

EMPLEO DE TÉCNICAS DE ACÚSTICA AVANZADA: OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE LA RADIACIÓN SONORA DE LOS MOTORES

Francisco Javier RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
Profesor del Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

Francisco José ASENSIO VISERAS



Daniel FERNÁNDEZ COMESAÑA
Doctor ingeniero de Telecomunicaciones

Introducción



L desarrollo de jornadas, encuentros y congresos técnicos como punto de encuentro de expertos que actualmente se sitúan en primera línea pone de manifiesto la importancia que la aplicación de técnicas de acústica avanzada está asumiendo en la industria del automóvil, naval y aeronáutica. De su experiencia en el empleo de tecnologías acústicas de alto nivel podrían hablar, por ejemplo, Ferrari, Porsche, Airbus, Dassault o incluso la Agencia Espacial Europea (buscando mejorar la calidad de sus productos e incrementar la eficiencia de los programas de mantenimiento).

Estas nuevas técnicas de medida permiten caracterizar, de forma rápida, precisa y con alta resolución espacial, el campo acústico generado por elementos o sistemas que implican radiación sonora (motores, mamparos y cerramientos); aportando sobre los elementos mecánicos analizados la visualización directa de los mapas acústicos de los parámetros *presión sonora* y *velocidad de partícula*. Esta información puede analizarse tanto para la localización de fuentes sonoras como para la detección de posibles funcionamientos anómalos. Por tanto, resulta susceptible el empleo de estas técnicas de acústica avanzada para el mantenimiento de los buques de la Flota.

Todo ello resulta más destacable si focalizamos la atención en que estas técnicas permiten analizar situaciones acústicas en recintos no anecoicos (locales reflexivos y con altos tiempos de reverberación), lo que posibilita evaluar elementos radiantes sin necesidad de su desmontaje y traslado a laboratorio; situaciones, por tanto, operacionales de un buque en maniobra.

El presente trabajo tiene como único objetivo aportar un ejemplo de actuación didáctica desarrollado en el ámbito naval, exponiendo la evaluación relativa al comportamiento del motor y maquinaria complementaria de una lancha de instrucción de la Escuela Naval Militar (diagnosticando dicho comportamiento tanto en situación de navegación como en puerto).

Ello ha permitido demostrar cómo las técnicas de acústica avanzada posibilitan: identificar elementos ruidosos en un ambiente reverberante; caracterizar múltiples condiciones de operación *in situ*; realizar un análisis rápido, preciso y confiable; encontrar posibles elementos que presenten un comportamiento anómalo, y localizar fuentes de sonido de baja frecuencia y fuentes primarias de ruido.

Las técnicas de acústica avanzada y el mantenimiento predictivo en los buques de la Armada

El mantenimiento predictivo engloba todas las acciones requeridas para conseguir que una máquina trabaje permanentemente en las mejores condiciones y con una eficiencia óptima de funcionamiento. Existe una creciente tendencia a aumentar la inversión en actividades relacionadas con el mantenimiento con el fin de reducir pérdidas a largo plazo derivadas de posibles fallos temporales o permanentes de un sistema complejo. Dentro de las tres corrientes de mantenimiento implementadas en la industria, el predictivo es comúnmente usado para el estudio de las tendencias del rendimiento medido para predecir posibles averías.

En relación con el mantenimiento, conviene recordar las reflexiones emitidas por el antiguo AJEMA, el almirante general Jaime Muñoz-Delgado y Díaz del Río: «En los últimos años el mantenimiento de la Fuerza Naval se ha ido transformando... y está obligando a elaborar nuevos procedimientos para mantener nuestros buques e instalaciones y revisar todos los procesos de trabajo relacionados con el mantenimiento en su conjunto».

Nos encontramos ante un contexto de actuación en el cual la industria y la Armada abordan una estrecha colaboración para focalizar su atención en el ciclo de vida de los equipos. En este sentido, la Armada ha creado el Centro de Supervisión y Análisis de Datos (CESADAR) con el fin de lograr una mayor eficiencia en el mantenimiento. Para ello, este Centro se nutre tanto de los datos aportados por los equipos conectados (*on line*) como de los no conectados automáticamente (*off line*) y enviados desde los propios buques

para ser analizados por especialistas. Al mismo tiempo, se explora el potencial de adaptar nuevas tecnologías de medición emergentes y contrastadas al mantenimiento predictivo de los buques en la Armada.

En este sentido, como se reflejará a continuación mediante el ejemplo realizado, las técnicas de acústica avanzada poseen unos factores diferenciadores potenciales que inducen su posible viabilidad de incorporación a las unidades de la Armada como un método de análisis de datos *off line*, formando parte del flujo de datos del mencionado sistema del CESADAR, pues permitirían aportar una nueva herramienta para el mantenimiento predictivo y con la ventaja de obtener datos *in situ* desde el propio buque en situación operativa.

En este punto, resulta importante recordar los elementos de un buque que poseen mayor interés de cara a una evaluación con técnicas de acústica avanzada enfocadas al mantenimiento de la nave:

- Elementos críticos que por su naturaleza tiendan a un mayor desgaste, para lo que es recomendable tener en cuenta el registro que lleva a cabo la plataforma 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 su empleo óptimo se encontrará 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 cuáles son aquellos elementos dignos de estudio.
- Los siguientes equipos y sistemas concretos: motores principales, turbinas de gas, cajas de engranajes, líneas de los ejes, generación eléctrica, plantas de agua refrigerada, refrigeración de agua contraincendios, refrigeración por agua salada, producción de agua destilada, aire comprimido y gobierno y control.

Además, para conseguir un correcto mantenimiento del buque es necesario examinar la estanqueidad acústica que proporcionan los accesos a compartimientos de carácter crítico.

Ejemplo de actuación: visualización sonora mediante el equipo de acústica avanzada Scan & Paint 2D

Las medidas acústicas fueron realizadas en la sala de motores de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar empleando el equipo de medida *Scan & Paint 2D*, que captura el movimiento manual de una sonda de intensidad PU cerca de los elementos del motor, mientras se filma el esca-



Lancha de instrucción de la Escuela Naval Militar. (Fuente: Armada).

neo con una cámara de vídeo. La posición del sensor es extraída de la secuencia de vídeo mediante la aplicación de procesado de imagen para encontrar marcadores por color. Las variaciones acústicas a través del espacio son determinadas segmentando las señales de acuerdo con la posición de la sonda y los mapas sonoros resultantes se presentan sobre una imagen del entorno evaluado, obteniendo así una representación visual de la distribución sonora.

El análisis está enfocado al estudio de su motor principal: *Caterpillar C-18*. Dos condiciones fueron principalmente evaluadas: ruido en puerto y navegando. El motor de seis cilindros se mantuvo a 600 RPM en ambos casos para poder comparar los resultados. Además, medidas adicionales, fueron realizadas en puerto para caracterizar en mayor detalle el ruido de baja frecuencia del motor.

Comparación de ruido: navegando y en puerto

Cuando el motor se usa durante la navegación, las fuerzas de combustión y procesos asociados con los movimientos mecánicos inducen un incremento de su temperatura, causando la expansión de los componentes metálicos y, a su vez, reduciendo las holguras y espacios de dilatación. Este proceso da lugar a una mayor emisión sonora, que produce un aumento significativo del nivel sonoro radiado.



Empleo de la sonda del equipo de acústica avanzada durante la evaluación de radiación sonora del motor de una lancha de instrucción. (Fuente: Armada).

El espectro de potencia acústica promediado espacialmente muestra un significativo aumento del ruido a medias y altas frecuencias. Por otra parte, la excitación a bajas frecuencias está dominada por el ruido tonal inducido por las primeras órdenes de giro del motor. Se puede observar que el primer componente armónico (tercer orden, 30 Hz) es muy similar en ambas condiciones medidas, mientras que el sexto orden (60 Hz) resulta mucho más ruidoso cuando el barco está navegando. Esto puede ser un indicador de que el ruido generado por cierto movimiento cíclico se incrementa, probablemente por un aumento de las fuerzas de fricción entre elementos mecánicos debido a una mayor temperatura interna.

Los mapas sonoros que se muestran a continuación revelan la distribución de *velocidad de partícula* en las principales partes evaluadas del motor.

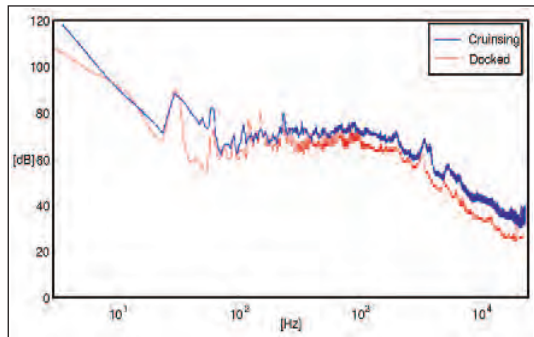


Figura 1. Gráficas frecuenciales de los parámetros acústicos *velocidad de partícula* y *nivel de presión sonora* derivados de las mediciones realizadas en el motor principal en puerto. (Elaboración de los autores).

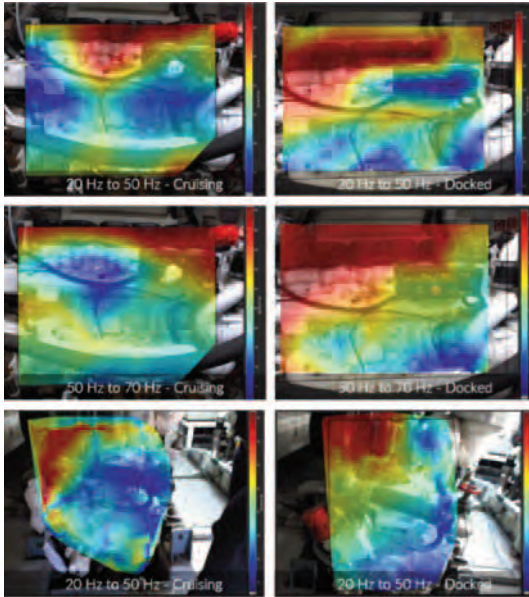


Figura 2. Mapas sonoros de la distribución de los valores del parámetro acústico *velocidad de partícula* en las principales partes investigadas del motor de la lancha de instrucción. (Elaboración de los autores).

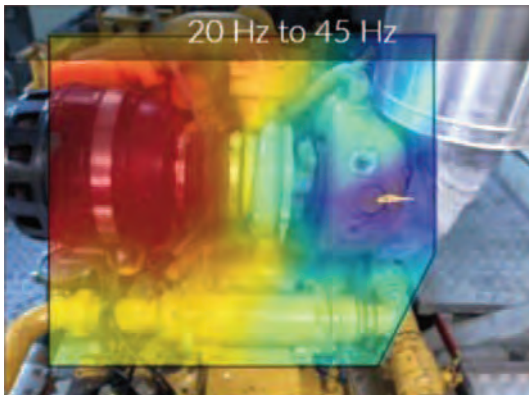


Figura 3. Resultados del parámetro acústico *velocidad de partícula* en el colector de aire (20 a 45 Hz). (Elaboración de los autores).

tor de aire es, de nuevo, la principal fuente dominante de excitación vibroacústica en las primeras bandas audibles (20 a 45 Hz) (fig. 3).

La cubierta de las válvulas del motor y el árbol de levas son las fuentes primarias de ruido a bajas frecuencias (por debajo de 100 Hz). Los elementos principales responsables de la radiación sonora cambian dependiendo de las condiciones externas de operación del motor (en puerto o navegando), tanto en la vista frontal como en la lateral. Por otra parte, la turbina y los elementos adyacentes del colector de aire se convierten en las fuentes dominantes mientras el barco está en puerto.

Visualización sonora de baja frecuencia

La visualización sonora basada en el mapeado directo de los sistemas mecánicos medidos permite la identificación de los elementos más ruidosos incluso para frecuencias muy bajas. El uso del parámetro acústico *velocidad de partícula*, y su conexión intrínseca con la vibración de elementos mecánicos, permite localizar fuentes sonoras en distintas condiciones de medidas para todo el rango audible. Los resultados (fig. 2) muestran las partes de mayor excitación mientras el motor se opera en ralentí estando en puerto. En este caso, el colector

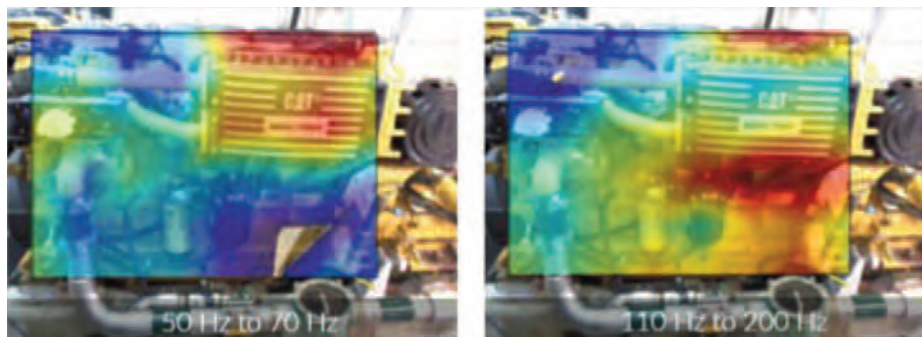


Figura 4. Resultados del parámetro acústico *velocidad de partícula* en la cubierta de válvulas, de 20 a 45 Hz. (Elaboración de los autores).

La cubierta de las válvulas es la principal fuente de ruido, entre 50 y 70 Hz. Por otra parte, entre 110 y 200 Hz, tanto la cubierta de válvulas como la zona cercana a los pistones donde se encuentran múltiples elementos de refrigeración, poseen niveles parejos de ruido.

Conclusiones

Los mapas sonoros acústicos obtenidos mediante la herramienta de acústica avanzada *Scan & Paint 2D* permiten la identificación de los componentes más ruidosos de un motor naval en múltiples condiciones de funcionamiento. A pesar de las dificultades del entorno de medida (presencia de maquinaria distinta a la evaluada y sala no tratada acústicamente con elementos de absorción sonora), fue posible la localización de las fuentes sonoras dominantes, incluso a bajas frecuencias, hasta 20 Hz. Además, el comportamiento vibroacústico del motor fue caracterizado *in situ*, información que puede ser clave para entender posibles anomalías futuras y enfocar tareas de monitorización en los elementos más problemáticos, tanto cuando el barco se encuentra en puerto como navegando. Por tanto, las técnicas de acústica avanzada se convierten en un instrumento susceptible de ser empleado para el mantenimiento de los buques de la Flota, pues permiten la evaluación del comportamiento de elementos o sistemas que implican radiación sonora (motores, mamparos y cerramientos) mediante la recogida de información acústica *in situ* y el posterior diagnóstico de los resultados.

En este sentido, resulta imprescindible indicar que, aunque los recintos de los motores navales poseen gran carácter reverberante (cerrados y con mucha reflexión), cuando pretendemos analizar acústicamente, por ejemplo, el comportamiento de un motor, los resultados derivados de los mapas acústicos obtenidos del parámetro *velocidad de partícula* no se verán afectados por las

reflexiones provenientes de otras partes del recinto, detectando, de modo preciso, un posible fallo.

Futuros trabajos podrían estar enfocados en un análisis de cómo el ruido generado en la sala de máquinas se transmite a otras zonas del barco o incluso al entorno del mismo. Esto podría servir para diseñar tratamientos efectivos que permitan reducir la huella sonora, garantizando una ventaja importante para su uso en aplicaciones militares.



BIBLIOGRAFÍA

- ASENSIO VISERAS, F. J. (2019): *Implementación de estrategias de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en motores de embarcaciones*. Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
- RAMIS PASCUAL DE RIQUELME, M. (2019): *Protocolo de mantenimiento predictivo para la flota de la Armada española con software acústico avanzado*. Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
- GONZÁLEZ-AYER LACALLE, D. (2018): «Evolución del Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada». *REVISTA GENERAL DE MARINA*, agosto-septiembre, pp. 333-337.
- COMESAÑA FERNÁNDEZ, D. (2014): «Métodos de visualización sonora basados en escaneo usando presión y velocidad de partícula». *Revista de acústica*, vol. 45, n.º 3, pp. 51-52.