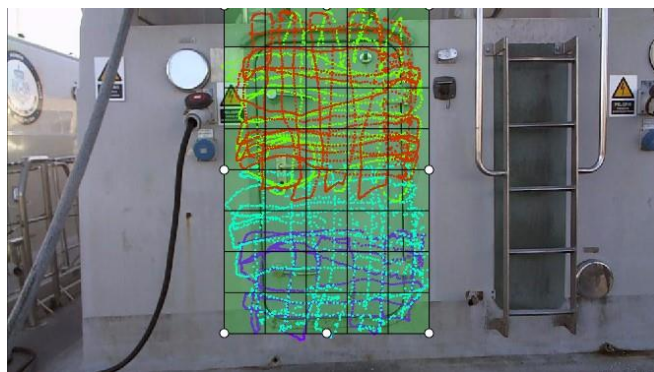


Figura 3-38: Escaneo de la puerta. (Elaboración propia).



Figura 3-39: Velocidad de partícula. (Elaboración propia).

3.1.3 Redacción de conclusiones parciales: principales datos de referencia obtenidos

Finalizado el análisis de la información acústica recogida de las pruebas anteriores se obtienen diversas conclusiones. Antes de todo es importante mencionar que la fuente sonora empleada durante todos los ensayos no es la óptima. La fuente de sonido apropiada es un altavoz dodecaédrico de 118 dB, sin embargo, se ha utilizado un altavoz *Ultimate Ears Megablast*, cuyo máximo nivel de presión sonora se limita a 93 dB, valor considerablemente reducido para obtener unos resultados precisos.

Tras la medición sobre la puerta de acceso al cuartel Almirante Francisco Moreno, se demuestra que el equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* es capaz de detectar zonas en las que hay una fuga de sonido. En la puerta “estanca” del CASI el equipo también detecta de manera muy precisa las filtraciones de sonido. No obstante, se observa una región específica en el centro de la puerta donde parece haber una filtración acústica, sin embargo, no se encuentra ninguna causa evidente que la provoque por lo que lo más probable es que el sonido sea derivado de vibraciones que se generan como consecuencia del material de la puerta o del entorno en el que se encuentra.

El análisis realizado sobre el cubo permite demostrar que el equipo es capaz de detectar zonas con distintos espesores. Sin embargo, lo hace de una forma contraria a la esperada, ya que, como se menciona en el subapartado anterior, es razonable suponer que la reducción de espesor debe resultar en una mayor emisión de ruido al exterior, no obstante, en la medición ocurre lo opuesto, bien como consecuencia del fenómeno de reflexión interna o bien como consecuencia de una menor vibración. A su vez, en este análisis no se logra demostrar de una manera precisa que el equipo sea capaz de identificar grietas no visibles, probablemente porque las paredes del cubo son demasiado delgadas como para diferenciarlas de la cinta aislante aplicada para sellar la grieta.

Después de la última medición, efectuada sobre la puerta de la lancha de instrucción, no se obtienen resultados concluyentes. Aunque sí que es verdad que detecta perfectamente el área donde se produce la mayor fuga de sonido, la cerradura por donde se introduce la llave, existen numerosas zonas en las cuales no se logra encontrar ninguna explicación coherente. Resulta complicado distinguir si el sonido proviene de filtraciones que afecten a la estanqueidad o si es consecuencia de vibraciones. Al mismo tiempo se aprecia que en función del espectro de frecuencias estudiado se obtienen resultados de los mapas sonoros muy distintos. Bien es cierto que la frecuencia de 175 Hz permite demostrar que el burlete dañado de la puerta provoca una pérdida de hermeticidad en la bisagra superior derecha, también hay varias zonas que presentan un valor elevado de *velocidad de partícula* que, *a priori*, no presentan ningún motivo para que esto ocurra.

3.2 Comportamiento de elementos y sistemas asociados a la estanqueidad en buques: recomendaciones de actuación

Después de la realización de los distintos ensayos y de la obtención de resultados comparativos de estanqueidad se observa que los elementos estudiados tienen propiedades de estanqueidad muy defectuosas. Esto es de esperar en las pruebas realizadas tanto en la puerta del cuartel Almirante Francisco Moreno como en el cubo de chapa ya que entre sus características no se encuentra la de hermeticidad. Sin embargo, tanto en la puerta “estanca” del CASI como en la puerta del pañol de maniobra de la lancha de instrucción se aprecia que las propiedades que las hacen estancas no se encuentran en las condiciones ideales.

En el caso de la puerta del CASI se observa a simple vista que tanto la puerta como el módulo en el que se encuentra, además de haber estado sometidos a inundaciones durante una gran cantidad de años, no han sido cuidados adecuadamente. Entre los defectos más significativos se encuentran el fallo en el cierre superior, impidiendo un cierre a presión equivalente en toda la puerta, las grietas de la parte inferior del módulo, por donde sale la mayor cantidad de sonido, así como la parte inferior del marco de la puerta y la junta de goma que la rodea. Por otro lado, el principal deterioro que presenta la puerta de la lancha de instrucción es el burlete, probablemente el original.

Como recomendaciones de actuación para mantener o mejorar las propiedades de estanqueidad se proponen las siguientes ideas:

- Realizar revisiones periódicas frecuentemente para detectar fallos de estanqueidad antes de que se conviertan en grandes problemas.
- Cambiar los burletes de manera más regular, incluso antes de que se muestren signos de deterioro.
- Verificar que el cierre de la puerta es a presión y equivalente en toda su área y no ha cedido con el paso del tiempo, así como realizar los ajustes necesarios para garantizar un sellado apropiado.
- Inspeccionar continuamente las áreas más propensas a verse afectadas por la corrosión y tomar medidas preventivas como la adición de recubrimientos protectores, pinturas anticorrosivas o ánodos de sacrificio.
- Limpiar de manera exhaustiva aquellas áreas más propensas a acumular suciedad que puedan afectar a la estanqueidad.
- Emplear materiales de sellado de alta calidad y durabilidad.
- Instalar sistemas de monitoreo automático que alerten sobre posibles fugas o pérdidas de estanqueidad en tiempo real.
- Hacer un uso usual del equipo *Scan and Paint*, así como de otras tecnologías que ayuden a la detección temprana de anomalías en los elementos estancos.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

En resumen, la Seguridad Interior a bordo es un aspecto crítico de cara a garantizar la protección tanto del buque como de la dotación que lo compone. En este trabajo se ha explorado la importancia de utilizar tecnologías innovadoras como el equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* para mejorar la seguridad, en concreto, la estanqueidad de distintos elementos y sistemas.

Tras la culminación del presente proyecto queda demostrado que el equipo es capaz de realizar detecciones tempranas de problemas, como fugas acústicas y reducciones de espesor en la estructura del barco, lo cual es esencial para prevenir posibles accidentes o daños. Sin embargo, es importante reseñar que presenta ciertas limitaciones.

Aunque es cierto que es capaz de detectar filtraciones acústicas, en ocasiones resulta complicado diferenciar entre fugas de sonido o vibraciones derivadas de la forma y material de los elementos estudiados, lo que genera confusiones durante la fase de interpretación de resultados. Por otro lado, la localización de zonas en las que hay una reducción de grosor también presenta restricciones, ya que a simple vista resulta difícil identificarlas si no se tiene un conocimiento previo de donde se encuentran. A pesar de que ya se ha mencionado en otros apartados, es de especial relevancia recordar que la fuente sonora empleada no ha sido la apropiada al no poseer de suficiente potencia sonora para obtener resultados precisos. Este puede ser uno de los motivos por el cual los resultados obtenidos en la fase de desarrollo sobre la puerta estanca de la lancha de instrucción no son concluyentes.

A pesar de las limitaciones que el equipo presenta, los resultados obtenidos a través de su uso siguen siendo considerablemente más precisos que aquellos derivados de métodos tradicionales como la prueba de la tiza o la prueba del aire. Por tanto, la implementación del equipo *Scan and Paint*, junto con una fuente sonora apropiada y el adiestramiento adecuado del personal es totalmente viable en los buques de la Armada, proporcionando información de gran valor a la hora de detectar y abordar posibles problemas que afecten a la seguridad.

A su vez, la realización de este trabajo ha permitido definir de manera satisfactoria una serie de medidas e identificar lecciones aprendidas para mejorar la Seguridad Interior.

4.2 Líneas futuras

El presente trabajo de fin de grado ha focalizado su atención principalmente en la evaluación de diferentes elementos asociados a la estanqueidad entre compartimentos del buque mediante técnicas de

acústica avanzada. A continuación, se proponen ideas para futuros trabajos en relación con el equipo *Scan and Paint*.

- En primer lugar, como continuación del presente TFG, se propone realizar un análisis detallado del rendimiento del equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar o en el patrullero Tabarca, empleando un altavoz dodecaédrico de 118 dB, así como solicitando burletes nuevos previamente para comparar los resultados con los burletes antiguos.
- Como segunda propuesta se encuentra el análisis coste-beneficio de la implementación del equipo *Scan and Paint*. En dicho trabajo se realizaría un estudio detallado sobre los costes asociados a la adquisición del equipo en la Armada en comparación con los beneficios obtenidos en términos de seguridad, mantenimiento y prevención de daños en los barcos.
- Por último, relacionado con la rama de matemáticas, investigar y desarrollar algoritmos para el procesamiento y análisis de los datos recopilados por el equipo *Scan and Paint*, con el fin de mejorar la precisión en la evaluación de problemas de estanqueidad y la interpretación de los resultados. De manera resumida, crear un programa que facilite la comprensión de lo que realmente está sucediendo en el elemento evaluado.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fco. J. Rodríguez Rodríguez, *Guía Acústica de la Construcción*, 2ª Edición.
- [2] «Propiedades del sonido amplitud y frecuencia | BMI España». Accedido: 26 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.bmigroup.com/es/blog/propiedades-del-sonido-amplitud-y-frecuencia/>
- [3] «Frecuencia fundamental». Accedido: 26 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.studio-22.com/blog/enciclopedia/frecuencia-fundamental>
- [4] «Aislamiento acústico». Accedido: 26 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.unavarra.es/organiza/acustica/Aislamiento_acustico/2.htm
- [5] «El sonido y sus características». Accedido: 26 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.europeanacustica.com/aislamiento-acustico/el-sonido-caracteristicas>
- [6] Artedimico, «QUE ES LA LONGITUD DE ONDA», Equipos y laboratorio de Colombia. Accedido: 26 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/que-es-la-longitud-de-onda>
- [7] «Longitud de Onda y Frecuencia | Decodifica Imágenes enviadas desde la ISS». Accedido: 26 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://esero.es/practicas-en-abierto/decodifica-imagenes-iss/longitud_de_onda_y_frecuencia.html
- [8] «White Noise Generation - ProQuest». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/dd8ba28cca06017eab07d7bae7272c97/1?pq-origsite=gscholar&cbl=45489>
- [9] A. Mola, «Descubre el ruido rosa y disfruta de un descanso reparador», Selltix. Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://selltix.com/ruido-rosa/>
- [10] K. M. Robinson, «White Noise, Pink Noise, and Brown Noise: What's the Difference?», WebMD. Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.webmd.com/sleep-disorders/pink-noise-sleep>
- [11] «White, Brown, Pink and Green Noise: Benefits of Each». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.soundly.com/blog/white-noise-and-alternatives>
- [12] «Conceptos básicos del ruido ambiental». [En línea]. Disponible en: <https://sicaweb.cedex.es/wp-content/uploads/2021/08/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>

- [13] «¿Qué es la presión sonora?», Ceupe. Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-presion-sonora.html>
- [14] «Intensidad sonora: El manual | Brüel & Kjær». Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/sound-intensity>
- [15] «¿Qué son los decibelios, la escala de decibelios y las unidades de medida de ruido? - Pulsar Instruments». Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pulsarinstruments.com/es/noticias/que-son-los-decibelios-la-escala-de-decibelios-y-las-unidades-de-medida-de-ruido/>
- [16] «Sensibilidad acústica: curvas isofónicas». Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/uvweb/fisica/es/catalogo-demos/oscilaciones-ondas/sensibilidad-acustica-curvas-isofonicas-1286053998285/DemoExp.html?id=1286110789115>
- [17] «Curvas Fletcher-Munson». Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.studio-22.com/blog/enciclopedia/curvas-fletcher-munson>
- [18] «Ponderaciones (weightings) en frecuencia : A, B, C y Z». Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.doctorproaudio.com/content.php?145-ponderaciones-weightings-frecuencia-ABC>
- [19] «Décadas, octavas y tercios de octava». Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.doctorproaudio.com/content.php?2230-octavas-tercios-decadas>
- [20] J. Antonio, «El gráfico de banda de octava para simulación acústica», Addlink Software Científico. Accedido: 29 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.addlink.es/noticias/comsol/3208-el-grafico-de-banda-de-octava-para-simulacion-acustica>
- [21] D. Fernández Comesaña, «Evaluación y detección de pérdidas de aislamiento acústico en edificación».
- [22] CENTRO DE DOCTRINA DE LA FLOTA, «D-CP-01 MANUAL DOCTRINAL DE SEGURIDAD DE INTERIOR A BORDO». ARMADA ESPAÑOLA, noviembre de 2021.
- [23] UNITED STATES NAVY, «DAMAGE CONTROLMAN». NAVEDTRA 14057, abril de 2001.
- [24] «Compartimentos estancos - El Gran Capitán». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elgrancapitan.org/foro/viewtopic.php?t=30143>
- [25] «Significado de «mamparo estanco»», Definiciones-de.com. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.definiciones-de.com/Definicion/de/mamparo_estanco.php
- [26] «i0625s02c.pdf». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i0625s/i0625s02c.pdf>
- [27] «Regulation 16 – Construction and Initial Tests of Watertight Doors, Sidescuttles, etc.». Accedido: 13 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.imorules.com/GUID-EB7C863B-A766-490C-93E6-8C3D7496634E.html>
- [28] «damagecontrolman.pdf». Accedido: 13 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://maritime.org/doc/pdf/damagecontrolman.pdf>
- [29] ARMADA ESPAÑOLA, «I-CP-04 TÉCNICAS Y MATERIALES PARA LA DEFENSA NBQR EN LA ARMADA». septiembre de 2010.
- [30] ARMADA ESPAÑOLA, «D-CP-04 MANUAL DOCTRINAL DE DEFENSA NBQR A BORDO». febrero de 2014.

- [31] D. F. Comesaña, S. Steltenpool, G. Carrillo Pousa, H.-E. De Bree, y K. R. Holland, «Scan and Paint: Theory and Practice of a Sound Field Visualization Method», *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2013, pp. 1-11, ago. 2013, doi: 10.1155/2013/241958.
- [32] «PU regular», Microflown. Accedido: 10 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/standard-probes/pu-regular>
- [33] M. Guiot, D. F. Comesaña, M. Korbasiewicz, y G. C. Pousa, «TURBO-COMPRESSOR AND PIPING NOISE ASSESSMENT USING A PARTICLE VELOCITY BASED SOUND EMISSION METHOD».
- [34] «Sound Intensity Probes», Microflown. Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/standard-probes>
- [35] «MFPA-2», Microflown. Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/pre-amplifiers-frontends/mfpa-2>
- [36] «Scout V2», Microflown. Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/pre-amplifiers-frontends/data-acquisition-scoutv2>
- [37] «Scan & Paint 2D & 3D», Warkwyn. Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://warkwyn.com/microflown-sales-support/microflown-scan-paint/>
- [38] D. F. Comesaña, «SCAN-BASED SOUND VISUALISATION METHODS USING SOUND PRESSURE AND PARTICLE VELOCITY».
- [39] F. J. R. Rodríguez, F. J. A. Viseras, y D. F. Comesaña, «EMPLEO DE TÉCNICAS DE ACÚSTICA AVANZADA: OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE LA RADIACIÓN SONORA DE LOS MOTORES».
- [40] M. Viscardi, M. Arena, y D. Siano, «Design and testing of a prototype foam for lightweight technological applications», vol. 10, 2016.
- [41] M. Rowe, S. Rowe, S. Pentecost, D. F. Comesana, y G. Beckermann, «Applying a scanning sound intensity pu probe to optimize and reduce the noise radiation of an UAV developed for cinematography», *Internoise2016*, 2016.
- [42] «SCAN EAGLE», AERONAVES MILITARES ESPAÑOLAS. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aeronavesmilitaresespanolas.com/scan-eagle-armada-espanola/>
- [43] «2011_sae_sp_leakdetection.pdf». Accedido: 8 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.microflown.com/assets/uploads/Publications/2011_sae_sp_leakdetection.pdf
- [44] «High-Resolution Acoustic Imaging System | Scan&Paint 2D», Microflown. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microflown.com/products/sound-localization-systems/scan-paint-2d>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Como se ha mencionado a lo largo del presente estudio, la preservación de la estanqueidad en los buques es vital en lo concerniente a la Seguridad Interior a bordo de los buques. Sin embargo, también aporta una serie de implicaciones sociales, económicas y medioambientales.

- **Implicaciones sociales:** Entre los impactos sociales más importantes se encuentra la seguridad. El empleo del equipo de acústica avanzada *Scan and Paint* contribuye directamente a garantizar un entorno en el que las personas puedan trabajar y viajar con seguridad. Al identificar fugas o problemas de estanqueidad, así como su posterior corrección, el equipo ayuda a prevenir graves accidentes en la mar que puedan poner en peligro vidas humanas.
- **Implicaciones económicas:** En comparación con los distintos procedimientos de medida que se emplean en la actualidad, punto a punto, simultaneo y escaneo, el equipo de acústica *Scan and Paint* es de un valor considerablemente más reducido. Además de por el propio coste del equipo, la identificación temprana y precisa de fugas puede ayudar a reducir los costos asociados al mantenimiento y a la reparación de los buques. A su vez, los buques están sometidos a diversas normativas relacionadas con la seguridad y estanqueidad para los buques. La tecnología presentada en el proyecto puede ayudar al cumplimiento de estas regulaciones, evitando así posibles sanciones por su incumplimiento.
- **Implicaciones ambientales:** Las repercusiones que este equipo podría tener en el medioambiente quizás no sean demasiadas, sin embargo, sí que podría ayudar a la prevención de la contaminación ya que las fugas podrían ser una fuente de contaminación si liberan sustancias al mar como combustibles o aceites.

En resumen, el uso de la técnica de acústica avanzada *Scan and Paint* empleada en el presente TFG tiene importantes implicaciones sociales, al garantizar la seguridad en los buques, económicas, al reducir los costos de mantenimiento y facilitar el cumplimiento de las normas, y ambientales, al reducir el riesgo de contaminación.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En el contexto del presente TFG, tras evaluar las diferentes dimensiones éticas y sociales relacionadas con este trabajo, se ha determinado que no hay reflexiones éticas evidentes que requieran una consideración adicional. El estudio realizado, entre otras cosas, se centra en la implementación de una tecnología moderna para abordar necesidades específicas relacionadas con la estanqueidad en los buques, sin implicaciones directas en cuestiones éticas o morales. Si bien es cierto que la reflexión ética asume un papel importante en la realización de un trabajo, en este caso particular, no se encuentra ninguna reflexión ética significativa.

Por el contrario, el impacto que puede tener en la sociedad es considerable, ya que el objetivo de esta tecnología es mejorar la seguridad y el bienestar de las personas a bordo de los barcos. Al asegurar una estanqueidad correcta entre los compartimentos del buque, se contribuye directamente a la prevención de accidentes en la mar, protegiendo así numerosas vidas humanas.