



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Elaboración de documentación técnica para el desarrollo del alcance establecido en un protocolo para el mantenimiento de la Flota de la Armada basado en un equipo de acústica avanzada.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jaime José Torán Sierra

DIRECTORES: Francisco Javier Rodríguez Rodríguez

Alfonso Rodríguez Morales

CURSO ACADÉMICO: 2019-2020

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Elaboración de documentación técnica para el desarrollo del alcance establecido en un protocolo para el mantenimiento de la Flota de la Armada basado en un equipo de acústica avanzada.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el desarrollo de la ciencia acústica, la representación del sonido ha sido la clave que nos ha permitido su entendimiento. Esta necesidad de representar esta información ha creado una tendencia en la investigación y desarrollo de instrumentos que ayuden en la adquisición de tales datos sonoros.

Por ello, a lo largo del tiempo se han propuesto numerosos equipos de acústica que cumplieran los requisitos suficientes para realizar las mediciones que se buscaban, y que se basaban en tres factores de mejora: Tiempo de medición, flexibilidad y coste total del equipo.

Basándonos en estos tres factores, este Trabajo Fin de Grado aborda la redacción de un protocolo, que, junto a sus documentos técnicos (como fichas técnicas a cumplimentar durante la recogida de información acústica, informe de los resultados de los muestreos sonoros y certificado legal de medición), sirvan para realizar las labores de mantenimiento que la Flota de la Armada española requiera. Dicho protocolo consiste en la medición de los niveles de *presión sonora* y *velocidad de partícula* en superficies y elementos que implican radiación sonora pertenecientes a un buque (motores, mamparos, cerramientos, etc.) con el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, instrumento desarrollado por la empresa *Microflown* que, por sus características de diseño y fácil empleo, se ha considerado como la mejor opción para la Armada.

PALABRAS CLAVE

Presión sonora, velocidad de partícula, protocolo, acústica avanzada, mantenimiento.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres y dos hermanos (A.F.T.P., M.C.S.M., R.F.T.S. y J.T.T.S.), y seres queridos (con especial afecto a M.S.G.I.), quienes en el transcurso de este viaje de cinco años siempre han estado presentes mostrándome su apoyo y afecto en mis peores momentos.

A todas aquellas personas que, aunque a día de hoy no estén conmigo por una razón u otra, hayan ayudado a forjar, al igual que mi familia y seres queridos, a la persona que ante ustedes presenta este Trabajo Fin de Grado.

Especiales agradecimientos a mi tutor F.J.R.R. quién tras tantas consultas, reuniones improvisadas y alguna que otra jeroglífica corrección (con la que pude estar parado cuarto de hora) sacamos adelante, en tiempos difíciles para la promoción, el documento que en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado se contempla.

A nuestro compañero y amigo Luisete, cuyo recuerdo nunca se disipará, sabiendo con certeza que él observará y velará por los integrantes de la brigada 420 y 150 allá dónde esté, cumpliendo así su eterna guardia.

A todos Muchas Gracias.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Motivación y objetivos	5
1.1 Motivación	5
1.2 Objetivos	5
1.3 Estructura del Trabajo	6
2 Conceptos necesarios para la comprensión de este trabajo	7
2.1 Conceptos acústicos relativos a elementos vibrantes.....	7
2.1.1 Onda sonora: generación y propiedades.	7
2.1.2 Características físicas de la onda sonora.	8
2.1.3 Las magnitudes acústicas: Potencia, presión e intensidad sonora y su medida en decibelios.....	9
2.1.4 Espectro de frecuencias de un sonido: bandas de octava.	11
2.1.5 La velocidad de partícula como magnitud protagonista de este trabajo.	12
2.1.6 Diferencias entre los parámetros acústicos velocidad de partícula y presión sonora	13
2.2 Tipos de mantenimiento	13
2.2.1 Mantenimiento preventivo	13
2.2.2 Mantenimiento predictivo.....	14
2.2.3 Mantenimiento correctivo.....	15
2.3 Mantenimiento en la Armada y su clasificación.....	16
2.4 Equipo de acústica avanzada <i>Scan & Paint</i>	17
2.4.1 Componentes del equipo.....	17
2.4.2 Proceso metodológico para la obtención de datos acústicos y su posterior análisis.	18
2.4.3 Ventajas y novedades que aporta Scan & Paint en relación con otros equipos empleados para medidas acústicas. ¿Por qué este equipo y no otro?	22
2.5 Zonas, recintos, equipos y paramentos de distintos buques de la flota susceptibles de ser evaluados acústicamente para el mantenimiento	24
2.6 Estructura que un protocolo ha de poseer para su total desarrollo práctico.....	24
3 Definición del protocolo para el mantenimiento de la flota.....	27
4 Conclusiones y líneas futuras	59
4.1 Conclusiones	59
4.2 Líneas futuras	60

5 Bibliografía.....61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 La onda sonora [4]	7
Figura 2-2 Parámetros físicos de la onda sonora [31]	8
Figura 2-3 Representación básica del sonido según su intensidad [32]	9
Figura 2-4 Paso de escala en unidades naturales a valores en dB [5]	10
Figura 2-5 Representación del espectro frecuencial de un sonido y su resultante como Nivel de <i>Presión Sonora</i> total [5]	12
Figura 2-6 Diagrama de flujo simple de Mantenimiento Preventivo [33]	14
Figura 2-7 Diagrama de flujo simple de Mantenimiento Predictivo [34]	15
Figura 2-8 Diagrama de flujo simple de Mantenimiento Correctivo [35]	15
Figura 2-9 Equipo de <i>Scan & Paint</i> [16]	18
Figura 2-10 Representación de la discretización espacial [17]	19
Figura 2-11 Esquema Básico de medición <i>Scan & Paint</i> [8]	19
Figura 2-13 Imagen microscópica de un sensor microfluído [23]	20
Figura 2-12 Sensor de medición: micrófono la sonda <i>Microflow</i> n [9]	20
Figura 2-14 División del espacio en celdas [19]	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y novedades del equipo de acústica avanzada <i>S&P</i> . Elaboración propia	23
--	----

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

En un mundo sometido a una dinámica acelerada de cambio tecnológico, la Armada ha optado por iniciar un proceso de transformación digital para no quedarse anticuada y, así, poder aprovechar todas las ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías, con el objeto de incrementar su eficiencia en el uso de recursos materiales, financieros y humanos [1].

Actualmente, nos estamos adentrando la “Industria 4.0”, término con el cual nos referimos a la Cuarta Revolución Industrial, en la que los centros logísticos productivos unen flexibilidad y tecnología. Al igual que ocurre en la industria, la Armada también está evolucionando y meciéndose lentamente en lo que denominan como “Armada 4.0”. En esta nueva “Era” se obliga a que la Armada e Industria tengan una colaboración estrecha en aspectos tales como el ciclo de vida de los equipos, otorgándole, por tanto, una gran importancia al mantenimiento predictivo [2].

La creación del gemelo digital [3] de la Armada genera la oportunidad de diseñar y construir nuevos buques inteligentes conectados con el astillero por medio del CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada), favoreciendo, de este modo, los distintos mantenimientos que la Armada contempla. Esta conexión se basa en los datos obtenidos tanto de equipos online como offline. Dichos datos son enviados desde nuestros buques a técnicos especialistas con el fin de analizarlos.

En el Trabajo Fin de Grado (TFG) “*Protocolo para el mantenimiento predictivo de la Flota de la Armada mediante Software de acústica avanzada*” [4] se presenta el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, un novedoso sistema, que integra de manera conjunta un Software y sonda, que permite la detección de anomalías en elementos y sistemas que radian sonido. Se trata de un equipo altamente flexible, con resolución espacial y bajo coste. En este contexto, el Trabajo Fin de Grado mencionado establece las líneas básicas que pueden regir el empleo de esta herramienta de acústica avanzada en elementos radiantes de buques, desarrollando un protocolo en el que se especifican los pasos a abordar para la obtención de datos sonoros, y su estudio y el diagnóstico posterior.

1.2 Objetivos

En función de la motivación indicada anteriormente, el presente Trabajo Fin de Grado pretende abordar la definición y el diseño de la documentación técnica necesaria para la toma de datos y realización de medidas (fichas, gráficos, esquemas...) que permita el desarrollar completamente el

alcance establecido en un protocolo para el mantenimiento preventivo de la flota de la Armada (basado en medidas in situ empleando el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*).

1.3 Estructura del Trabajo

El Trabajo Fin de Grado (TFG) que se presenta se encuentra dividido en cuatro capítulos con el objeto de desarrollar un protocolo sencillo que sirva para que cualquier usuario pueda manejar el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* en la Flota de la Armada española.

En el primer Capítulo, se pretende conseguir que el lector comprenda el porqué del desarrollo del trabajo, así como despertar en él el mismo interés que posee tanto para los tutores como el autor de la elaboración de este trabajo.

Posteriormente en el Capítulo 2 se desarrollarán los conceptos previos que el lector debe adquirir para la comprensión del presente trabajo. En primer lugar, se tratarán y explicarán los conceptos acústicos básicos, los cuales son de vital importancia y en el que se sustentan el presente TFG. A posteriori, como se intenta desarrollar un protocolo dedicado al mantenimiento de la Flota de la Armada, se reflejará una breve, pero clara, reseña a los tipos de mantenimientos existentes; así como del mantenimiento actualmente usado en la Armada. A continuación, se presentará el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, detallando sus componentes, funcionamiento y, finalmente, las ventajas y novedades que ofrece frente a otros quipos de acústica existentes. Además, en este capítulo se presentan las zonas, recintos, equipos y paramentos de distintos buques de la flota susceptibles de ser evaluados acústicamente para el mantenimiento. Finalmente, se desarrolla un apartado en el que se explican los puntos que debe contemplar un protocolo de actuación.

El Capítulo 3 representa la principal aportación del Trabajo fin de Grado, pues, en él se redacta un elaborado protocolo para el mantenimiento de la Flota de la Armada, usando el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*; este protocolo que se ha diseñado, además, presentará su propio índice, así como tres anexos que detallan: una plantilla para la toma de datos in situ con el equipo, una plantilla que indica cómo desarrollar la redacción del informe de las mediciones realizadas y, por último, una plantilla que servirá como certificado para indicar que todas las medidas se han realizado acorde al protocolo y normas que la sustentan.

En el capítulo 4 se presentan, tras la completa elaboración del Trabajo Fin de Grado, las conclusiones que se ha alcanzado; planteando, además, una serie de posibles líneas futuras que, en relación con este tema, se podrían desarrollar en próximos estudios.

Por último, en el Capítulo 5 se exponen todas las referencias bibliográficas que se han ido consultando, y que sin ellas este proyecto no se podría haber desarrollado.

2 CONCEPTOS NECESARIOS PARA LA COMPRESIÓN DE ESTE TRABAJO

2.1 Conceptos acústicos relativos a elementos vibrantes

2.1.1 Onda sonora: generación y propiedades.

La onda sonora se define como una onda de carácter longitudinal en el cual una superficie vibrante u otro movimiento inducirán el movimiento armónico de las partículas que lo rodean a causa de una variación local de presión o densidad. Este proceso genera lo que conocemos como la sensación de sonido. La variación de presión se desplaza como una onda esférica periódica y mecánicamente hablando es una onda elástica.

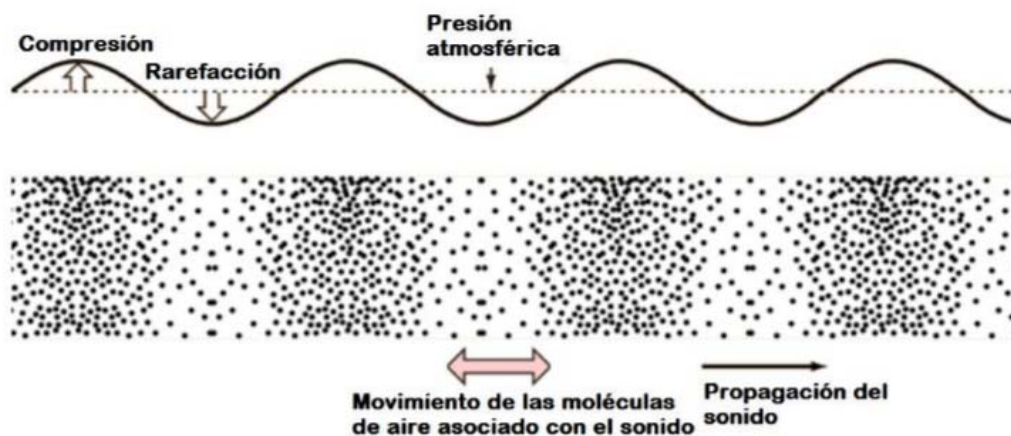


Figura 2-1 La onda sonora [4]

El movimiento de las partículas de aire, generado por la onda acústica, pues la presión se verá perturbada, induce la oposición de dos fases que se denominarán como: Zona de compresión, donde la presión aumenta respecto a la presión atmosférica, debido al agrupamiento de un número elevado de moléculas, y la Zona de refracción, donde la presión se reduce respecto a la atmosférica, ya que las partículas de sonido se expanden. Estas dos zonas se desplazan a una determinada velocidad, que se conoce como velocidad del frente de onda. Dicha velocidad, es la generada en la zona geométrica dónde los puntos del medio son alcanzados en un instante por la onda o perturbación.

Un concepto fundamental que se produce al generarse la onda sonora es la presión acústica. Una perturbación inicial generará una serie de variaciones respecto a la presión atmosférica y, de este modo, aparecerá una presión incremental denominada como mencionada anteriormente.

Entonces podemos definir como presión acústica a la diferencia que relaciona la presión total en un instante y en un punto generado por la onda sonora con la presión estable en ese punto (presión atmosférica).

2.1.2 Características físicas de la onda sonora.

Las propiedades físicas del sonido derivan de las características que determinan un movimiento ondulatorio, ya que éste es originado por ondas sonoras. Los aspectos básicos que definen el movimiento vibratorio de la onda sonora son la Amplitud, la Frecuencia, el Periodo y la Longitud de onda:

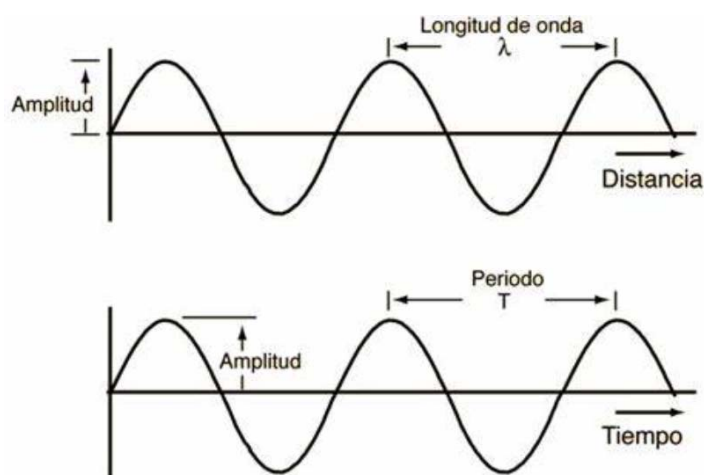


Figura 2-2 Parámetros físicos de la onda sonora [31]

La Amplitud (A) es la separación máxima respecto al punto de equilibrio que posee una determinada onda. Este parámetro vendrá definido por la fuerza que la perturbación realiza en las moléculas que vibran.

Por otro lado, la Frecuencia (f) será conocida como el número de ciclos completos por unidad de tiempo. El ciclo será el recorrido que describe la partícula desde su origen hasta llegar de nuevo a ese mismo punto. Dicho concepto es expresado en Hercios [Hz (ciclos/s)].

La magnitud inversa de la Frecuencia es el Periodo (T), y determinará cuanto tiempo tarda en realizarse un ciclo completo.

Relacionando la amplitud de la onda con la distancia se puede reflejar el parámetro Longitud de onda (λ). Dicho concepto será definido como el espacio en el cual la onda de ruido realizará un ciclo completo; en otras palabras, la distancia necesaria para aumentar y disminuir el valor de la presión atmosférica.

Cuando amplitud y frecuencia obtienen valores constantes, la onda se desplazará matemáticamente en función del seno o coseno, siendo esta una onda periódica con un movimiento denominado como movimiento armónico simple. La onda armónica también se denominará como onda sinusoidal por la fórmula matemática que lo rige.

Este tipo de ondas son las más sencillas pues cuentan con una única frecuencia que no varía en el tiempo; aun así, es poco usual registrar un tono puro fuera de un laboratorio. Lo normal es que todos los sonidos sean de naturaleza compleja; es decir, los ruidos están compuestos por un conjunto de tonos puros de distintas características físicas. Al estar los sonidos reales compuestos por un número

determinado de ondas armónicas simples con distintas frecuencias y amplitudes, se puede observar que existe una frecuencia fundamental, que establecerá su tono, y otras frecuencias que, según sus características, proporcionaran el timbre del ruido escuchado.

Al igual que Frecuencia y Amplitud determinan el tono y timbre de una onda sonora, la Longitud de onda (mencionada anteriormente) determinará si el sonido es grave o agudo.

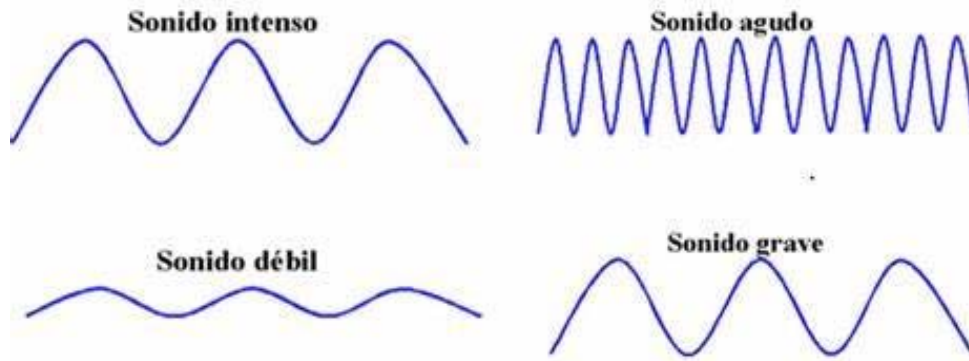


Figura 2-3 Representación básica del sonido según su intensidad [32]

Los sonidos agudos, localizados en la zona del espectro de altas frecuencias, serán aquellos que poseen una longitud de onda pequeña como resultado de la proximidad entre ondas. De manera contraria, los sonidos graves (bajas frecuencias) poseen longitudes de onda mayores y, por tanto, las ondas se encuentren más separadas entre sí.

2.1.3 Las magnitudes acústicas: Potencia, presión e intensidad sonora y su medida en decibelios.

Existen tres parámetros involucrados en la propagación de la energía acústica que poseen las ondas sonoras:

- Potencia sonora: se define como la cantidad de energía transmitida por unidad de tiempo proveniente de una fuente sonora. Es una magnitud característica de la fuente sonora que genera el propio sonido, pues no depende de la distancia. Dicha magnitud es expresada en vatios (W).
- Intensidad sonora: expresada en W/m^2 , es la potencia sonora que se transmite por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. Depende de la distancia a la fuente y de las características del entorno.
- Presión sonora: es la variación o incremento de presión, resultado de la diferencia entre la presión generada por la onda acústica y la atmosférica. Su valor medido depende directamente de la distancia a la que se encuentre de la fuente, el entorno y de la potencia sonora. Su magnitud viene definida en pascuales o en N/m^2 .

Cuando un foco generador de ondas sonoras posee una potencia constante, ésta se propaga de manera omnidireccional.

A la hora de cuantificar las magnitudes anteriores se emplea una escala logarítmica. Esto se debe a que las unidades naturales mencionadas adquieren valores difíciles de manejar debido a su amplio margen en el que varían. El empleo de la escala logarítmica permite expresar el valor medido de tales magnitudes en decibelios (dB).

La escala de los decibelios es una escala de medición relativa cuya magnitud es el nivel de sonido basado en la escala logarítmica y su unidad los dB. La escala referida se establece a partir de la siguiente expresión matemática:

$$L(dB) = 10 \lg \frac{X}{X_0}$$

Donde “L” será la magnitud cuantificada en dB; “X” es la magnitud a cuantificar en sus unidades naturales y “X₀” el valor de referencia adoptado para dicha magnitud o en unidades naturales.

De esta manera, se detiene la cuantificación los tres parámetros fundamentales en la escala de los dB:

- La *presión sonora*:

$$L_p(dB) = 10 \lg \frac{P}{P_0}$$

Donde “L_p” es el nivel de presión acústica en dB, “P” es la presión acústica en unidades naturales que se pretende cuantificar y “P₀” es la presión atmosférica de referencia (sonido audible más bajo) asociado a los 1000 Hz (P₀= 2x10⁻⁵ N/m²).

De este modo se obtiene una escala de carácter comprimido y variable, con un menor margen donde los umbrales de nivel de presión acústica se sitúan en un rango manejable: entre los 0 a los 140 dB:

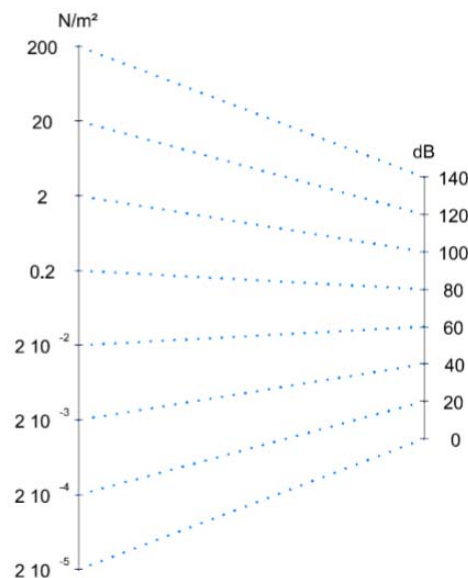


Figura 2-4 Paso de escala en unidades naturales a valores en dB [5]

- La Intensidad sonora:

$$Li(dB) = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

Donde “Li” es el nivel de intensidad acústica en dB, “I” es la intensidad acústica a cuantificar y “I₀” es la intensidad de referencia asociado a los 1000 Hz.

- La potencia sonora:

$$Lw(dB) = 10 \lg \frac{W}{W_0}$$

Donde “Lw” es el nivel de potencia acústica en dB, “W” es la potencia acústica a cuantificar y “W₀” es la potencia de referencia asociado a los 1000 Hz.

2.1.4 Espectro de frecuencias de un sonido: bandas de octava.

Los sistemas y elementos que implican radiación sonora (motores, mamparas, cerramientos) son generadores de sonidos compuestos por una combinación de ondas sonoras de frecuencias dispares a distintas amplitudes o intensidades, que, además, varían en el tiempo.

Por tanto, para caracterizar de modo detallado un foco sonoro, se debe conocer la aportación relativa de cada frecuencia emitida al nivel de ruido total.

Así, *el espectro de un sonido* se puede definir como la descomposición de la energía acústica que posee en las diferentes frecuencias que lo componen, según una serie de bandas normalizadas.

A causa del elevado rango de frecuencias audibles, las frecuencias acústicas se agrupan en una serie de bandas que constituyen la distribución espectral de un sonido y cuyos anchos se encuentran normalizados.

Los anchos de banda empleados son los de una octava y 1/3 de octava, cumpliendo $f_2/f_1 = 2$ y que $f_2/f_1 = 2^{1/3}$, respectivamente. Siendo “f₁” la frecuencia más baja y “f₂” la más alta de esta banda. A la frecuencia principal de cada banda se le asigna, como resultado de unir todas las frecuencias en dicho intervalo, un nivel resultante (en dB).

Las frecuencias centrales son: 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz.

El espectro frecuencial de un sonido se representa gráficamente, relacionando las frecuencias (Hz) y los niveles sonoros, medidos según el parámetro acústico correspondiente en dB [5].

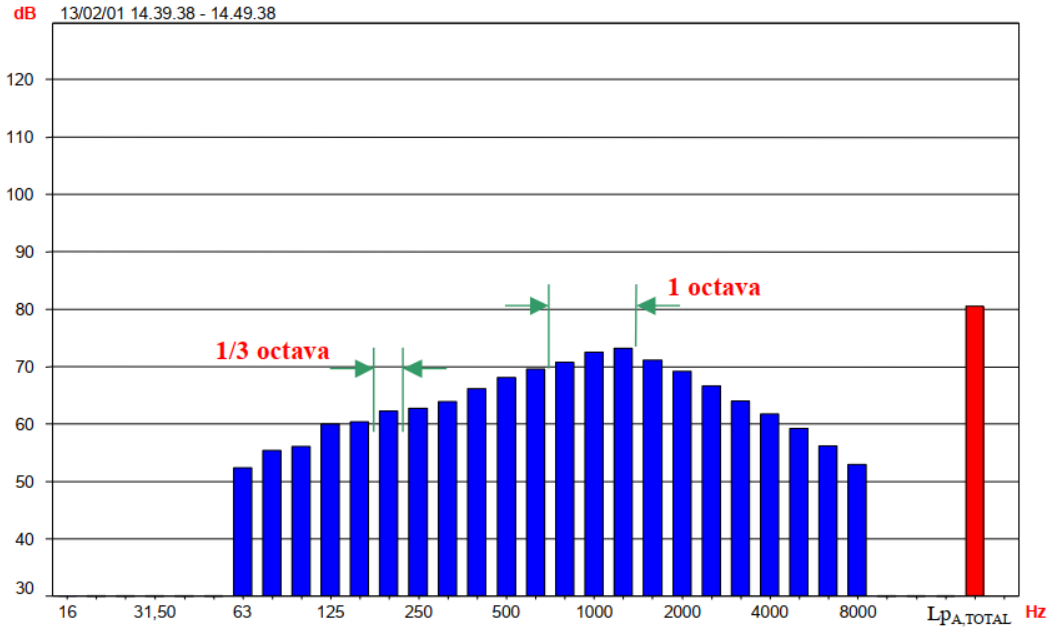


Figura 2-5 Representación del espectro frecuencial de un sonido y su resultante como Nivel de *Presión Sonora* total [5]

2.1.5 La velocidad de partícula como magnitud protagonista de este trabajo.

La *velocidad de partícula* se define como la *velocidad local de un fluido en movimiento provocada por el desplazamiento de una superficie en contacto con dicho fluido*, en otras palabras: la velocidad de la primera partícula del fluido que se desplaza perpendicularmente a causa de un cuerpo vibrante (se trata de una magnitud proporcional al desplazamiento de la fuente excitante).

La *velocidad de partícula* es una magnitud vectorial proporcional al desplazamiento de la fuente excitante, lo que implica que dependiendo de la dirección del movimiento del flujo esta obtendrá valores positivos o negativos. La *velocidad de partícula* se define mediante la siguiente expresión [4]:

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

Donde “ $\partial \vec{\xi}$ ” es el desplazamiento de la partícula. La ecuación anterior se relaciona con la *presión sonora* de la siguiente manera:

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

Donde “ ρ_0 ” hace referencia a la densidad del aire (el fluido por defecto), y “ p ” representa la *presión sonora* [6].

Resulta fundamental analizar las diferencias entre los parámetros acústicos *velocidad de partícula* y nivel de *presión sonora*. Ambos pueden ser cuantificados mediante el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, lo que permitirá reflejar los motivos del empleo de este instrumento.

2.1.6 Diferencias entre los parámetros acústicos *velocidad de partícula* y *presión sonora*

Históricamente, para cuantificar la emisión de sonido que produce un cuerpo vibrante se medían los niveles de *presión sonora*.

En numerosos estudios realizados se comprueban y comparan los resultados obtenidos al cuantificar la energía acústica derivada de un objeto vibrante, de *nivel de presión sonora* y de *velocidad de partícula*. En todos los casos se concluye que la velocidad de partícula proporciona resultados más exactos y concretos [7]. Ello es debido a tres razones principales:

- El ruido de fondo: a la distribución de la *velocidad de partícula* no le influye el entorno reflexivo en el que se encuentre el cuerpo evaluado; esto se debe a que el parámetro acústico *velocidad de partícula* se obtiene mediante la medida de velocidad de la primera partícula del fluido describiendo un movimiento normal al foco emisor. Sin embargo, con la *presión sonora* esto no ocurre pues el valor medido está influido por el ruido de fondo producido por otros elementos vibrantes y la reflexiones en las superficies hasta llegar al equipo de medida [7].
- La directividad del sonido: dicha propiedad influye en la medida, ya que los equipos de medición que determinan el valor adoptado por la *velocidad de partícula* únicamente captaran el ruido proveniente normal a la superficie vibrante; mientras que las mediciones de *nivel de presión sonora* captarán todos los sonidos que rodeen el equipo de medida o sonómetro (siendo éstos los comentados anteriormente: ruido de fondo, reverberaciones, reflexiones, etc.) [8].
- Impedancia acústica: el nivel de *velocidad de partícula* es, por lo general, muy bajo y esto se debe a la impedancia acústica superficial de muchos objetos que se encuentran en el entorno.

Por tanto, desde el punto de vista de precisión y localización de un foco sonoro, cuando el usuario quiere realizar medidas de la emisión de ruido que emite un objeto vibrante, se ha demostrado empíricamente que la magnitud que debe cuantificar mediante la medida es la de *velocidad de partícula*. A modo de curiosidad, se demuestra que los valores obtenidos de *velocidad de partícula* son 5 dB inferiores que los registrados mediante el nivel de *presión sonora* [9].

2.2 Tipos de mantenimiento

Generalmente, en una organización (empresa o institución) la existencia de un defecto o fallo puede originar un gran desperdicio tanto de recursos como económico. El fallo genera desorganización y, con ello, el retraso de entrega de un producto o el impedimento de realizar un servicio [10].

Con el mantenimiento lo que se pretende es garantizar el óptimo uso y operatividad de los equipos, sistemas e instalaciones de una empresa o industria y, además, conseguir extender la vida útil de ellos. Todo esto se alcanza mediante una correcta planificación y ejecución y un control responsable de los programas de mantenimiento.

Actualmente, existen en la industria tres tipos de mantenimiento que se emplearán dependiendo del presupuesto de la organización, los recursos disponibles, el nivel de experiencia y los objetivos a conseguir.

2.2.1 Mantenimiento preventivo

Es un tipo de mantenimiento proactivo en el que figuran ajustes, limpieza, lubricación, reparaciones y sustituciones. Esta filosofía de mantenimiento posee como objetivo el incrementar la

vida útil de los equipos e infraestructuras, evitando el exceso de amortización y deterioro o una avería permanente. Todo mantenimiento que no surja como reacción o causa de un fallo será considerado como preventivo: Existen varios tipos de mantenimiento preventivo pero destacan los siguientes [11]:

- Mantenimiento controlado por calendario: a un trabajo recurrente le es fijado una fecha específica. Estas fechas se establecen y regulan con el Sistema Computarizado de Mantenimiento y Control (CMMS).
- Mantenimiento basado en el uso: con el uso de sensores vinculados a la CMMS se registrarán una serie de valores y, si estos alcanzan una unidad específica, se realizará un parte de mantenimiento.
- Mantenimiento Prescriptivo: se hace uso de “Machine Learning” para que este software pueda realizar sus predicciones.

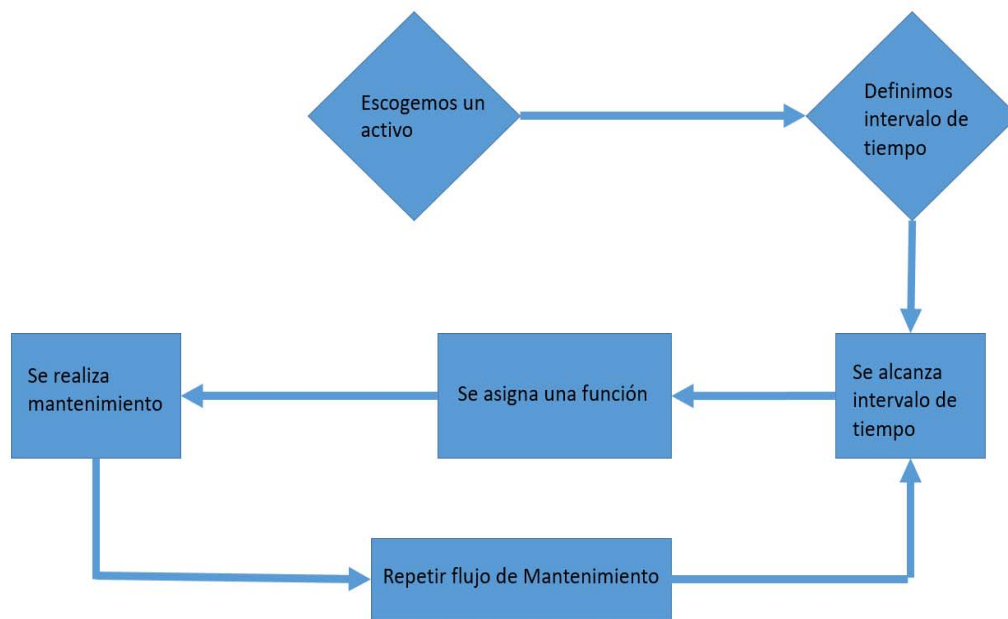


Figura 2-6 Diagrama de flujo simple de Mantenimiento Preventivo [33]

2.2.2 Mantenimiento predictivo

Es la filosofía de mantenimiento más avanzada actualmente. Basado en un mantenimiento de tipo temporal, las empresas u organizaciones tienen como estrategia recopilar, almacenar y estudiar a posteriori una serie de datos [12].

El primer paso a realizar para abordar el mantenimiento predictivo reside en el establecimiento de puntos de partida. Se necesitará monitorizar los puntos activos de la línea de producción y recoger toda la información antes de la instalación de sensores. De esta manera, se poseerá una lista de anomalías con la que se podrá comparar la información que se recoja más tarde. Partiendo de esta base, lo único que se debe realizar es monitorizar los elementos de interés y cuando uno de éstos funcione fuera de los parámetros normales los sensores activarán el protocolo de mantenimiento predictivo correspondiente. Normalmente se enlaza con el CMMS, que generará una orden de trabajo y asignará técnicos que se encargarán de las anomalías generadas [11].

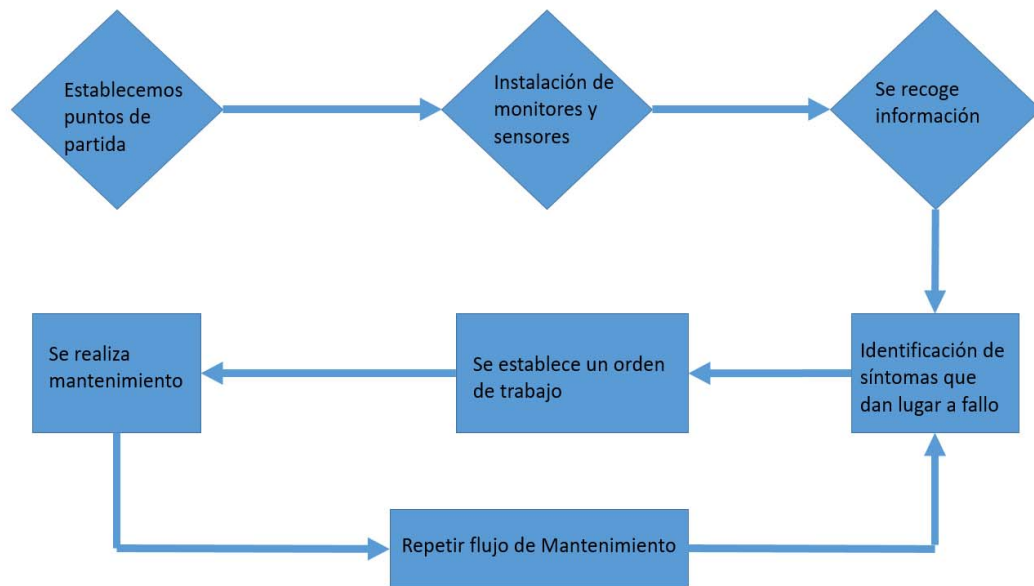


Figura 2-7 Diagrama de flujo simple de Mantenimiento Predictivo [34]

2.2.3 Mantenimiento correctivo

Es un tipo de mantenimiento que, por su naturaleza, se considera como mantenimiento de emergencia; esto se debe a que cuando existe una emergencia en alguna sección de una empresa, organización o industria, algo debe ser corregido o arreglado de inmediato. De esta manera, el mantenimiento predictivo es de naturaleza reactiva (surge como reacción a un fallo). Aun así, puede ser de naturaleza proactiva, por ejemplo, si un activo de la cadena de producción, que tiene como función la monitorización mediante sensores, detecta un problema: éste dará un parte de mantenimiento y un técnico especialista se envía para corregir el fallo. Se podría considerar que el mantenimiento preventivo es igual al correctivo ya que en ambos se solucionen fallos; no obstante, esto no es así, debido a que el mantenimiento preventivo se realiza aunque todo funcione correctamente [11].

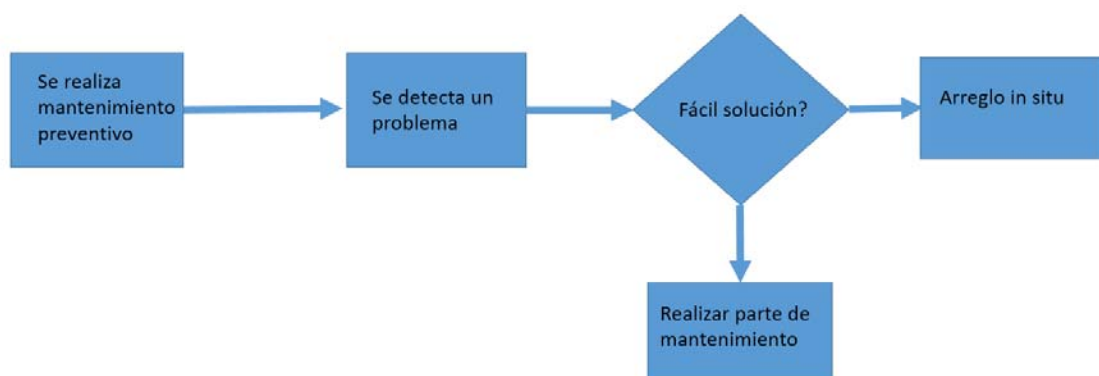


Figura 2-8 Diagrama de flujo simple de Mantenimiento Correctivo [35]

2.3 Mantenimiento en la Armada y su clasificación

La armada, con el paso del tiempo, ha ido evolucionando y modernizando sus técnicas y teorías de mantenimiento; de manera que, actualmente, se encuentran implementadas, en distinto grado, las descritas anteriormente.

Los planes de mantenimiento de la Armada se remontan al año 1981, con la introducción del PMS, *Sistema de Mantenimiento Planeado*; en el que existían tres escalones: el buque, el arsenal y, por último, las empresas (tanto de carácter civil como estatal). Aun así, durante los *Periodos de Inmovilización Programados* (PIP) no deja claro que sistema de mantenimiento se debe emplear.

Posteriormente, surge el primer sistema de mantenimiento que solucionaría el problema anterior, el *Plan de Mantenimiento de Clase* (CMP), en el que cada buque tenía su programa propio; en estos programas podía darse el caso de que existiesen equipos con diferentes mantenimientos [13].

Con la creación, a posteriori, del Plan de Mantenimiento Integrado de la Clase (ICMP) [14], lo que se pretende es unificar los mantenimientos de la flota basándose en un *Mantenimiento Basado en la Condición* (CBM), el cual se puede considerar como un mantenimiento de tipo predictivo.

Finalmente, se implementa el *Mantenimiento Basado en la Fiabilidad* (RCM). Este mantenimiento posee dos misiones: en primer lugar, analizar los mantenimientos realizados en el PMS y, como segunda misión, el RCM se comporta como un plan de mantenimiento mayor que el de ICMP, en el que analizará las funciones del sistema, así como sus fallos y efectos en la operatividad del buque. Después de analizar los fallos e identificarlos, llevará a cabo una investigación para lograr una reducción de la probabilidad de fallo y el impacto operativo [13].

La Armada clasifica los mantenimientos en función de acciones a tomar, los organismos que deben realizarlas, los periodos y el tipo de mantenimiento.

a) Según el tratamiento al que se someterá el material, tendremos cinco tipos de mantenimiento [15]:

- **De comprobación:** la misión fundamental será la de comprobar y examinar que todos los equipos cumplen de manera fiable sus funciones.
- **Preventivo:** existen programas preplaneados con pruebas, observaciones y sustituciones.
- **De rehabilitación:** comprobación y restauración de los equipos con el objetivo de devolverlos a sus condiciones iniciales.
- **De modificación:** actos que tienen como objetivo mejorar las funciones de diseño del equipo o sistema.
- **Correctivo:** Corrige las causas que produjeron las averías en los equipos.

b) Dependiendo del organismo responsable, encontramos cuatro escalones [13]:

- **Primer escalón:** dicho escalón se encuentra bajo la responsabilidad del Comandante de la Unidad; las tareas serán realizadas por el personal perteneciente al destino.
- **Segundo escalón:** la responsabilidad es del ALFLOT; de este mantenimiento se encarga personal ajena a la Unidad, es decir, dotación perteneciente al Arsenal donde se encuentre la Unidad afectada.
- **Tercer escalón:** el mantenimiento se realiza en instalaciones de apoyo logístico contratadas por los departamentos industriales del Arsenal; es responsabilidad de la autoridad subordinada AJAL.

- **Cuarto escalón:** Por su complejidad, magnitud o carga de trabajo, en este escalón las acciones a tomar las realiza personal y organizaciones ajenas a la Armada; es responsabilidad de la autoridad subordinada AJAL.

c) En función de la disponibilidad operativa de la Unidad:

- **Mantenimiento en el periodo operativo:** acciones realizadas que buscan la operatividad de los equipos. Realizan acciones de comprobación, correctivas y preventivas.
- **Mantenimiento en obras de Gran Carena:** tareas de mantenimiento cuyo objetivo es la rehabilitación y modificación de los equipos y sistemas que aseguren posteriormente la fiabilidad del buque durante su siguiente periodo de operatividad.

d) En función de la capacidad para realizar los trabajos de mantenimiento [15]:

- **Nivel A:** todas las acciones que son capaces de realizar personal con conocimientos técnicos especialistas (más cursos específicos). La capacidad de nivel A se refiere a las acciones que se pueden encontrar en un buque, mantenimientos de tipo correctivo, de comprobación o preventivo.
- **Nivel B:** a las acciones que se deben tomar para ejecutar los mantenimientos preventivos se le incluye la capacidad de fabricar repuestos, calibración de equipos y apoyo al Primer Escalón.
- **Nivel C:** las acciones tomadas corresponden a los mantenimientos complejos como por ejemplo, la rehabilitación de piezas, equipos y sistemas. Es un apoyo al Segundo Escalón. Corresponde a cualquier tipo de mantenimiento realizado con la máxima capacidad posible.

2.4 Equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*

El sistema *Scan & Paint* es una solución portátil para mediciones acústicas. Se trata de una herramienta sencilla y única que permite visualizar cualquier campo de sonido estacionario en casi cualquier entorno de medición, independientemente del nivel de ruido de fondo.

Todo ello con una cobertura de ancho de banda acústico completo (20 Hz a 10 kHz). El sistema es una excelente herramienta de ingeniería para solucionar problemas o comparar todo tipo de elementos radiantes *in situ*. No hay necesidad de condiciones anecoicas o cámaras. Esto es de gran utilidad porque muchas veces no se pueden conseguir dichas condiciones, como la medición en una cámara de máquinas, un entorno de fabricación industrial o el interior de un automóvil.

Las sondas de PU (presión y velocidad) permiten mediciones directas del parámetro *velocidad de las partícula*, que no se ve afectado por el ruido de fondo o la reflexión [16].

2.4.1 Componentes del equipo.

El equipo de acústica avanzada está constituido por cinco componentes importantes:

- **Cámara:** Captura los datos de vídeo que se sincronizarán automáticamente con los datos de medición (1).

- **Módulo de adquisición de datos:** Adquisición de datos de 24 bits y 4 canales de alta precisión. El dispositivo está alimentado por USB y no se requieren cables de alimentación adicionales (2).
- **Acondicionador de la señal:** Unidad de acondicionamiento de señal para las sondas PU que suministran energía y preamplificación (3).
- **Sonda *Microflow* (PU):** Sonda de banda ancha (20 Hz-10 kHz). Será usada para medición de los niveles de *presión sonora* y *velocidad de partícula*. Lo componen un sensor *de velocidad de partículas* y un micrófono (4).
- **Marca de color:** Pequeña marca de color en la sonda de PU que se utiliza para rastrear automáticamente las posiciones de los sensores a través del reconocimiento de color (5).

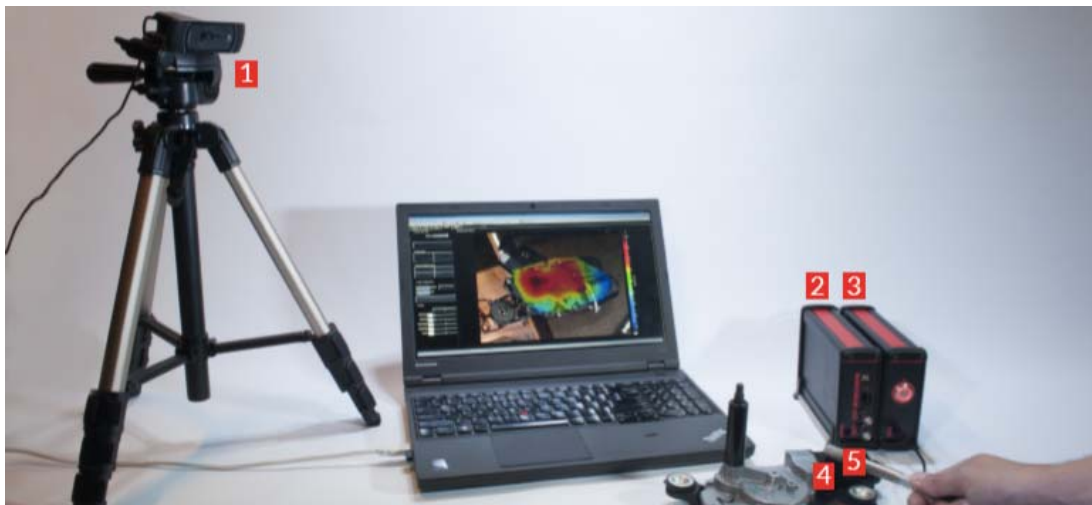


Figura 2-9 Equipo de *Scan & Paint* [16]

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

El procedimiento de medición para adquirir los datos se basa en la técnica de escaneo *Scan & Paint* [17]. Las señales acústicas del sonido se adquieren moviendo manualmente una sonda de intensidad p-u a través de un plano de medición mientras se obtiene el evento con una cámara. En la etapa de postprocesamiento, la posición de la sonda se extrae aplicando la detección automática de color a cada fotograma del vídeo.

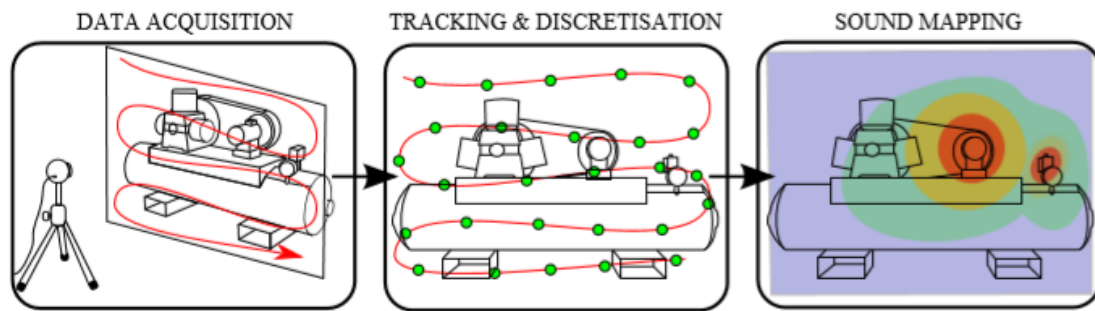


Figura 2-11 Esquema Básico de medición *Scan & Paint* [8]

Las señales grabadas se dividen en varios segmentos utilizando un algoritmo de discretización espacial, asignando una posición espacial dependiendo de la información de seguimiento. Por lo tanto, cada fragmento de la señal se vinculará a una ubicación discreta del plano de medición. A continuación, las variaciones espectrales en todo el espacio se calculan analizando los segmentos de señal. Los resultados se combinan con una imagen del entorno medido para obtener una representación visual que nos permite ver el sonido [8].

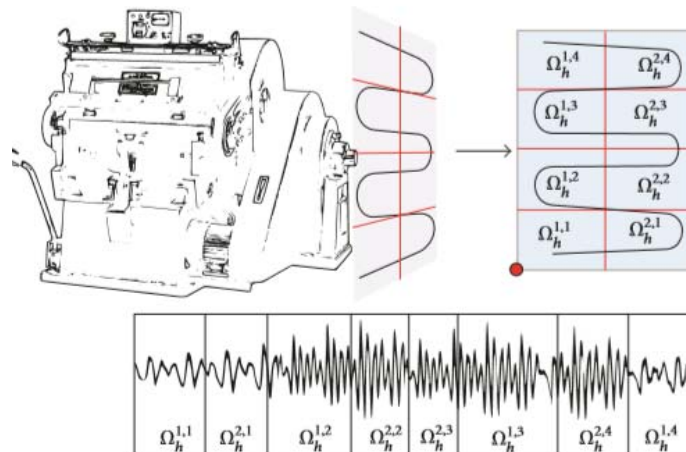


Figura 2-10 Representación de la discretización espacial [17]

Como se ha indicado, *Scan & Paint* nos permite conseguir una representación ilustrativa del propio campo, indicando mediante una gama de colores, las diferentes fuentes sonoras. La medición se consigue gracias a una sonda PU que, de forma directa, medirá la *presión sonora* y la *velocidad de partícula*. Dicha sonda se compone de un micrófono tradicional y una sonda *Microflown*.

El transductor de *velocidad de partículas* (sonda *Microflown*) consta de dos cables de platino corto, delgado y estrechamente espaciado que se calientan a unos 300° C. La resistencia de los cables depende de la temperatura. Una señal de *velocidad de partícula* acústica perpendicular a las resistencias cambia la distribución de la temperatura instantáneamente, esto se debe a que uno de los cables se enfría más que el otro por el flujo acústico y, con esta diferencia de resistencia se puede medir con un circuito que proporciona una señal proporcional a la *velocidad de partícula acústica* [18].

Por otro lado, el micrófono medirá la *presión sonora* captada en los distintos puntos del mapa discretizado. Dispone de una membrana interna que reacciona ante las variaciones de presión al igual que el oído humano. Este movimiento se convertirá en una señal eléctrica mediante un transductor.

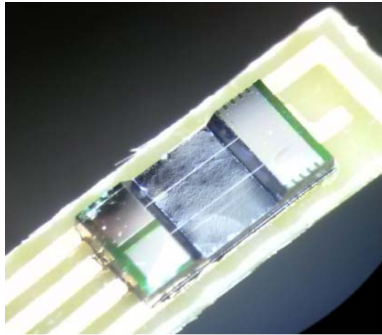


Figura 2-12 Imagen microscópica de un sensor microfluído [23]

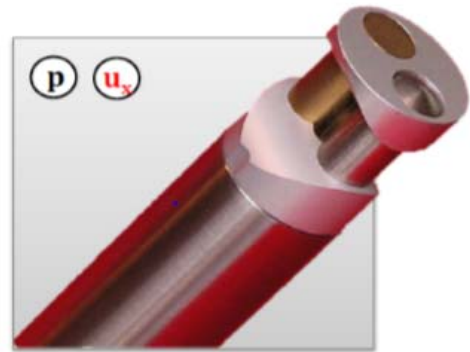


Figura 2-13 Sensor de medición: micrófono la sonda *Microflow* [9]

Para analizar de los datos que se obtienen en el proceso de medición, y poder representarla en una imagen visual del campo sonoro, es de vital importancia definir un método fiable que discretice la información obtenida de manera efectiva. Dicho esto, *Scan & Paint* permite dos métodos: método de cuadrícula, que consiste en la segmentación del área a medir, y el método por puntos, que dividirá el recorrido descrito en la medición.

- Método de cuadrícula plana: es un método de análisis muy común en ingeniería. Este método consiste en la división de una superficie continua en un número finito de segmentos de igual tamaño, consiguiendo de esta manera un análisis homogéneo del espacio a estudiar.

El sistema de seguimiento implementado en *Scan & Paint* estima la posición del sensor mediante el análisis de fotogramas de vídeo individuales, es decir, imágenes que contienen una proyección del entorno en un espacio bidimensional. La obtención de la posición exacta resulta imposible ya que no se pueden percibir ligeras variaciones a lo largo del eje de la cámara (la profundidad de la imagen). Los errores de seguimiento pueden tener, en última instancia, un impacto significativo en los mapas de sonido resultantes, pero este efecto se puede minimizar colocando la cámara de vídeo perpendicular a la superficie de medición y manteniendo una distancia de medición constante [19]. De esta manera, se pueden mantener los límites de resolución y precisión de los mapas de sonido producidos. La práctica formal del método comienza definiendo un dominio espacial dimensional 2D continuo, el espacio de imagen, al que se le asocia una dimensión de tiempo.

La discretización del dominio espacial en relación a la señal del tiempo se expresa mediante un conjunto de complejas fórmulas que resultan en la división del área medido en bloques “ $\Omega_h^{m,n}$ ” delimitados por las siguientes longitudes Δ_x, Δ_y .

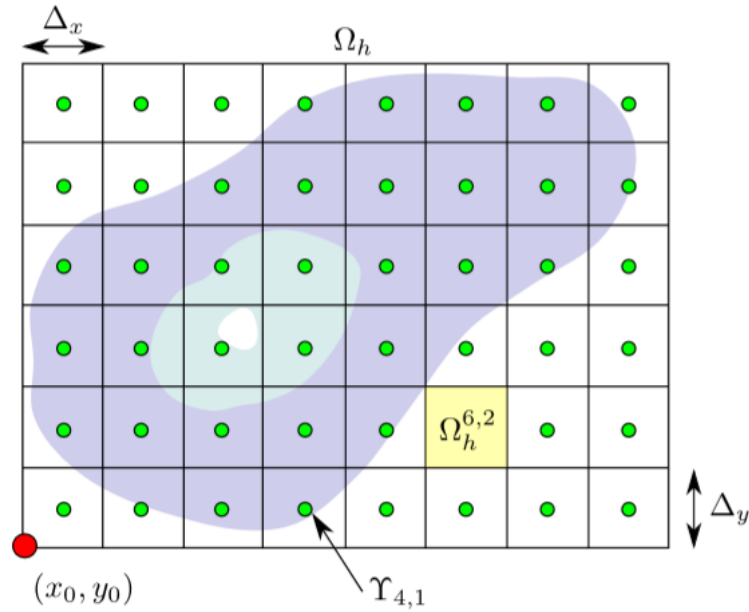


Figura 2-14 División del espacio en celdas [19]

Se tomará como referencia el centro de cada celda “ $\Omega_h^{m,n}$ ”, respecto del origen (x_0, y_0) , teniendo la celda tamaño (Δ_x, Δ_y) , y su fila y columna correspondiente (m, n) .

Una vez realizada la discretización del dominio espacial de interés, se puede establecer un enlace entre los datos de medición adquiridos con un transductor en movimiento y la cuadrícula definida. La trayectoria continua seguida por el sensor se fragmenta en varios segmentos utilizando la estructura de la rejilla de “ Ω_h ”, dividiendo así la señal original y asignando a cada segmento una posición en el área de medición.

Por tanto, una celda de cuadrícula puede tener varias secciones asociadas de la señal original si el sensor cruza la misma área varias veces. El uso de una sonda de sonido que combina un micrófono de *presión sonora* y un sensor de *velocidad de partículas* (una sonda p-u) permite la medición y cuantificación de ambas magnitudes acústicas en todo el espacio. En consecuencia, la aplicación del método de cuadrícula a una medición de análisis produce la relación entre los datos de tiempo medidos y las diferentes celdas de cuadrícula. La ruta seguida por el sondeo determinará qué celdas de cuadrícula tienen datos asignados y cuáles, si los hay, estarán vacíos. Por lo tanto, se requiere un promedio si se asocian varias señales de tiempo a una sola celda [19].

- Método por puntos: También existe un proceso alternativo de discretización, basado en la segmentación de los datos de seguimiento disponibles a lo largo de la ruta de escaneo. Se utiliza un enfoque de discretización unidimensional en lugar de la descomposición bidimensional del espacio cartesiano.

Se obtiene una cuadrícula dispersa de datos con una cantidad de puntos igual al número total de fotogramas de vídeo. Al igual que el método de cuadrícula plana, el cálculo de las funciones de densidad espectral asociadas a cada segmento también permite la evaluación del mapa acústico en el dominio de frecuencia. El método por puntos no requiere que se establezca un vínculo entre el espacio de imagen y el entorno de medición real. Por ello, este método puede ser más robusto que el método de cuadrícula si el área visible del origen difiere drásticamente de una geometría plana o si el eje de la cámara de vídeo no es normal a la superficie bajo evaluación. Sin embargo, la falta de promediación entre estimaciones autoespectrales de posiciones estrechamente espaciadas da lugar a un error de varianza mayor de los mapas de sonido, a menudo perdiendo la "smoothness" visual. Por lo tanto, la selección del método de discretización más adecuado depende principalmente de las condiciones de medición y la precisión [19].

2.4.3 Ventajas y novedades que aporta Scan & Paint en relación con otros equipos empleados para medidas acústicas. ¿Por qué este equipo y no otro?

Antes de detallar la técnica de medición propuesta, conviene relatar en una breve descripción histórica de la evolución del estudio del sonido hasta las técnicas actuales en las que se incluye la que vamos a abordar en el presente trabajo.

Los primeros métodos de visualización del sonido y la vibración se remontan al siglo XVIII de la mano de Chladni. Su método se basaba en usar arena espolvoreada sobre superficies vibrantes para poder estudiar su comportamiento dinámico [20].

El siguiente acontecimiento histórico ocurre en la segunda mitad del siglo XIX, cuando Toepler se percató de que una onda de sondeo de luz pulsada debería ser capaz de congelar una onda de sonido esférica en expansión; esto lo conseguía amplificando pequeñas diferencias en el índice de refracción óptica del medio. Con este método crea una técnica de visualización de las ondas en movimiento que se denominaría como el "*método Schlieren*". El método mencionado fue perfeccionado por el científico holandés Rossing, con el cual ganó el premio Nobel de 1953. Mejoró el método, pero fue limitado a la microscopía.

Todas estas técnicas de visualización óptica del sonido fueron usadas y desarrolladas por muchos científicos, pero no es hasta 1965 cuando surge la primera técnica de escaneo acústico. Dicha técnica fue desarrollada por Kock y consistía en transformar la señal eléctrica que creaba un micrófono en algo visible mediante el uso de un foco eléctrico de neón. La intensidad del brillo del foco de neón será la manera de indicar el nivel de sonido emitido y percibido por el micrófono. Además, desarrolló una técnica para la visualización de las ondas a lo largo del campo de medición. De manera que la combinación de la señal generada por el micrófono y la señal excitada resulta en la suma de ambas ondas.

Otra técnica que surgió durante la misma época es aquella en la que se hace uso del láser, que daría lugar a los siguientes aparatos: Vibrometro Laser de efecto Doppler (LDV) y Vibrometro de Escaneo Láser con efecto Doppler (SLDV).

Durante la década de 1970, los micrófonos multicanal fueron aplicados inicialmente para la localización de la fuente de sonido, aunque la idea para su desarrollo surgió para su aplicación durante la Primera Guerra Mundial. La antena del micrófono o el llamado "*telescopio acústico*" fue inventada por Billingsley en 1974. Desde entonces, el uso de productos multicanal ha crecido sustancialmente con la mejora del hardware de los sistemas de adquisición de datos y localización de algoritmos. Desde 1999, un grupo de aparatos catalogados como "*cámara acústica*" se han presentado como una solución para detectar y localizar fuentes de sonido en un determinado campo acústico a tiempo real. La aplicación de modelos analíticos sobre los datos adquiridos con los sistemas multicanal nos permite

clasificar esta solución como un método indirecto de visualización sonora en el que se asume que los algoritmos analíticos implementados funcionan perfectamente en la naturaleza del problema evaluado.

Como se ha demostrado, existe cierto interés en desarrollar medios técnicos que permitan evaluar el comportamiento del sonido en términos cualitativos y cuantitativos. Generalmente, en acústica, a menudo, es necesario describir no solo las características de la ubicación y la naturaleza de las fuentes de sonido sino también el comportamiento del campo de sonido que generan. En consecuencia, la introducción de la técnica de medición que permite la adquisición de dicha información de manera eficiente, sin aumentar el costo o la complejidad de la configuración de la medición, posee un alto potencial para una amplia gama de aplicaciones [17].

Se supone que la sonda *S&P* se utiliza en el campo cercano para la localización de la fuente de sonido, y a mayor distancia para la identificación de la intensidad del sonido. Como es una tecnología relativamente nueva en el mercado, el dispositivo fue evaluado por el equipo junto con el VTT (Centro de Investigación Técnica de Finlandia) en 2015 [9], entre otras pruebas.

Se observa que esta nueva tecnología de evaluación de campos sonoros mediante una sonda, que consiste en un micrófono y un sensor de velocidad es factible para ser utilizado para la localización de focos sonoros y la medición de la intensidad del sonido en grandes motores de velocidad media.

Este sistema no requiere de un gran número de elementos para realizar una medición, por ello su diseño proporciona una gran ventaja económica frente a otros aparatos de acústica avanzada. Además, gracias a su diseño y precisión, el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* nos permite realizar mediciones en cualquier tipo de entorno y ambiente sin obligarnos a hacer uso de cámaras anecoicas.

Como se ha comentado anteriormente, este equipo de acústica avanzada se basa en la medición de *velocidad de partícula*, además del parámetro *nivel de presión sonora*, permitiendo mayor precisión en las mediciones gracias a las características de la onda. Aun teniendo en cuenta las características de la *velocidad de partícula*, el método elegido cuenta, como explicado anteriormente, con dos maneras de discretización que permiten el ajuste de los datos adquiridos a sus focos correspondientes. De este modo, al técnico se le posibilitará un análisis más certero de los resultados obtenidos.

Por último, resulta importante reseñar el sencillo uso de este equipo y del sistema de medición. Solo se requiere de un usuario para realizar las mediciones, para que posteriormente se desarrolle en el laboratorio un análisis y estudio en profundidad de la información que el software nos aportará. De esta manera, el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* presenta las siguientes ventajas y novedades:

Ventajas y novedades del *S&P*

Identificar elementos (focos) ruidosos en un ambiente reverberante (reflexivo) como puede ser la Sala de Máquinas de un buque, gracias al parámetro *velocidad de partícula*.

Caracterizar múltiples condiciones de operación in situ (de motores, mamparos, cerramientos) de elementos que implican radiación sonora o propiedades de estanqueidad, sin necesidad de acudir a laboratorio.

Realizar un análisis de focos sonoros rápidos, preciso y fiable.

Localizar fuentes de ruido de baja frecuencia en ambientes reflexivos.

Tabla 2-1 Ventajas y novedades del equipo de acústica avanzada *S&P*. Elaboración propia

2.5 Zonas, recintos, equipos y paramentos de distintos buques de la flota susceptibles de ser evaluados acústicamente para el mantenimiento

Con el objeto de desarrollar un protocolo para la medición de superficies vibrantes con el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* se deben tener en cuenta los elementos críticos de los buques que tienden a desarrollar un mayor desgaste, haciendo uso de la plataforma de Gestión de Apoyo Logístico Integrado (GALIA), que gestiona todos los mantenimientos, reparaciones y recambios que se deben realizar en los equipos.

Además, de lo reseñado anteriormente, se deben señalar aquellos equipos que, por su diseño y características, emiten niveles de ruido elevados, puesto que éstos son los más afectados por fuerzas y momentos durante su empleo óptimo.

Los astilleros proponen los siguientes equipos a los cuales, a pesar de su aprobación en la parte constructiva, es necesario llevar un control periódico y valoración acústica para su predicción de desgaste por los esfuerzos que sufren y posterior aplicación de fase mantenimiento. Dichos equipos son:

- Motores propulsores.
- Turbinas de Gas.
- Cajas de engranajes.
- Líneas de ejes.
- Generación eléctrica.
- Plantas de agua refrigerada.
- Refrigeración.
- Aguas contraincendios.
- Refrigeración por agua salada.
- Producción de agua destilada.
- Aire comprimido.
- Gobierno y Control.

2.6 Estructura que un protocolo ha de poseer para su total desarrollo práctico

Un protocolo o norma es, por definición, la secuencia detallada de un proceso de actuación científica, técnica, médica, etc. [21]. El objetivo que debe seguir una norma es, en primer lugar, el de satisfacer una necesidad; para ello deberá ser completa y unificará varios criterios, será simple, corta y concisa, coherente en su redacción, de formato agradable y en la que aparecerán, además, leyes vigentes relacionados con el aspecto a tratar.

Previamente a la elaboración de un protocolo, es necesario considerar los siguientes aspectos [22] [23]:

- Alcance: uno debe preguntarse ¿es necesaria la elaboración del protocolo? ¿soluciona un problema de magnitud que justifique el tiempo y recursos a invertir?
- Grupo de trabajo: normalmente la elaboración de protocolos y normas tratan temas de gran complejidad, por ello es de interés formar un equipo de trabajo compuesto por profesionales expertos en el tema a tratar.
- Apoyo bibliográfico: como el fin del protocolo es la normalización de una determinada práctica con su correspondiente garantía de éxito, es necesario que todas las normas y recomendaciones se apoyen en el mayor número posible de fuentes.

La estructura última de un protocolo deberá contener los siguientes puntos siguiendo, preferiblemente este orden [24]:

- Fecha de elaboración y fecha de revisión: especificar la fecha de expedición como la de revisión es de gran importancia y utilidad, pues se deberán introducir variaciones que se hayan podido producir a causa de avances científicos, técnicos o normativos.
- Autores: es de gran importancia formar un grupo de trabajo (multidisciplinar en caso de que exista más de una categoría profesional).
- Revisores: conjunto de expertos cualificados para la aprobación del protocolo para su posterior uso. Por lo general, suelen ser comisiones (p.e. Comité Europeo de Normalización).
- Introducción: consiste en justificar la motivación para la elaboración del documento, así como actualizar al lector en el tema a tratar.
- Objeto y campo de aplicación: con el *objeto* se pretende establecer los puntos a cumplir con el protocolo a redactar. Podemos destacar dos tipos de objetivos:
 - a) Generales: indican de una manera generalizada el objetivo a conseguir tras la realización del protocolo.
 - b) Específicos: las metas que se pretenden alcanzar son detalladas, desglosadas y definidas con mayor precisión.

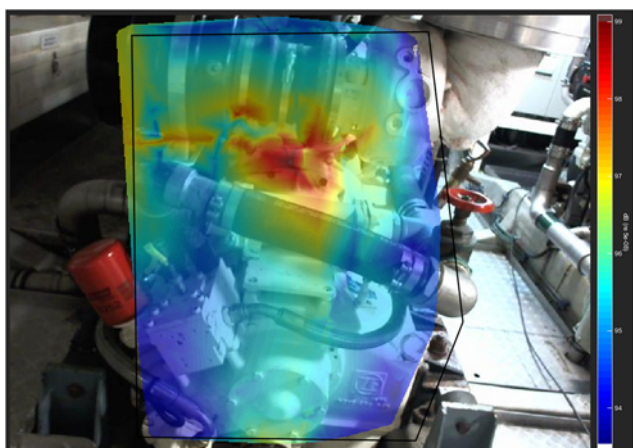
Por otro lado, en el *campo de aplicación* se aclara el ámbito al que está orientado el protocolo.

- Normas para consulta: conjunto de normas utilizadas y en las que se basa el documento que comprende el protocolo a desarrollar.
- Términos y definiciones: todo el conjunto de términos, definiciones y símbolos específicos que podemos encontrar dentro de nuestro protocolo, con el objetivo de ayudar a sus lectores a una mejor comprensión y posterior aplicación del mismo.
- Material: todo aparato, objeto, o medio técnico que intervendrá en durante el proceso; si es preciso, también se indicará su correspondiente calibración.
- Procedimiento: este apartado está conformado por varias fases, como las actividades de valoración, preparación del material, ejecución y precauciones.
- Evaluación: consiste en la realización de una serie de indicadores que faciliten al operador la evaluación y control del proceso.
- Bibliografía: estos apartados poseen dos razones de ser; en primer lugar, demostrar que todo el contenido tiene un fundamento científico y no es de carácter tradicional, y, en segundo lugar, para facilitar a otros lectores y operadores profesionales la proveniencia de los datos elementos específicos que aparecen en el texto.
- Anexos: en esta parte del protocolo se incluirían todos aquellos elementos que son de carácter imprescindible y que faciliten la comprensión o aplicabilidad del documento técnico.

3 DEFINICIÓN DEL PROTOCOLO PARA EL MANTENIMIENTO DE LA FLOTA

La finalidad del presente Trabajo Fin de Grado, ya indicada anteriormente, reside en la elaboración, redacción y aportación de un protocolo con las características propias de una norma, con el cual se permita abordar el mantenimiento predictivo de los buques que conforman la flota mediante el uso del equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*.

A continuación, se presenta el documento realizado, que tiene como fin establecer un proceso secuencial permanente con el cual obtengamos, mediante medidas sonoras in situ, los parámetros acústicos de interés (*presión sonora y velocidad de partícula*) para su posterior uso como datos de interés para el mantenimiento predictivo de los buques.



Protocolo para mantenimiento de la Flota de la Armada (PMAR- AV-2020)

Mediante el equipo de acústica avanzada
Scan & Paint

DESCRIPCIÓN

El presente documento contiene el protocolo, basado en las normas de mediciones acústicas “in situ”, para el mantenimiento de los buques en la flota de la Armada (PMAR-AV-2020).

Jaime José Torán Sierra

Febrero de 2020

19 páginas



LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



PRÓLOGO

El equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* es un novedoso sistema (conjunto de software y sonda) que permite abordar el diagnóstico de funcionamiento de elementos y sistemas que implican radiación sonora o necesidad de propiedades de estanqueidad (como motores, mamparos y cerramientos). Inicialmente se obtiene información según los parámetros nivel de presión sonora y velocidad de partícula, aportando mapas acústicos de visualización directa sobre los elementos mecánicos, así como espectros frecuenciales. Esta información es susceptible de analizarse de cara a la localización de fuentes sonoras y la detección de posibles funcionamientos anómalos.

El texto de este protocolo contiene la documentación técnica necesaria para la recogida in situ y el posterior diagnóstico de información acústica en elementos y sistemas radiantes de los buques de la flota de la Armada Española de cara al mantenimiento preventivo de sus unidades.

ÍNDICE

Página

INTRODUCCIÓN	- 7 -
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	- 7 -
2 NORMAS PARA LA CONSULTA.....	- 7 -
3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES	- 8 -
3.1 Presión sonora (Lp).....	- 8 -
3.2 Velocidad de partícula (Lu)	- 8 -
3.3 Espectro de frecuencias (bandas de octava).....	- 8 -
3.4 Frecuencia fundamental.....	- 8 -
4 DATOS MEDIDOS CONVERTIDOS EN MAGNITUDES.....	- 9 -
5 CONDICIONES DE MEDICIÓN	- 9 -
5.1 Equipo	- 9 -
5.1.1 La sonda Microflown	- 9 -
5.1.2 Micrófono.....	- 9 -
5.1.3 Cámara.....	- 9 -
5.2 Procedimiento de medición <i>in situ</i> con el equipo de acústica avanzada <i>Scan & Paint</i> ..	- 10 -
5.2.1 Montaje	- 10 -
5.2.2 Posiciones de barrido	- 11 -
6 DETERMINACION DE LAS MAGNITUDES EXPRESADAS EN VALORES ÚNICOS.....	- 12 -
6.1 Configuración del programa	- 12 -
6.2 Determinación y diagnóstico de los resultados obtenidos	- 14 -
6.2.1 Análisis genérico.....	- 14 -
6.2.2 Casos particulares	- 14 -
a) Estudio de motores y/o máquinas alternativas	- 14 -
b) Estudio de mamparos para comprobar su estanqueidad	- 14 -
7 INFORME DE MEDIDA.....	- 15 -
ANEXO I.....	- 17 -
ANEXO II.....	- 23 -
ANEXO III.....	- 29 -

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de acústica avanzada basadas en barridos, siguiendo una malla virtual de medida, mediante sonda, próximos a un elemento o sistema que implica radiación sonora (motores, mamparos y cerramientos) se convierten en un instrumento para la caracterización de su comportamiento y, por tanto, para el mantenimiento de los buques de la flota. Estas nuevas técnicas de medida permiten caracterizar, de forma rápida, precisa y con alta resolución espacial el campo acústico generado por dichos elementos vibrantes; aportando, sobre toda la superficie sondeada, los mapas acústicos de las variaciones de presión sonora y de la velocidad de partícula. Además, el potencial de su empleo se incrementa al permitir abordar la detección de fugas acústicas o pérdidas de estanqueidad sonora de cerramientos. Todo ello resulta más destacable si focalizamos la atención, así mismo, en que estas técnicas de acústica avanzada permiten analizar situaciones acústicas en recintos no anecoicos (locales reflexivos y con altos tiempos de reverberación), lo que posibilita evaluar elementos radiantes y sin necesidad de su desmontaje y traslado a laboratorio; situaciones, por tanto, operacionales de un buque en maniobra.

Las técnicas de escaneo acústico, además del reducido tiempo que se necesita para evaluar un sistema vibrante (el equipo *Scan & Paint* permite mediante una medida de corta duración recoger información acústica en cientos de puntos diferentes) se complementan con una grabación simultánea en video que permite la visualización de los mapas acústicos sobre la imagen de dicho sistema, de cara a analizar en detalle las zonas detectadas de interés.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

El equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* es un innovador sistema que posibilita la detección de anomalías en elementos y sistemas que implican radiación sonora o necesidad de propiedades de estanqueidad (máquinas, superficies vibrantes, mamparos, etc.). Por ello destacará, al referirnos en este campo de estudio, la medición y visualización mediante equipos de monitorización de las magnitudes *velocidad de partícula* y *presión sonora*, consiguiendo localizar las fuentes sonoras y detectar las posibles anomalías; además de cuantificar los niveles de emisión, pudiendo ser evaluados mediante mapas sonoros.

Previo a desarrollar los procedimientos de medición y análisis de los resultados, es importante reunir y conocer los puntos de un buque que son de mayor interés para su evaluación. Dicho esto, se considerará:

- Elementos críticos de un buque que por su naturaleza tiendan a un mayor desgaste. Por ello es recomendable tener en cuenta el registro que lleva a cabo la plataforma de GALIA, que gestiona el mantenimiento de los equipos que conforman el buque.
- Elementos que por su diseño poseen tendencia a emitir niveles de ruido mayores: debido a que en su empleo óptimo será afectado en mayor medida por fuerzas y momentos y que son susceptibles de algún desequilibrio estructural durante su vida útil. Navantia, en su Lista de Fuentes Sonoras Principales (LPNS), indica cuales son aquellos elementos dignos de estudio.
- Elementos aconsejados por el astillero, entre los cuales figurarán los siguientes equipos y sistemas: Motores principales, turbinas de gas, cajas de engranajes, líneas de los ejes, generación eléctrica, plantas de agua refrigerada, refrigeración de agua contra incendios, refrigeración por agua salada, producción de agua destilada, aire comprimido y gobierno y control.
- Para conseguir un correcto mantenimiento del buque es necesario examinar la estanqueidad acústica que proporcionan los accesos a compartimientos de carácter crítico.

2 NORMAS PARA LA CONSULTA

Las normas de consulta que a continuación se presentan poseen gran relevancia para la aplicación de la norma. Estas son:

UNE ISO 12001:1996 *Acústica. Ruido emitido por maquinaria y equipo. Normas para la redacción y presentación de un código de prueba de ruido.*

UNE ISO 3740:2001 *Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido. Guía para la utilización de las normas básicas.*

UNE ISO 9614-2:1997 *Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica emitidos por las fuentes de ruido por intensidad del sonido. Parte 2: Medición por barrido.*

IEC 61672-1 *Electroacústica. Medidores de nivel de sonido. Parte 1: Especificaciones.*

ANSI S1.9-1996 *Instruments for the Measurement of Sound Intensity (Instrumentos para la medida de intensidad de sonido).*

IEC 61043:1993 *Electroacoustics - Instruments for the measurement of sound intensity - Measurements with pairs of pressure sensing microphones*". (*Electroacústica. Instrumentos para la medición de la intensidad del sonido. Medidas con pares de micrófonos de sensor de presión.*)

UNE ISO 14257:2001 *Acústica. Medición y descripción paramétrica de las curvas de distribución de sonido espacial en las salas de trabajo para la evaluación de su rendimiento acústico.*

3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

3.1 Presión sonora (L_p)

Aumento o reducción de la presión respecto a la presión atmosférica debido a la presencia de la onda acústica.

NOTA Aunque sea una magnitud cuyas unidades naturales se reflejan en N/m^2 , sus valores de cuantificación tras la medición se aportan en dB.

3.2 Velocidad de partícula (L_u)

Es la magnitud fundamental en la que se basa el presente protocolo y el equipo de acústica avanzada.

Conceptualmente, es la velocidad que adquiere un fluido al ser provocado por el movimiento de una superficie vibrante con la que está en contacto.

La magnitud indicada será proporcional al desplazamiento de la fuente excitante y se considerará positiva o negativa dependiendo de la dirección del movimiento del flujo.

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

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

3.3 Espectro de frecuencias (bandas de octava)

Conjunto de frecuencias dentro del espectro audible que se combinan aun teniendo diferentes intensidades o amplitudes variables en el tiempo.

NOTA 1 Los aparatos de medida disponen de filtros que nos permiten seleccionar previamente una determinada banda.

NOTA 2 El término octava se toma de una escala musical, compuesto por ocho notas, donde la relación entre frecuencias es igual a 2.

3.4 Frecuencia fundamental

También denominada como frecuencia central, o principal: Es la frecuencia más baja de una forma de onda periódica.

NOTA Las frecuencias fundamentales de las diversas bandas de octava son: 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz.

4 DATOS MEDIDOS CONVERTIDOS EN MAGNITUDES

Los datos de medición serán expresados como valores únicos de las dos magnitudes siguientes, de esta manera se facilitará su utilización en el diseño acústico y permitirá establecer futuros valores objetivo. Las magnitudes acústicas de valor único son:

- Presión sonora (L_p)
- Velocidad de partícula (L_v)

5 CONDICIONES DE MEDICIÓN

5.1 Equipo

5.1.1 La sonda Microflown

El sensor de velocidad de partículas se basa en tecnología MEM (sistemas micro electromecánicos), con dimensiones de aproximadamente 1 mm de ancho, 2 mm de largo y 300 μm de espesor. Los cables que lo conforman son utilizados para medir *la velocidad de la partícula*, y poseen una anchura de 10 μm y un espesor de 200 nm. La medición de la *velocidad de la partícula* se realiza mediante dos cables finos resistivos de platino, calentados a 200° C.

Dicha temperatura se alcanza al cruzar los dos cables con una corriente eléctrica por el efecto de Joule. Cuando a través de los cables calentados pasa un flujo de aire, éstos se enfrían debido a la transferencia de calor por convección forzada. Uno de los cables se enfriará más que el otro, y, a causa de la diferencia de temperatura entre los dos cables, será posible medir la *velocidad de partícula*.

5.1.2 Micrófono

El transductor de velocidad se combina con un pequeño condensador electrónico que actúa como micrófono. Dicho componente medirá la distribución de la presión sonora en distintos puntos. Está compuesto por una membrana interna que responde a los distintos cambios de presión de igual manera que un oído humano, moviéndose por las fuerzas que trabajan sobre la superficie. Este movimiento será transformado en una señal eléctrica gracias a un transductor.

5.1.3 Cámara

Se hará uso de una cámara *WebCam Pro 9000* para grabar en vídeo el proceso de medición. Dicha cámara se sincronizará automáticamente con los datos de medición para, posteriormente poder representar el mapa acústico.

Además, se le puede incluir un complemento de seguimiento avanzado. Esta herramienta sería ideal para superar las difíciles condiciones de los rayos y mantener un seguimiento automático robusto de la posición del sensor.

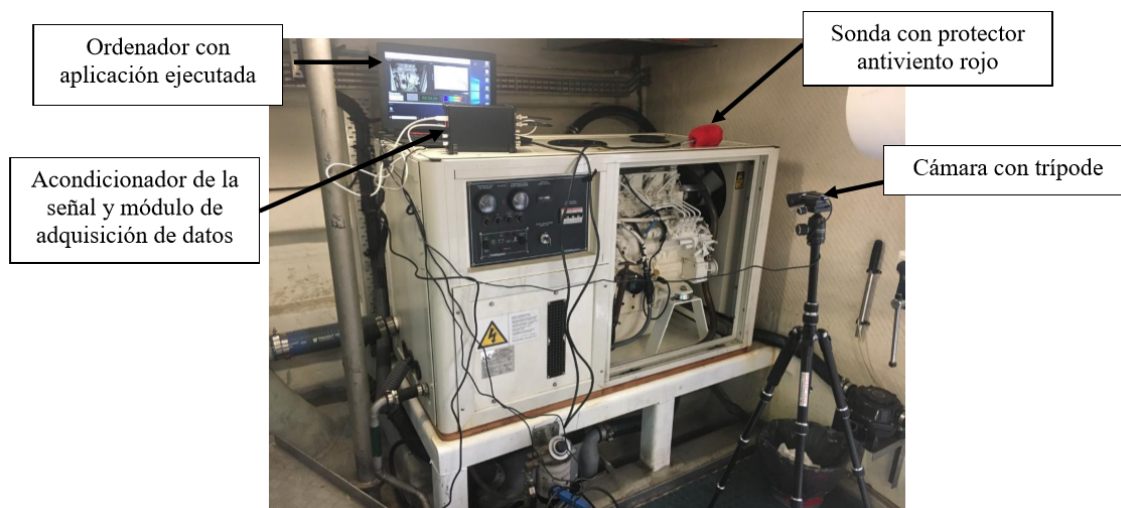


Figura 1 Ejemplo de montaje del equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*.

5.2 Procedimiento de medición *in situ* con el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*

5.2.1 Montaje

Es de carácter fundamental el correcto montaje del equipo *in situ*. Toda la medición se verá influenciada por la manera en la que se haya montado el equipo, pues el proceso de medición será grabado en vídeo en todo momento. Por tanto, se velará por el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Posicionamiento de la cámara: La técnica de medida *Scan&Paint 2D* emplea una cámara de vídeo para capturar el movimiento relativo de la sonda PU con respecto a la imagen. El uso de una cámara ordinaria maximiza la simplicidad y flexibilidad del sistema, pero también limita la información a un plano bidimensional. Es recomendable posicionar la cámara de forma perpendicular al área de medida y así evitar errores de proyección en la imagen. En caso de evaluar una superficie compleja o con una gran curvatura es conveniente medir con varios planos de cámara. En caso de no ser posible, se recomienda procesar los datos con el "*point method*" y así maximizar la homogeneidad de los resultados.
- Iluminación del entorno: El entorno de medida deberá estar suficientemente iluminado para capturar el color del marcador adherido a sonda con suficiente nitidez y así poder diferenciarlo de otros elementos de la imagen. A su vez es importante evitar realizar ensayos con luz de fondo, ya que podría reducir la calidad de color de la imagen y dificultar el proceso de localización de la sonda.
- Ajustes de vídeo: Es importante seleccionar una frecuencia de muestreo adecuada para facilitar el post-procesado de los datos. El empleo de una frecuencia alta (>15 imágenes/segundo) implica un mayor tiempo durante el cálculo de posición de la sonda. En caso de procesar los resultados con el "*point method*", se procesarán individualmente los segmentos de señal asociados con cada imagen del vídeo. Por ello, es recomendable usar una frecuencia de 5 o 10 imágenes y reducir el tiempo de post-procesado lo máximo posible.
- Antes de ejecutar el software *Microflown Velo 4.A.* es necesario conectar correctamente todos los componentes que conforman el equipo. Dicho esto, la cámara, el módulo de adquisición de datos y el acondicionador de la señal se conectarán al ordenador que posee instalado el programa de ejecución. Además, el acondicionador de la señal y el módulo de adquisición de datos se deberán conectar entre sí, junto a la sonda *Microflown*.
- La sonda *Microflown* dispone de un protector anti viento rojo cuya colocación hará que sea elemento clave para que el programa pueda distinguir, de manera correcta, entre el fondo y el sensor durante el procesado de señal.
- Es fundamental realizar una cómoda disposición de los componentes del sistema con el fin de que se permita y garantice el alcance de la sonda a todos los puntos de la superficie a medir.

- Se recuerda que todos los componentes deben ir alimentados de corriente eléctrica; por tanto, se recomienda aportar un alargador que permita acercar el montaje a la superficie a medir.

5.2.2 Posiciones de barrido

Una vez montado el equipo acústico se deberá ejecutar el software *Microflown Velo 4.A.* para poder realizar las medidas correspondientes. Partiendo desde este punto, para obtener los mapas acústicos con la mayor precisión posible se recomienda:

- Trayectoria, distancia a la superficie y orientación de la sonda: El sistema de seguimiento de la sonda utilizado está limitado al plano imagen y, por lo tanto, no es posible determinar la distancia a la superficie de medida ni la orientación de la sonda. Es por ello que el operario es el encargado de garantizar que el escaneo se realiza a distancia aproximadamente constante y la orientación del sensor de velocidad coincide, en todo momento, con la normal a la superficie. La trayectoria de la sonda puede ser totalmente arbitraria, pero es recomendable realizar el escaneo de forma homogénea sobre la zona de medida. (De manera empírica, se recomienda mantener la sonda *Microflown* a una distancia de, aproximadamente, 10 cm a los elementos evaluados). Es importante reseñar al usuario que el valor de la velocidad de partícula depende directamente de la distancia a la que se realiza la medición de la fuente sonora. Además, se deberá mantener el punto rojo de la sonda dirigido, en todo momento, a la superficie vibrante evaluada durante la prueba de medición. Se ha de procurar que los barridos realizados cubran toda la superficie de los focos medidos. Para ello se realizarán trayectorias paralelas que no superen los 20 cm de separación y, al finalizar el recorrido, realizar una última pasada, pero de recorrido transversal, cubriendo toda la superficie a medir.
- Velocidad de escaneo: La velocidad de movimiento de la sonda está relacionada con la precisión y resolución espectral de los mapas sonoros. Es importante intentar garantizar que el escaneo se realiza a una velocidad uniforme e inferior a 0.5 m/s. Velocidades bajas garantizan que haya segmentos de señal suficientemente representativos para cada posición espacial, minimizando la variabilidad temporal intrínseca de la fuente sonora evaluada.
- Posicionamiento del operador: Durante los escaneos, el operador deberá colocarse a un lado de la sonda, evitando que el cuerpo bloquee la visión directa de la sonda. La proximidad a la maquinaria deberá ser suficiente como para no cambiar el patrón de radiación sonora del elemento evaluado, evitando la obstrucción parcial con el cuerpo en las proximidades de la sonda.

La precisión de los resultados es directamente proporcional al número de puntos adquiridos durante el proceso de medición.

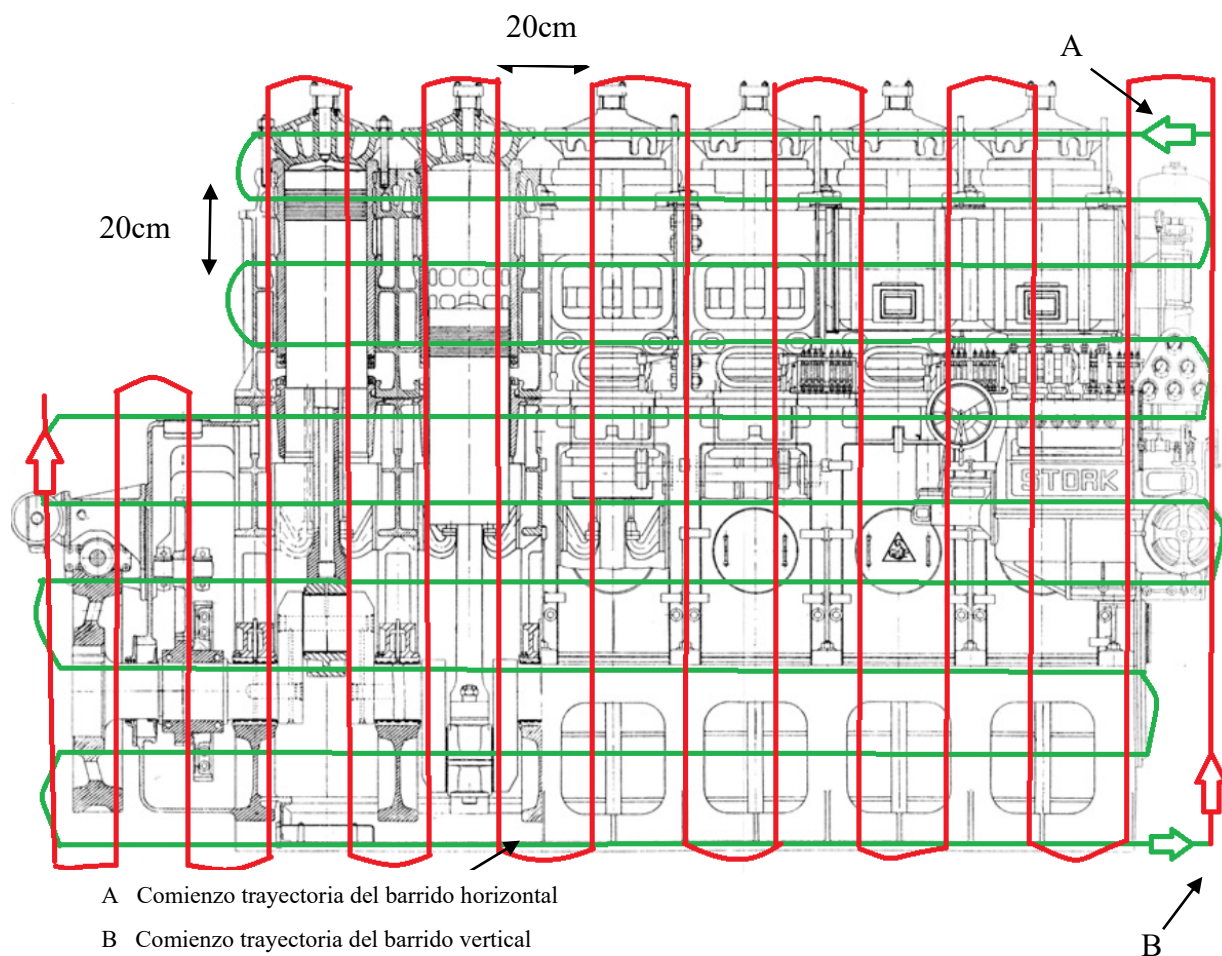


Figura 2 Ejemplo de trayectoria del barrido de medición

6 DETERMINACION DE LAS MAGNITUDES EXPRESADAS EN VALORES ÚNICOS

6.1 Configuración del programa

En este apartado se le indicará al usuario cómo configurar el software *Microflow Velo 4.A.* (el cual deberá tener almacenado anteriormente los datos recogidos en las mediciones pertinentes) para el procesado de los archivos y obtención de resultados. El proceso metodológico es el siguiente:

1. Para cargar y procesar los datos se empleará la pestaña “Process”.
2. A continuación, una vez cargados los archivos, se procesarán con su vídeo correspondiente, indicando cuál era la sonda del fotograma con la opción “Select probe color”. Realizando esto, se consigue que el software esté capacitado para entender que todos los puntos registrados provienen del punto particular, y, de la misma manera, con todo el vídeo.
3. Al haber realizado el punto anterior correctamente e iniciado el procesado con “Start process”, se seguirá el del sensor por la superficie que ha sido barrida, describiendo el recorrido realizado en la medición.
4. Para escoger el fotograma más acorde en el que se pueda visualizar correctamente la superficie vibrante se seleccionará “Set as background image”.
5. Continuando, ahora seleccionamos la pestaña “Analyze” con la que se escogerá el método de desratización (cuadrícula o puntos) que posteriormente se aplicará por cada medición; además, con esta pestaña se podrán analizar en profundidad todos los datos que se hayan obtenido, pudiendo incluso seleccionar los que se quieran reflejar en el mapa sonoro. También se podrá determinar el rango de frecuencias que el usuario quiera observar (mostrando un grado distinto de colores en función del rango que se evalúe).

6. Posteriormente, seleccionamos “Start processing” con el que generaremos el mapa sonoro que nos interese.
7. Como se puede observar en el ejemplo reflejado a continuación, se presenta en el mapa sonoro un gradiente de colores que reflejan, mediante mapas los valores de los parámetros acústicos *velocidad de partícula* o *presión sonora*.

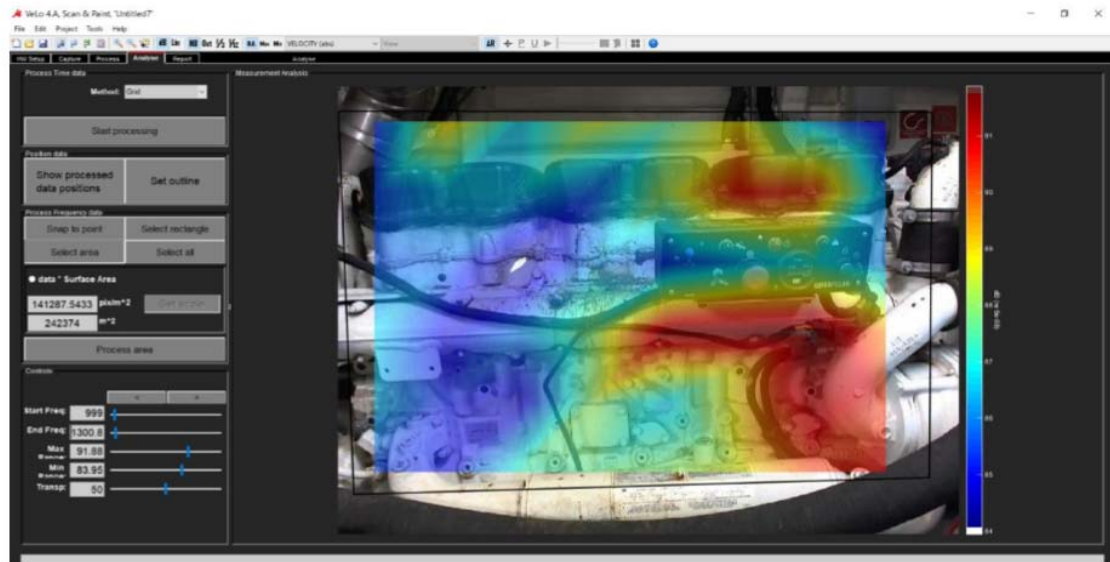


Figura 3 Ejemplo de un mapa sonoro

8. Posteriormente, para realizar un estudio en profundidad de la radiación sonora, el usuario seleccionará un área del mapa sonoro con “Select área” y procesará con “Process Area”; de esta manera le aparecerán dibujadas las gráficas de los parámetros acústicos obtenidos en relación al espectro de frecuencias de la superficie vibrante.

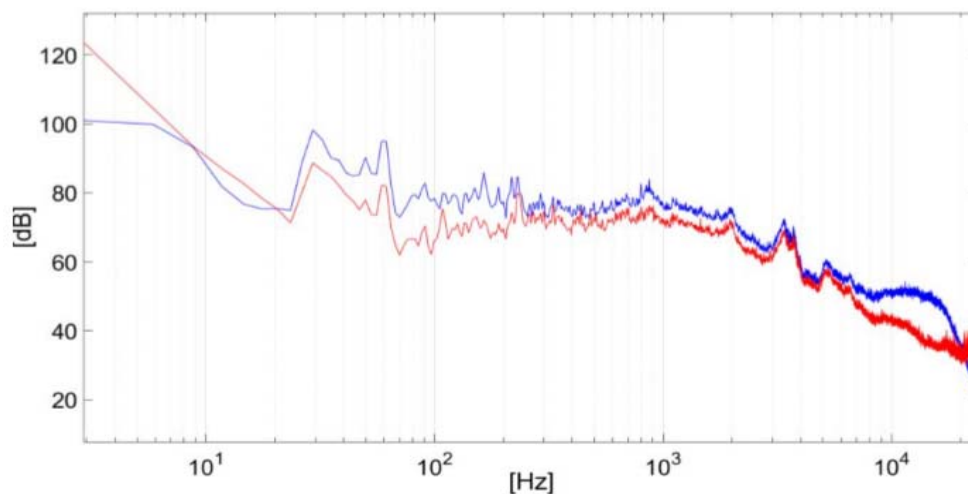


Figura 4 Ejemplo de espectro de frecuencias de los parámetros acústicos

6.2 Determinación y diagnóstico de los resultados obtenidos

Mediante los mapas de *velocidad de partícula* resulta más sencillo localizar los focos sonoros, o puntos críticos, de modo que el siguiente paso ha de consistir en analizar los espectros de tales puntos, además de los mapas sonoros para las frecuencias problema (resonancias) que se obtendrán de tal parámetro acústico.

6.2.1 Análisis genérico

- Partiendo desde el punto 8 del apartado anterior, el usuario tendrá disponible las gráficas frecuenciales, y en ellas deberá analizar los valores obtenidos a lo largo del espectro de frecuencias, resaltando aquellos valores que sobrepasen, de manera clara, los valores esperados por la firma acústica proporcionada por el fabricante.
- Se insiste en la comparativa de resultados con la base datos que la superficie vibrante posea; de esta manera se podrá así analizar su estado actual y deducir los valores a los que tiende, conociendo del mismo modo el desgaste de sus componentes.
- Una vez vistos los puntos que resaltan, se deberá restringir el rango de frecuencias que mejor represente estos valores con el fin de obtener los mapas sonoros con el parámetro establecido; localizando, de manera visual, los focos sonoros que pueden suponer una posible anomalía.

6.2.2 Casos particulares

a) Estudio de motores y/o máquinas alternativas

- En primer lugar, se deberá definir la frecuencia fundamental con la que trabaja el motor.
- Posteriormente se estudiarán los niveles de amplitud que adoptará con esta frecuencia y sus frecuencias armónicas en la señal que se reciba de las gráficas.
- Los datos anteriores se compararán con la base de datos del motor.
- Se ha de establecer la frecuencia de trabajo y armónicas en los mapas sonoros, de aquellos elementos que adopten valores inusuales.

Habiendo realizado el análisis de los resultados el usuario deberá realizar un diagnóstico, que presentará siguiendo de manera adjunta al informe que se facilitará en el (ANEXO). Los fallos que tienen mayor posibilidad de producirse son:

- Desbalanceo.
- Desalineación.
- Soldadura mecánica.
- Desgaste de los rodamientos.
- Desgaste de la caja de engranajes.

b) Estudio de mamparos para comprobar su estanqueidad

El objeto de este apartado, a diferencia de la función principal que se le da con este protocolo, es identificar las fugas acústicas que se producen en los mamparos acústicos de los buques. En este apartado se seguirán los mismos pasos que en la manera genérica de obtención de resultados: obtención de mapas acústicos con sus gráficas de resultados, destacar puntos críticos y, por último, obtención de los mapas acústicos en función de los puntos resaltados con las gráficas.

Obteniendo las fuentes de datos específicos para cada margen de frecuencias, se podrá observar que, dependiendo de ésta, la estructura del mamparo sufrirá mayores vibraciones en algunos puntos que en otros. Es deber del usuario informar de dichas fugas y considerarlas para posterior estudio.

7 INFORME DE MEDIDA

El informe de la medida debe incluir los siguientes puntos de información, los cuales se recogerán en el ANEXO II:

- a) Declaración de que las mediciones se realizan conforme a las normas UNE ISO 12001:1996; UNE ISO 3740:2001; UNE ISO 9614-2:1997; IEC 61672-1; ANSI S1.9-1996; IEC 61043:1993; UNE ISO 14257:2001
- b) Nombre del buque, recinto donde se realizarán las mediciones y su localización en un plano estructural del buque.
- c) Tipo de fuente sonora y declaración de las características de directividad.
- d) A ser posible, croquis de las dimensiones de la superficie vibrante.
- e) Imágenes en planta, alzado, perfil (Crujía, Popa/Proa, Babor/Estribor) de la superficie vibrante a la que se realizarán las mediciones.
- f) La posición de la fuente y del micrófono en relación con el plano de la sala.
- g) Mapas acústicos de *presión sonora* y *velocidad de partícula* (en ese orden).
- h) Gráficas de *presión sonora* y *velocidad de partícula*.
- i) Detección de los puntos críticos a partir de gráficas y comparación con los valores establecidos por el astillero.
- j) Mapas acústicos de *velocidad de partícula* y *presión sonora* en las frecuencias críticas.
- k) Hipótesis y diagnóstico.
- l) Nombre organismo encargado de las mediciones.

Para la recogida de datos *in situ* se hará uso de la plantilla presentada en el ANEXO I.

Plantilla para la recogida de datos acústicos in situ, según protocolo PMAR-AV-2020

ANEXO I



INFORME RELATIVO A LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SUPERFICIES
VIBRANTES EN LOS BUQUES DE LA ARMADA



1. UNIDAD DE LA ARMADA EN LA QUE SE DISPONE A REALIZAR LA MEDICIÓN:

--

2. TIPO DE INSPECCIÓN REALIZADA

RADIACIÓN SONORA	ESTANQUEIDAD
------------------	--------------

3. EMPLAZAMIENTO DÓNDE SE REALIZA LA MEDICIÓN ACÚSTICA:

--

4. ELEMENTO VIBRANTE AL QUE SE REALIZA LA MEDICIÓN ACÚSTICA:

--

5. OBSERVACIONES INICIALES DEL ELEMENTO VIBRANTE:

--

6. FUNCIONAMIENTO ANÓMALO CONOCIDO DEL ELEMENTO VIBRANTE/ PROBLEMAS DE
ESTANQUEIDAD:

--



INFORME RELATIVO A LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SUPERFICIES VIBRANTES EN LOS BUQUES DE LA ARMADA



7. PUNTOS DE RECOGIDA DE DATOS ACÚSTICOS (PLANTA, ALZADO, PERFIL):

--

8. POSICIONES DE LA CÁMARA Y LA Sonda DURANTE EL BARRIDO SONORO:

	CÁMARA	MICRÓFONO
PLANTA		
ALZADO		
PERFIL		

9. LOCALIZACIÓN DE LAS FUENTES SONORAS ANÓMALAS Y/O DETECCIÓN DE FUNCIONAMIENTOS ANÓMALOS:

--

10. DIAGNÓSTICO DE LOS RESULTADOS:

--



INFORME RELATIVO A LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SUPERFICIES VIBRANTES EN LOS BUQUES DE LA ARMADA



11. CONCLUSIONES:

INFORME DE RESULTADOS SEGÚN PROTOCOLO PMAR-AV-2020

NÚMERO DE REGISTRO: BUQUE-XX

ANEXO II



Contenido

1 ANTECEDENTES Y OBJETO	3
2 DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN ACÚSTICA	3
2.1 Inspección realizada: radiación sonora/ estanqueidad.....	3
2.2 Instrumentación utilizada	3
2.3 Características y emplazamiento	3
2.4 Parámetros acústicos recogidos.....	3
2.5 Procedimiento de la inspección acústica	3
3 DIAGNÓSTICO: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	3
4 CONCLUSIONES.....	4



1 ANTECEDENTES Y OBJETO

En él, el usuario e informante deberá abordar los objetivos que se pretenden alcanzar con la medición desarrollada y además indicar la superficie vibrante o elemento evaluados (motor, mamparo o cerramiento) sobre el que se realizarán las mediciones. (No es obligatorio, pero sí recomendable una foto del buque en el que se ha realizado las mediciones).

2 DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN ACÚSTICA

2.1 Inspección realizada: radiación sonora/ estanqueidad

En este apartado, como resalta su título, el usuario deberá indicar que tipo de inspección ha realizado, pudiendo ser de la radiación sonora que emiten mamparos o motores o una evaluación de la estanqueidad que poseen las compuertas del buque.

2.2 Instrumentación utilizada

Aunque en el propio documento se indique que se usará el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, el usuario mencionara los elementos importantes de este equipo para la mejor comprensión del documento por parte de lectores que desconozcan dicho sistema.

El usuario deberá proporcionar una imagen en el que se muestre el equipo acústico montado en perfectas condiciones en el emplazamiento de medida.

2.3 Características y emplazamiento

Reseñar la superficie vibrante sobre la que se realizarán las mediciones, indicando en qué cubierta y mamparo se encuentra (a ser posible, señalar el compartimento en un plano del buque). Se facilitarán tanto sus características (datos técnicos) como las anomalías más recientes (pérdidas, reducción de potencia, etc.).

Además, en el presente informe se presentarán los datos específicos de la firma acústica proveniente de la empresa de fabricación del elemento vibrante.

Se facilitará, así mismo, una imagen o boceto de la superficie vibrante a medir.

2.4 Parámetros acústicos recogidos

Se determinarán las magnitudes que se obtendrán con el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*; desarrollando una breve reseña técnica y didáctica sobre el significado de sus valores y que se consigue con estos datos.

2.5 Procedimiento de la inspección acústica

Se indicarán que normas se han usado para el completo y correcto desarrollo de la medición.

El usuario especificará las distancias de separación entre la superficie vibrante y la posición de los elementos que conforman el equipo de acústica avanzada.

Proporcionará imágenes en planta, alzado y perfil de la superficie vibrante que se va a medir.

Proporcionará, a su vez, una imagen por cada perspectiva de medición del recorrido realizado con la sonda acorde a lo establecido por el protocolo PMAR-AV-2020 *Scan & Paint*.

3 DIAGNÓSTICO: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se dispondrá en el documento imágenes de los mapas sonoros conseguidos, de *presión sonora* y *velocidad de partícula*, así como las gráficas que relacionan el nivel sonoro con el espectro de frecuencias que se proporcionan.

En caso de ser un motor la superficie vibrante medida, conviene calcular la frecuencia dominante y el primer armónico; estas mediciones corresponden al incremento de presión producido durante la combustión y, por tanto, son los valores que se deberán comprobar con la base de datos.

Se indicarán los focos de sonido y las frecuencias que más resaltan y, a posteriori, se presentarán los mapas acústicos en el espacio de frecuencias que corresponda.



INFORME DE RESULTADOS SEGÚN EL PROTOCOLO PMAR-AV-2020



4 CONCLUSIONES

Como indica el título del apartado, el informante, en base a las mediciones realizadas y resultados obtenidos, proporcionará al lector del documento las posibles causas de las anomalías que haya encontrado, indicando la gravedad de éstas.

CERTIFICADO DE INSPECCIÓN SEGÚN PROTOCOLO PMAR-AV-2020

(ANEXO III)

INSPECCIÓN REALIZADA (DESCRIPCIÓN Y DIRECCIÓN)



INFORME RELATIVO A LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SUPERFICIES VIBRANTES PARA LA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS Y DEFICIENCIAS EN LOS BUQUES DE LA FLOTA.

BUQUE DE LA FLOTA:

NÚMERO DE REGISTRO (ACRÓNIMO BUQUE- N° REG.):

--	--

TIPO DE INSPECCIÓN (SELECCIONAR):

FECHA DE INSPECCIÓN:

RADIACIÓN SONORA / ESTANQUEIDAD	
---------------------------------	--

EMPLAZAMIENTO DEL ELEMENTO:

SISTEMA EVALUADO (MOTOR, MAMPARO, ETC.):

--	--

PRINCIPAL RESULTADO DE LA INSPECCIÓN REALIZADA, SEGÚN DIAGNÓSTICO INICAL EN EL BUQUE:

Anexos: INFORME DE RESULTADOS (GENERADO EN LABORATORIO)

INSPECTOR/EMPRESA DE MEDICIÓN	EL JEFE DE MÁQUINAS DE LA UNIDAD
Nombre:	Nombre:
Fecha:	

EL INFORME DE INSPECCIÓN NO DEBE SER REPRODUCIDO, MÁS QUE EN SU TOTALIDAD, SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DE LA UNIDAD.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

Tal y como se comentó al inicio del presente Trabajo Fin de Grado, el mundo gira actualmente alrededor de la tecnología inteligente, en el que todo está conectado entre sí y cuyos datos recogidos se suben a la nube, nos encontramos ante la denominada *Industria 4.0* y es el concepto al que aspira cualquier empresa u organización.

Gracias a esta revolución, tanto industrial como tecnológica, la recogida y análisis de datos se consigue de una manera sencilla y, con ello, el control de la maquinaria o infraestructuras que componen una empresa resulta más eficaz. Así, las labores de mantenimiento de cualquier organización han mejorado a niveles nunca imaginados.

Por ello, la Armada española, para no quedarse atrás, ha creado el concepto de Armada 4.0 que junto a Navantia y el Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR) llevará un control superior al que se conseguía en el siglo pasado.

La gran mayoría de controles que se llevan a cabo en los buques de la flota consisten en sensores tanto de temperatura como controladores del nivel de productos, que ayudan al correcto funcionamiento de los equipos y sistemas.

Con la presentación en este trabajo del equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* hemos podido apreciar las numerosas posibilidades y potencialidad que nos oferta el mundo de la acústica para el mantenimiento de los buques de la flota, centrándonos en la supervisión de todos los elementos que existen en la Cámara de Máquinas (motores, auxiliares, etc.) así como un control exhaustivo de una parte fundamental del buque, la estanqueidad en mamparos y cerramientos.

El desarrollo de la norma protocolaria que este trabajo aporta, para el uso del equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* en los buques de la Armada (PMAR-AV-2020) nos presenta la sencillez de su montaje en un buque, su uso básico y facilidad en el desarrollo y obtención de resultados; convirtiéndose en una opción plausible y con mucha esperanza de ser usada en un futuro. Además, el desarrollo de la documentación técnica elaborada confirma que el método desarrollado posee complejidad reducida que no requiere de técnico en la materia.

Por tanto, las técnicas de acústica avanzada basadas en barridos, siguiendo una malla virtual de medida, mediante sonda, próximos a un elemento o sistema que implica radiación sonora (motores, mamparos y cerramientos) se convierten en un instrumento para la caracterización de su comportamiento y, de este modo, para el mantenimiento de los buques de la flota. Estas nuevas técnicas de medida permiten caracterizar, de forma rápida, precisa y con alta resolución espacial el

campo acústico generado por dichos elementos vibrantes; aportando, sobre toda la superficie sondeada, los mapas acústicos de las variaciones de *presión sonora* y de la *velocidad de partícula*. Además, la detección de fugas acústicas o pérdidas de estanqueidad sonora de cerramientos. El protocolo elaborado se considera adecuado para el mantenimiento de la flota porque estas técnicas de acústica avanzada permiten analizar situaciones acústicas en recintos no anecoicos (locales reflexivos y con altos tiempos de reverberación), lo que posibilita evaluar elementos radiantes y sin necesidad de su desmontaje y traslado a laboratorio; situaciones, por tanto, operacionales de un buque en maniobra.

4.2 Líneas futuras

Una vez que se ha elaborado un protocolo de mantenimiento en el que se hace uso de un equipo de acústica avanzada, se abren líneas futuras de posibles Trabajos Fin de Grado que apliquen este protocolo o que se pueda adaptar a otros ámbitos que no se han mencionado durante el desarrollo de este proyecto:

- I. *Realizar un análisis completo de los automóviles que componen la Compañía de Infantería de Marina de la Escuela Naval de Militar*. Los vehículos de esta compañía son utilizados todos los jueves del año, a excepción de los periodos vacacionales, llevándolos a terrenos de orografía complicada y que pueden requerir un gran esfuerzo mecánico. Sería de gran utilidad e interés realizar un estudio sobre el estado de estos vehículos, así como de su mantenimiento, aplicando una adaptación del protocolo desarrollado.
- II. *Realizar un estudio de las emisiones de ruido en el interior que producen los motores de la Compañía de Infantería de Marina y desarrollo de parches de sonido*. Las propiedades vibroacústicas de la cabina de un coche desempeñan un papel clave en la percepción de la calidad del vehículo. Todos los vehículos incluyen un paquete acústico que comprende varios componentes que mejoran el confort sonoro. Aun así, estas propiedades acaban desgastándose y, por ello, conviene la creación de unos parches que puedan solucionar estos problemas.
- III. *Realizar un estudio de la estanqueidad existente en los distintos compartimentos del patrullero Tabarca*. Este patrullero perteneciente a la sección del MARFER es un buque de antigüedad considerable, que podría llegar a ser de gran utilidad realizar un estudio de los problemas de estanqueidad que puedan existir, así como de las posibles soluciones que se puedan llevar a cabo.
- IV. *Estudio y comprobación del aislamiento acústico existente en las aulas del Isaac Peral*. Aunque el objetivo de este proyecto ha sido la creación de un protocolo para los buques de la Armada, el equipo *Scan & Paint* tiene numerosas aplicaciones y, si queremos implementarlo en la Armada, se podría crear una adaptación del protocolo aquí presentado y demostrar con este proyecto su gran utilidad y eficiencia.
- V. *Control y mantenimiento de las calderas de los edificios Francisco Moreno y Marqués de la Victoria*. Las calderas de los edificios que alojan a los alumnos de la Escuela Naval Militar poseen una edad considerable y en ocasiones presentan una serie de deficiencias que no permiten su óptimo uso. Por ello se emplearía el protocolo diseñado en este TFG para realizar un estudio de sus posibles deficiencias y mantenimientos para mejorar su uso.

5 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figurarán todas las referencias, sean recursos web, libros, artículos, etc., incluyendo la información de autores, título de la obra, nombre de la publicación, año, edición y enlace más fecha de último acceso en el caso de referencias a recursos online.

- 1] J. L. Urcelay, «infodefensa.com,» Ministerio de Defensa, 04 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.infodefensa.com/es/2019/04/04/opinion-transformacion-digital-sostenimiento-armada.php>.
- 2] M. Baraza, «Ibermática,» Ibermática, 2020. [En línea]. Available: <https://ibermatica.com/sectores/industria/>.
- 3] Navantia, «Navantia,» [En línea]. Available: <https://www.navantia.es/es/navantia-4-0/astillero-4-0/gemelo-digital/>.
- 4] M. R. P. d. Riquelme, «Protocolo para el mantenimiento predictivo de la Flota de la Armada mediante Software de acústica avanzada,» Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2019.
- 5] F. J. R. R. y J. D. I. P. Crespo., «Guía acústica de la construcción,» Madrid:, Cie Dossat, 2000, 2006.
- 6] D. Fernández Comesaña, D. García Escribano, H.-E. de Bree y K. Holland, «Evaluación y detección de pérdidas de aislamiento acústico en la edificación,» TecniAcustica, 2011.
- 7] L. G. Escribano, A. Grosso y D. F. Comesaña, «Uso de medidas directas de velocidad de partícula para la optimización de potencia acústica de electrodomésticos y maquinaria,» VII Congreso Ibero-Americano de acústica, Évora (Portugal), 2012.
- 8] D. F. Comesaña, E. Tijs y H.-E. d. Bree, «Exploring the properties of acoustic particle velocity sensors for near-field noise source localisation applications,» Forum Acusticum, Cracovia, 2014.
- 9] Z. G. Kari Saine, «Five dB noise reduction for large medium speed diesel engines,» Wärtsilä, 2016.
- 10] I. J. T. Astros, «Mantenimiento en las empresas básicas y en las pequeñas y medianas empresas,» [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos96/mantenimiento->

empresas-basicas-y-pymes/mantenimiento-empresas-basicas-y-pymes.shtml.

- UpKeep, «UpKeep,» 2020. [En línea]. Available:
11] <https://www.onupkeep.com/learning/maintenance-types/>.
- F. J. A. Viseras, «Implementación RCM en los motores de las Lanchas de Instrucción,»
12] Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2019.
- M. B. Galdo, «Algunas consideraciones sobre el mantenimiento en la Armada,» *Revista*
13] *General de Marina*.
- E. P. Paredes, «El mantenimiento en la Armada,» *Revista General de Marina*, 2011.
14]
- F. J. G. Rubio, «Elaboración del subsistema de mantenimiento programado de las Lanchas de
15] Instrucción,» Marín, Pontevedra, 2017.
- Microflown Thecnologies, «Product leaflet Scan & Paint».
16]
- Daniel Fernández Comesaña, S. Steltenpool, G. C. Pousa, H.-E. d. Bree y a. K. R. Holland,
17] «Scan and Paint: Theory and Practice of a Sound Field Visualization Method,» Hindawi
Publishing Corporation, 2013.
- M. Guiot, D. F. Comesaña, M. Korbasiewicz y G. C. Pousa, «Turbo- Compressor and piping
18] noise assessment using a particle velocity based sound emission method,» *inter.noise*, San
Francisco, 2015.
- D. F. Comesaña, «Scan-based sound visualisation methods using sound pressure and particle
19] velocity,» University of Southampton, 2014.
- Smithsonian, «Smithsonian - Chladni Plates,» Smithsonian, 03 Febrero 2020. [En línea].
20] Available: <https://americanhistory.si.edu/science/chladni.htm>.
- Real Academia Española, «Diccionario de la Real Academia Española,» [En línea].
21] Available: <https://dle.rae.es/protocolo?m=form>.
- UNE, «Proceso de elaboracion de normas UNE,» [En línea]. Available:
22] <https://www.une.org/normalizacion/nuevo-en-las-normas>.
- Una Norma Española, «Medicion in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los
23] elementos de construcción,» AENOR, 2015.
- Consejería Española de Salud, «Guía para la Elaboracion de Protocolos,» Málaga, Andalucía,
24] 2009.
- «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso:
25] 13 enero 2015].
- J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios,
26] 2010.
- P. Martínez y A. García, *Cómo escribir una buena memoria de TFG*, Publicaciones del 2000,
27] 2013.
- A. Pérez, *Cómo escribir una bibliografía*, Nuevas publicaciones.
28]

29] L. E. Recarey, F. J. R. Rodríguez y V. M. M. Cacharron, Gestion de la contaminación acústica. Análisis de la legislación estatal y propuestas de aplicación para la administración local, Vigo: Concello de Vigo; Valedor do Cidadán de Vigo.

30] UpKeep, «Upkeep,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.onupkeep.com/preventive-maintenance>.

31] D. F. Comesaña, B. P. Triantafillos Koukoulas y E.-J. Jongh, «Calibration of Acoustic Particle Velocity Sensors using a Laser based Method,» International Congress on Sound & Vibration, Atenas, 2016.

32] Universidad de Buenos Aires, «Campus virtual: Facultad de Farmacia y Bioquímica,» 2020. [En línea]. Available: <http://virtual.ffyb.uba.ar/mod/book/view.php?id=88043&chapterid=1838>.

33] Doconoteca, «Doconoteca: El oído, explicación, guía de trabajo y respuestas,» 29 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.docenteca.com/Publicaciones/478-el-oido-explicacion-guia-de-trabajo-y-respuestas.html>.

34] UpKeep, «What is preventive maintenance?,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.onupkeep.com/preventive-maintenance>.

35] UpKeep, «Predictive Maintenance: What is it & What are the Benefits?,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.onupkeep.com/learning/maintenance-types/predictive-maintenance>.

36] UpKeep, «Corrective Maintenance Examples and Definition,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.onupkeep.com/learning/maintenance-types/corrective-maintenance>.