



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Implementación del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad
(RCM) en los motores de las lanchas de instrucción*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Francisco José Asensio Viseras

DIRECTORES: Rafael María Carreño Morales
Francisco Javier Rodríguez Rodríguez

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Implementación del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad
(RCM) en los motores de las lanchas de instrucción*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Con este trabajo se realiza la puesta en marcha de la filosofía Reliability Centered Maintenance (RCM), esto es, Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (o Confiabilidad) en los motores de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar (ENM). El trabajo se ha dividido en dos partes principales. La primera parte consiste en una labor de investigación donde se estudia y se describe la filosofía RCM. Esencialmente, RCM persigue la optimización de todos los procesos de mantenimiento de un equipo con el fin de prolongar el máximo tiempo posible su ciclo operativo. Por otro lado, también se busca llevar a cabo una implementación práctica en el mantenimiento actual de los equipos elegidos. Por ello, la segunda parte del trabajo consiste en implementar un nuevo plan de mantenimiento, a partir de la investigación realizada en RCM. Los equipos que resultaron elegidos para este cometido fueron los motores de las lanchas de instrucción. Las razones que llevaron a esta decisión fueron, por un lado, la disponibilidad de los equipos para el alumno, ya que el acceso a los mismos permitió un desarrollo más ágil del TFG. Por otro lado, el elevado tiempo que llevan en funcionamiento estos equipos y el hecho de que nunca se les hubieran realizado mantenimientos basados en RCM, ayudó a decantar la elección por los motores de estas lanchas.

Posteriormente, se lleva a cabo el desarrollo de los sistemas de mantenimiento seleccionados y su justificación. Una conclusión importante de este trabajo es el hecho de que los síntomas de alguna avería que podría inutilizar los motores a largo plazo podrían ser detectados mediante el análisis de características vibracional y de los gases de escape de los motores.

Finalmente, el proyecto culmina con la elaboración de un plan de mantenimiento basado en RCM donde se contrasta y se procesa todo el trabajo que se llevó a cabo.

PALABRAS CLAVE

Mantenimiento, RCM, predictivo, Armada, vibraciones, lanchas de instrucción, exhaustación.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer este trabajo a mis tutores, por la ayuda y el apoyo prestado para la realización del mismo. A los oficiales de la Escuela Naval que han hecho todo lo posible para colaborar en este proyecto mediante la cesión de material y la constante disposición para ofrecer cualquier tipo de apoyo además de los puntos de vista con los que afrontar este trabajo.

También me gustaría agradecerse a mi familia, que me han apoyado durante estos cinco años y con los que he conseguido superar todas las dificultades que se han puesto en mi vida, que no han sido pocas y me han animado a dar siempre lo mejor de mí.

Quisiera agradecerse a toda mi brigada, con los que he compartido mil vivencias dentro y fuera de la Escuela. Este trabajo significa el fin de una etapa para empezar otra llena de aventuras y emociones, en los que podre evolucionar como persona y militar. Espero que la experiencia obtenida durante la realización del trabajo constituya la base necesaria sobre la que asentar futuros conocimientos, pues cuando sales de la Escuela Naval por la puerta Carlos I es cuando comienza la verdadera ‘Escuela’ y echaré en falta no poder volver a seguir formándome.

Por último, pero no menos importante, queda agradecerse a los amigos de toda la vida que siempre han estado ahí cuando he necesitado apoyo, pues estos cinco años no han sido fáciles, y estar tan lejos de casa me ha afectado en gran variedad de ocasiones. A PBP, IPN, MSL, JPF, MMJ, ATS, CLC, AGP, AAO o ASRC entre otros por estar ahí cuando más se les necesitaba.

Gracias

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Motivación del proyecto	6
1.2 Objetivos y alcance del trabajo	6
1.3 Metodología y estructura del trabajo	7
2 Estado del arte	8
2.1 Generalidades del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM)	8
2.1.1 ¿Qué es el RCM?	8
2.1.2 Antecedentes históricos	9
2.1.3 Metodología	10
2.2 Tipos de Mantenimientos.....	11
2.2.1 Mantenimiento Correctivo.....	11
2.2.2 Mantenimiento preventivo.....	12
2.2.3 Mantenimiento predictivo.....	13
2.3 Tecnologías mantenimiento predictivo	14
2.3.1 Análisis vibraciones.....	14
2.3.2 Análisis de características vibratorias o radiación sonora	19
2.3.3 Termografía	20
2.3.4 Ultrasonidos	21
2.3.5 Análisis de lubricantes	22
2.3.6 Análisis de gases de exhaustación del motor.....	22
2.4 Mantenimiento en la Armada.....	30
2.4.1 SICP	31
2.4.2 Armada 4.0	31
2.4.3 Política de mantenimiento en la Armada.....	33
3 Trabajos para la elaboración del plan de mantenimiento de las lanchas de instrucción	37
3.1 Documentos de referencia.....	37
3.1.1 Normativa sobre análisis de lubricantes	37
3.1.2 Normativa sobre análisis de gases de exhaustación	37
3.1.3 Normativas sobre intensidad acústica.....	39
3.2 Criterios de selección de equipos y de técnicas a aplicar para la caracterización de los motores.	40

3.2.1 Selección de las técnicas a aplicar	40
3.2.2 Descripción motor Caterpillar C18.....	41
3.2.3 Diagrama teórico frente a diagrama real del motor	45
3.2.4 Datos parametrizados del motor que se evaluarán de la lancha.	47
3.3 Plan de mantenimiento aportado por el fabricante.....	48
3.4 Análisis de radiación sonora con el equipo de acústica avanzada <i>Scan & Paint</i>	50
3.4.1 Introducción y equipo de mediciones acústicas.....	50
3.4.2 Conceptos de interés del Scan & Paint	52
3.4.3 Secuencia de actuación	53
3.5 Espectros. Casos prácticos de interpretación	55
3.5.1 Desequilibrio estático o dinámico	55
3.5.2 Desalineación del grupo	55
3.5.3 Motobomba desalineada	55
3.5.4 Holguras mecánicas en la bancada. Fijación bancada floja.....	56
3.5.5 Apriete bancada	56
3.5.6 Rozamiento	56
3.5.7 Rodamiento dañado	57
3.6 Análisis de los gases de exhaustación.....	58
3.6.1 Introducción y datos de fábrica.....	58
3.6.2 Generalidades de las medidas	59
4 Datos de referencia obtenidos en las mediciones de las lanchas para su empleo en plan de mantenimiento diseñado	61
4.1 Huella acústica del motor.....	61
4.1.1 Motor Babor Lancha de Instrucción A-123.....	61
4.1.2 Motor Babor Lancha de Instrucción A-124.....	68
4.2 Huella emisiones motor	71
4.2.1 Interpretación gráficas	72
5 Plan de mantenimiento	75
6 Conclusiones y líneas futuras	83
6.1 Interpretación de los resultados.....	83
6.2 Líneas futuras	84
7 Bibliografía.....	85
8 Anexo 1. Planos elementos bloque motor	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Equipos de medición. Scan &Paint en la izquierda Testo 340 en la derecha	7
Figura 2-1 Estandarización RCM. (Elaboración propia).....	10
Figura 2-2 Pasos para la implementación del MP [4]	11
Figura 2-3 Principios del análisis de vibraciones	14
Figura 2-4 Análisis vibraciones de Ademinsa.....	14
Figura 2-5 Espectro de frecuencia [6]	15
Figura 2-6 Representación de medidas de amplitud. (Elaboración propia a partir de [5])	17
Figura 2-7 Comparación análisis espectral rodamiento con distintas medidas amplitudes (Elaboración propia a partir de [5]).....	17
Figura 2-8 Representación medidas [5].....	18
Figura 2-9 Representación visual de la transformada de Fourier [7]	18
Figura 2-10 Tipos de frecuencias [5].....	19
Figura 2-11 Analogías sonido, energía y electricidad	19
Figura 2-12 Aplicación termografía [7]	20
Figura 2-13 Representación gráfica ultrasonidos mediante equipo “Sonotec Sonaphone”	21
Figura 2-14 Comportamiento de los gases de escape según factor Λ [9]	24
Figura 2-15 Representación ventilación cerrada [9]	25
Figura 2-16 Canister en un sistema de inyección electrónica Motronic de Bosch [9]	26
Figura 2-17 Esquema de la válvula EGR con y sin enfriamiento [9].....	27
Figura 2-18 Esquema sistema inyección de aire en el escape [9]	27
Figura 2-19 Procesos químicos en un catalizador de tres vías (Elaboración propia a partir de [9])	28
Figura 2-20 Esquema filtro de partículas de un motor [9]	29
Figura 2-21 Esquema de la línea de escape del motor	30
Figura 2-22 Ciclo de vida del gemelo digital [10]	32
Figura 2-23 Principios de diseño de la maqueta digital	33
Figura 2-24 Captura del sistema GALIA	34
Figura 3-1 Motor propulsión C18	40
Figura 3-2 Representación funcionamiento apertura válvulas [9]	43
Figura 3-3 Esquema sistema inyección electrónica: common rail [11]	44
Figura 3-4 Numeración de las válvulas de admisión y escape (Elaboración propia).....	45
Figura 3-5 Disposición de muñequillas y orden de encendido [11].....	46
Figura 3-6 Representación del ciclo teórico pistón. (Elaboración propia a partir de [11]).....	46
Figura 3-7 Diagrama circular ciclo del motor real frente a teórico.....	47
Figura 3-8 Variación de presión acústica y velocidad de partículas para un tono puro [22]	50
Figura 3-9 Representación sistema Scan & Paint [20]	51

Figura 3-10 Sensor ‘Microflow’n’ [20]	52
Figura 3-11 Representación del proceso de discretización espacial [21].....	53
Figura 3-12 Montaje equipo	53
Figura 3-13 Interfaz software <i>Microflow’n Vela</i>	54
Figura 3-14 Desequilibrio estático	55
Figura 3-15 Desalineación del grupo	55
Figura 3-16 Motobomba desalineada	55
Figura 3-17 Holguras mecánicas en la bancada. Fijación bancada floja (I).....	56
Figura 3-18 Apriete bancada (I)	56
Figura 3-19 Rozamiento	56
Figura 3-20 Rodamiento dañado I	57
Figura 3-21 Rodamiento dañado II.....	57
Figura 3-22 Rodamiento dañado III	57
Figura 4-1 Comparativa espectro de frecuencias (vista frontal)	61
Figura 4-2 Comparativa representación de la velocidad de partículas (vista frontal).....	63
Figura 4-3 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 20 – 40 Hz (vista frontal).....	63
Figura 4-4 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 50 – 70 Hz (vista frontal).....	64
Figura 4-5 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 100 – 300 Hz (vista frontal).....	64
Figura 4-6 Comparativa espectro de frecuencias (vista perfil)	65
Figura 4-7 Comparativa representación gráfica de la velocidad de partículas (vista perfil).....	65
Figura 4-8 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 20 – 50 Hz (vista perfil)	66
Figura 4-9 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 2700 – 3700 Hz (vista perfil)	66
Figura 4-10 Comparativa espectro de frecuencias (vista posterior).....	67
Figura 4-11 Comparativa representación gráfica de la velocidad de partículas (vista posterior)	67
Figura 4-12 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 50 – 70 Hz (vista posterior)	67
Figura 4-13 Espectro de frecuencia y gráfica velocidad partículas A-124 (vista frontal).....	68
Figura 4-14 Grid de puntos y gráfica velocidad partículas 25 – 40 Hz A-124 (vista frontal)	68
Figura 4-15 Representación velocidad partículas 50 – 70 y 70 - 110 Hz A-124 (vista frontal)	69
Figura 4-16 Espectro de frecuencia y gráfica velocidad partículas A-124 (vista perfil).....	69
Figura 4-17 Gráfica velocidad partículas 20 – 40 y 80 - 110 Hz A-124 (vista perfil)	69
Figura 4-18 Espectro de frecuencia y gráfica velocidad partículas A-124 (vista posterior)	70
Figura 4-19 Gráfica velocidad partículas 50 – 70 y 110 - 220 Hz A-124 (vista posterior).....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Organización mantenimiento [2]	9
Tabla 2-2 Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo [5]	12
Tabla 2-3 Relación elementos químicos—elementos de un motor (Elaboración propia).....	22
Tabla 3-1 Especificaciones gasóleo mar e+	38
Tabla 3-2 Tipos maquinas rotativas ISO 2372	39
Tabla 3-3 Cuadro características del motor [9]	41
Tabla 3-4 Descripción general del motor <i>Caterpillar</i> C18	45
Tabla 3-5 Parámetros del motor C-18	47
Tabla 3-6 Recomendaciones del fabricante.....	49
Tabla 3-7 Datos de potencia-par-consumo de combustible [14].....	58
Tabla 3-8 Emisiones (valores nominales) [14].....	58
Tabla 3-9 Emisiones (valores garantizados) [14].....	58
Tabla 3-10 Gráfica motor del Audi RS4	59
Tabla 3-11 Características <i>Testo 340</i>	60
Tabla 4-1 Tabla emisiones motor babor A-123.....	71
Tabla 4-2 Comparación gases de emisión	72
Tabla 4-3 Comparación gases de emisión	73
Tabla 4-4 Comparación gases de emisión	73
Tabla 5-1 Plan mantenimiento original cámaras de máquinas de las lanchas de instrucción	76
Tabla 5-2 Plan de mantenimiento propuesto para el motor C18 de las lanchas de instrucción	81

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación del proyecto

Este proyecto surge de la necesidad de introducir novedosos conceptos de organización industrial como pueden ser el RCM, el Kaizen, TPM, etc., filosofías que pueden mejorar notablemente el ciclo de vida de un producto.

En este caso, se ha elegido elaborar un plan de mantenimiento debido a la falta de datos y procedimientos, con el fin de que sirva de apoyo a futuros oficiales, y de manera que se pueda extrapolar, intuitivamente, a un equipo similar o sistema perteneciente a un buque de la Armada. Igualmente, se ha profundizado en diversos temas de desarrollo complejo como es el amplio mundo de las vibraciones, de los ruidos y de los espectros de frecuencia; y se ha tenido la oportunidad de experimentar con equipos y maquinaria de última tecnología, como puede ser el sensor de gases *Testo 340*.

Además, se sobrentiende que este trabajo puede ser de gran utilidad para el departamento de mantenimiento de la Escuela Naval, ya que nunca se habían hecho trabajos de este tipo en las lanchas de instrucción. Además, dado que es la plataforma con la que todos los alumnos de la Escuela Naval se adiestran, es bueno tener datos y conclusiones, que, sin las herramientas cedidas por el Centro Universitario de la Defensa, jamás se habrían extraído.

1.2 Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo del presente documento es el estudio de la filosofía RCM (mantenimiento centrado en la fiabilidad) y su posterior aplicación en la elaboración de un plan de mantenimiento de un equipo o sistema, mediante la implementación de tecnologías de diagnóstico. Para ello, se estudiará una amplia documentación con la cual se pretende clarificar el concepto de RCM: qué es el mantenimiento basado en la fiabilidad, qué comprende, qué se planea modificar y cómo se va a ejecutar dicha filosofía. Además, se pretende hacer un trabajo de investigación sobre las técnicas de mantenimiento con una específica proyección de mejora para las lanchas de instrucción, las cuales serán la plataforma donde se establecerán y se realizarán estos mantenimientos junto a los establecidos anteriormente.

Definimos como alcance del trabajo la elaboración final del plan de mantenimiento del equipo seleccionado, con la aprobación de los profesionales del núcleo de lanchas. Este mantenimiento deberá contener la guía de mantenimiento recomendado por el fabricante al igual que la adición de los análisis y mediciones que se hayan tomado durante el periodo de tiempo que ha llevado el trabajo. El desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado incluye el estudio de las técnicas anteriores, así como una búsqueda de información en fuentes avaladas y la memoria de este proyecto, realizada con ayuda de

documentos Excel (no adjuntos) para el desarrollo de los cálculos y la tabulación de los datos obtenidos a lo largo de este trabajo de investigación.

Aparte del material y de los programas habituales en un trabajo de estas dimensiones, se usará todo tipo de equipos disponibles del Centro Universitario de la Defensa y las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval, tanto para su estudio como su utilización para posibles pruebas de mediciones. Entre los equipos a utilizar destacan el equipo sonoro adquirido recientemente por el Centro Universitario denominado *Scan Paint* y el analizador de productos de combustión *Testo 340*.



Figura 1-1 Equipos de medición. Scan &Paint en la izquierda Testo 340 en la derecha

1.3 Metodología y estructura del trabajo

La metodología a seguir será la explicada en la normativa RCM, en el que se aplicarán varios sistemas de mediciones para futuras conclusiones. El trabajo se ha decidido estructurar en cinco capítulos de la siguiente manera:

- i. Un estado del arte del concepto RCM a día de hoy, dividido en cuatro subapartados en el que se expliquen origen y antecedentes, los tipos de mantenimientos de los que se compone la filosofía RCM, como son el correctivo, preventivo y el predictivo. Dado que el mantenimiento predictivo es el más denso, se ha decidido capitular y explicar más detenidamente cada una de las tecnologías predominantes del sistema, como son las vibraciones, la termografía, el análisis de lubricantes y el análisis de gases de exhaustación. Como último subapartado, una breve mención a cómo se organiza el mantenimiento en la Armada.
- ii. El desarrollo del plan de mantenimiento, en el que se explica qué es lo que se ha hecho para elaborarlo. Esto se completa con una descripción del equipo a elegir, el motivo, cómo se quiere afrontar, y la realización de pruebas con los datos que se han obtenido.
- iii. Un plan de mantenimiento realizado a partir de los resultados obtenidos de las mediciones in situ. Este plan, de elaboración propia, pretende mejorar el mantenimiento RCM llevado a cabo en la Armada hasta la fecha.
- iv. Unas breves conclusiones que se pueden sacar en claro sobre qué elementos pueden fallar o tienen más tendencia a averiarse. También se exponen varias líneas futuras sobre el trabajo, puesto que tiene gran proyección en el ámbito de la Escuela Naval.
- v. Dejar constancia de la bibliografía seguida, haciéndose referencia continua a las fuentes de información que se han consultado a lo largo de todo el proyecto.
- vi. Anexos interesantes para la revisión del trabajo y para las líneas futuras del tema cubierto por el presente Trabajo de Fin de Grado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM)

2.1.1 ¿Qué es el RCM?

El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM o MCC) es la filosofía por excelencia que rige los planes de mantenimiento de los equipos y sistemas. Es un método en el que se busca sacar la máxima fiabilidad de los equipos mantenidos, es decir, que sigan rindiendo, manteniendo la funcionalidad operativa durante el mayor tiempo posible, pero no al máximo, y asumiendo que la fiabilidad de un equipo es inherente al diseño y a la calidad de construcción. No hay que entender este término como un proceso similar aplicado en los equipos para un mantenimiento óptimo, si no como una filosofía que proporciona los criterios para desarrollar este proceso RCM, pues cada equipo es diferente y no da los mismos servicios que el resto. De misma manera, no hay que creer que un mayor mantenimiento ofrece más fiabilidad, pues el mantenimiento también induce errores y hay que hacerlo solamente cuando sea estrictamente necesario. Es de un uso tan extendido que se usa en la mayoría de los ámbitos de trabajo, como en el aéreo, naval, militar, nuclear y la mayoría de las industrias.

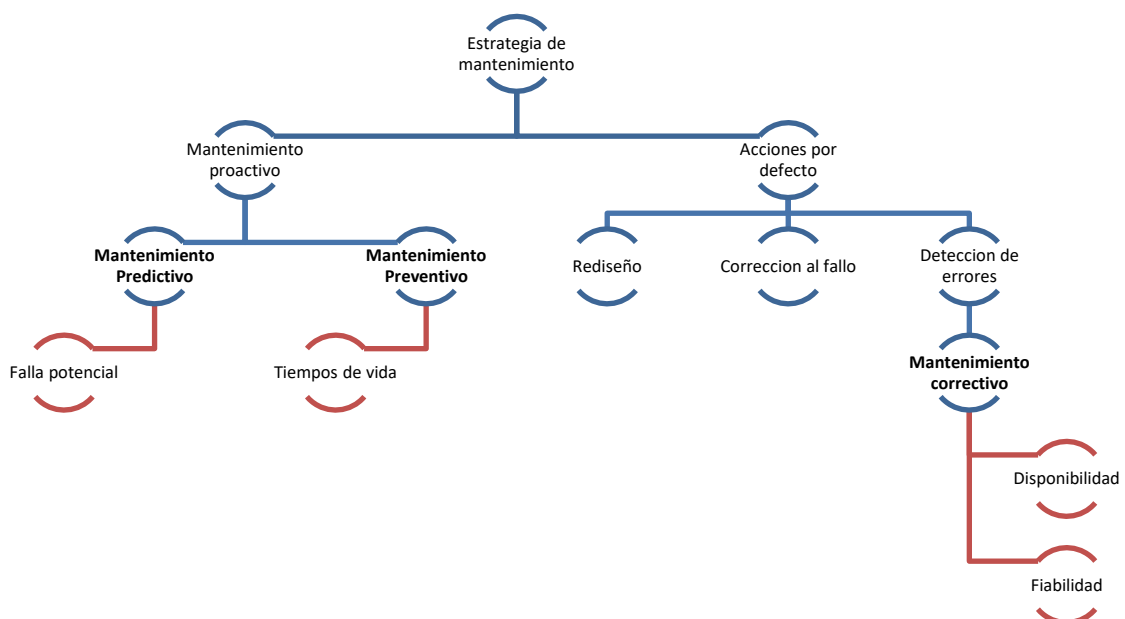


Tabla 2-1 Organización mantenimiento [2]

Principalmente se basa en el análisis de fallos, tanto de los como que se han producido como de los que se están intentando evitar mediante medidas preventivas. El RCM tiene como resultado la planificación del mantenimiento correctivo preventivo o predictivo, y elegir la más adecuada para cada equipo; si se hiciera incorrectamente, véase mala práctica del mantenimiento o una elección inadecuada, el RCM no puede proporcionar lo que se busca. En el anterior esquema se puede observar de manera intuitiva como clasificar los ya mencionados métodos de mantenimientos [1]

2.1.2 Antecedentes históricos

Es bien sabido que el RCM se aplica hoy en día en la mayoría de los mantenimientos que se llevan a cabo, de cualquier ámbito como el naval, el mecánico, el eléctrico, electrónico, espacial, etc. Sin embargo, es la aviación comercial a la que se le atribuye su origen, pues este remedio surgió de la necesidad de disminuir la gran cantidad de accidentes aéreos que había a finales de 1950, aproximadamente más de 60 por millón de despegues. Esa tasa de accidentes hoy en día podría ser incluso dos accidentes aéreos diarios. De igual manera, también se ha podido contabilizar las causas, asumiendo dos tercios del total a las fallas en los equipos.

Esto nos lleva a cuestionar el porqué de estos fallos en los equipos, y como evitarlos. Este problema deriva de la antigua filosofía de mantenimiento, en la cual se creía que, haciendo reparaciones periódicas antes de que las piezas se estropearan, se podría prevenir las fallas. Cuando esto no se conseguía, se asumía que el problema residía en que había demasiado tiempo entre reparaciones, y, por lo tanto, se acortaban con la intención de solucionarlo. Sin embargo, realmente esto no hace que disminuya, sino que mantiene o incrementa las fallas en los equipos. ¿Por qué? Era como sumar peras con manzanas, simplemente eran conceptos independientes uno del otro. Este razonamiento acabo dando lugar a la invención del RCM.

El movimiento RCM surgió durante 1960 y 1970, con el fin de obtener mejores resultados mediante el uso de protocolos adecuados para la mejora operativa de funciones y el modo de actuar con los efectos producidos por las fallas, pero no fue hasta 1978 que se publicó el documento que oficializaba el RCM, “Reliability centered maintenance”. Este documento fue la inspiración para el MSG 3: “Documento para la planeación de Programas de Mantenimiento para Fabricantes – Aerolíneas”, modelo actual en el que se basa la empresa americana BOEING y AIRBUS para la realización de sus mantenimientos prioritarios. También fue el origen de varios modelos RCM de tipo militar o ámbitos distintos a la aviación.

Debido al éxito del RCM, al Armada estadounidense desarrolló dos procesos RCM distintos, una para las agrupaciones navales y otro para la fuerza naval aérea, ya que al ser tan distintos no podrían compartir la misma metodología, al igual que la Armada Británica que desarrollo el NES 45 “Normas para la Ingeniería Naval Orientada a RCM”. Aun así, estos nuevos planes de mantenimiento estaban sobredimensionados, y los nuevos estudios apuntaban a mejorarlos económicamente, sin reducir la fiabilidad y la seguridad, denominándose entonces PMO (Optimización del Mantenimiento Planificado).

Debido a la gran cantidad de modelos RCM ofrecidos durante este periodo de tiempo, se estandariza el RCM en un único documento. De este modo surge una primera norma SAE (*Society of Automotive Engineers*) en la que se intenta reconocer en un documento todo el proceso RCM, pero la retroalimentación de las empresas que hacían uso de este documento la norma SAE, indicaban lo poco útil y mal orientado que estaba la norma y se tuvo que reescribir de otra manera en el cual se especifican los criterios de evaluación para un adecuado proceso RCM. Solo así, si el usuario satisface estos criterios, puede denominar su modelo de mantenimiento como un auténtico modelo RCM. Esta estandarización es necesaria, pues las empresas desarrollaron procesos RCM no válidos para el

objetivo que se buscaba con esta filosofía. Desde el origen del SAE RCM, estos criterios propuestos se han mantenido hasta la actualidad y no buscan otra cosa que seguir proporcionando la máxima fiabilidad de los equipos [3].

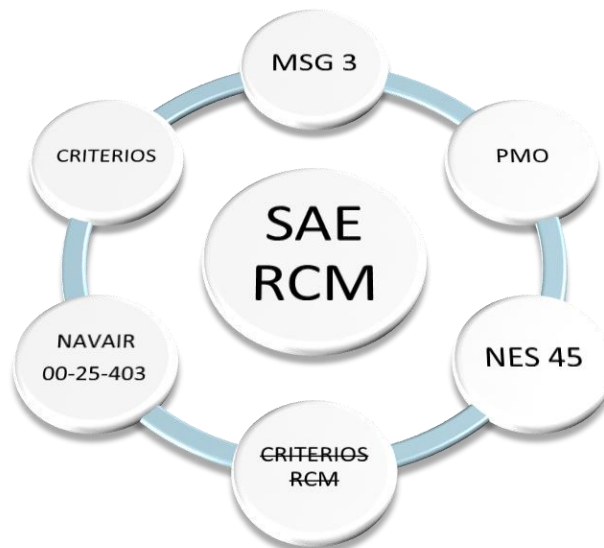


Figura 2-1 Estandarización RCM. (Elaboración propia)

2.1.3 Metodología

La metodología de RCM contempla tanto el estudio del equipo en investigación como la de los sistemas que lo complementan, y el entorno que lo rodea. Por ejemplo, para la aplicación de esta metodología en motores de combustión se siguió una secuencia de actuación interna no extrapolable a otros equipos, pues en el análisis realizado se indica qué tipo de mantenimiento (dejar ocurrir un fallo y hacer mantenimiento correctivo, evitar que ocurran estas fallas mediante mantenimiento predictivo, etc.) hay que hacer, como mejor solución.

- i. Preservación de las funciones operacionales del sistema
- ii. Análisis de técnicas de modos de falla, que puedan incumplir el funcionamiento operativo del sistema en cuestión.
- iii. Aplicación de la técnica de Análisis de los Modos de Falla y Efectos (AMEF) y del árbol lógico de decisiones.
- iv. Identificación problemas que impiden el máximo rendimiento de los motores y sus derivaciones en el funcionamiento:
 - a. Definición nodos
 - b. Definición causas
- v. Implementar metodología RCM para incrementar la vida útil mediante
 - a. Definición de los tipos de intervenciones más eficaces
 - b. Selección de acciones para la disminución de fallas y sus consecuencias

Esta secuencia es un ejemplo tomado de las embarcaciones pesqueras de la serie “Intrépido” [1].

2.2 Tipos de Mantenimientos

Recapitulando lo anterior, podemos concluir que la filosofía RCM dicta que por cada equipo corresponde un tipo de mantenimiento, que dependiendo de la confiabilidad que queramos del equipo, es decir, permanecer un mayor periodo de tiempo proporcionando las funciones que se esperan del mismo, se aplique el tipo de mantenimiento que mejor se adapte a el objetivo. A continuación, nombraremos los mantenimientos con los que trabajamos.



Figura 2-2 Pasos para la implementación del MP [4]

2.2.1 Mantenimiento Correctivo

Es el mantenimiento primitivo que se ha llevado a cabo desde el principio, reconocido por la mayoría en el acto de cambiar la bombilla cuando se funde. Consiste en no intervenir en la máquina hasta que ocurra el fallo. Es el plan de mantenimiento más económico, pues no tiene ese gasto en tiempo de mantenimiento por parte del personal, y reduce los costes de inspecciones y reparaciones.

Sin embargo, este mantenimiento no se puede aplicar a cualquier equipo. Predominan los equipos simples, cuyas sustituciones no acarreen esfuerzos económicos mayores al que supondría otro mantenimiento, y no afecten a la criticidad del equipo, es decir, que no esté integrado en un equipo mayor al que si afecte en grandes medidas sus fallos. Podemos clasificarlos en dos mantenimientos: los programados, en los que se inmoviliza la máquina en un momento a posteriori del fallo porque la función del sistema aun es aceptable; o no programado, cuando la reparación es obligatoria para tener el sistema en condiciones normales de operación.

Este mantenimiento presenta varias desventajas, como la incertidumbre de la falla o avería en el tiempo, que pueden ser muy inoportunas y no da lugar a una reacción rápida si es necesario, dado que no son averías programadas con su plan de mantenimiento conveniente (en caso de que se produzca el fallo). Otra desventaja que presenta es la que ha llevado a cabo la evolución de este método; que se repare la avería no significa que se haya arreglado el problema, pues suele estar subyacente, al igual que la antigua y equivocada creencia de que más reparaciones conlleva mayor fiabilidad. Si el problema persiste y no se soluciona, puede repetirse continuamente, acortando los periodos de reparación.

2.2.2 Mantenimiento preventivo

Este mantenimiento, añadido al correctivo, trata de prevenir los posibles fallos de la máquina mediante la sustitución de piezas y/o equipos (depende de la integración funcional de cada uno). Entre otros, cabe destacar:

- i. Mantenimiento de tiempo fijo: es al que más se recurre en líneas generales. Consiste en programación y presupuestado, pues estas inspecciones se revisan según un parámetro de tiempo, horas de funcionamiento, ciclos de una función específica (como los disparos de cañón), u otras medidas de tiempo. Que la pieza no haya ofrecido signos de empeoramiento o disfuncionalidad no es motivo para no realizar el cambio. Por ejemplo: cambiar el aceite del motor del coche cada 15000km.
- ii. Mantenimiento “On-Condition”: se basa en el fallo potencial de una pieza, fallos que no pueden ser prevenidos pero que pueden ser alargados en el tiempo si se realizan medidas con la suficiente antelación para evitar el fallo. Así se establece una norma por pieza, y cuando los sistemas exceden los criterios establecidos en la norma, se lleva a cabo la acción correctiva, para asegurar un óptimo funcionamiento. Por ejemplo: si el filtro del aceite supera los límites impuestos de presión de 68Kpa es indicador de la necesidad de limpiarlo.
- iii. Mantenimiento búsqueda de fallos: se basan en que los fallos siempre son derivados de problemas ocultos, y que deben ser detectados por una acción de mantenimiento. Se basan en el tiempo, pero se diferencia del mantenimiento a tiempo fijo en que, en vez de retardar los fallos funcionales, buscan los fallos funcionales. Se aplica normalmente a equipos de reserva o de emergencia. Por ejemplo, en las pruebas operativas del diésel-generator.

A continuación, una tabla donde se observan ventajas y desventajas de este mantenimiento.

Ventajas	Desventajas
Costo reducido con relación al Mant. correctivo	Personal especializado
Reducción riesgos por fallos en los equipos	Incertidumbre del desgaste de las piezas
Reducción riesgos de lesiones para los operarios	Empresa rige las labores de mantenimiento
Mejora vida útil de los equipos	Desaprovechamiento de las piezas
Mejora fiabilidad de los equipos	Solo se arreglan errores derivados

Tabla 2-2 Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo [5]

Es uno de los mantenimientos mas comunes en buques de la Armada debido, a su fácil implementación y a la rápida respuesta que se obtiene por parte de los equipos, pues, mejoran notablemente y con poco esfuerzo su ciclo operativo. Para la realización del mismo, se utilizan hoja de comprobaciones en las que se facilitan las medidas a tomar, la periodicidad con la que realizar estas medidas, y datos de sensores en los que, aunque no se interpreten, son indicativo de que el sistema no está operando correctamente en el caso de que se encuentre lejos de los datos de referencia que se hayas impuesto. Por ejemplo, se consideran acciones de mantenimiento preventivo todas aquellas destinadas a cambios de aceite, filtros, bombas u otros elementos del motor, recogida de datos e inspecciones visuales cada ciertos periodos de tiempo. No obstante, la Armada necesita un mantenimiento mas exhaustivo, pues, el equipo que posee es de alta capacidad y calidad, no pudiéndose permitir desperdiciar un sistema o equipo debido a la falta de mantenimiento.

2.2.3 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo, basado en la condición en los síntomas es la estrategia en la que, mediante acciones sobre los equipos, tratamos de recopilar toda la información posible (datos, gráficas, porcentajes, etc.) para un procesamiento a posteriori. Con estos análisis se intenta averiguar la tendencia a la que divergen los equipos, sin tener que manipular e investigar visualmente. Se puede considerar como un mantenimiento preventivo muy mejorado, basándose en la idea de que, de alguna manera, el equipo dará algunas señales como síntomas previos al fallo como alerta temprana. Estas señales pueden ser vibratorias, eléctricas, de temperatura, presencia de partículas de desgaste, y pueden ser medidas, ser analizadas sus tendencias y se pueden asociar a fallos en concreto.

Podemos concluir como objetivo de este mantenimiento la eliminación de fallos no programados del equipo mediante el procesamiento de los datos obtenidos suministrados mediante los sensores para la detección de errores y la programación de acciones a tiempo fijo basadas en la condición y búsqueda de fallos. Además, como dato estadístico obtenido de [5], ciertos estudios han mostrado que el mantenimiento predictivo puede reducir los costes globales de mantenimiento en cerca de un 30%, aumentar la disponibilidad del equipo de un 2-40 %, aumentar la seguridad, y reducir el consumo de energía en cerca de un 10%.

Las tecnologías que se usan para aplicar este mantenimiento son:

- Análisis vibraciones
- Análisis de características vibratorias o radiación sonora
- Ferrografía.
- Análisis de lubricantes.
- Análisis de gases de exhaustación del motor
- Ultrasonidos. Detección de fugas por ultrasonidos.
- Análisis circuitos eléctricos en motores.
- Técnicas de alineación láser.
- Otros.

El uso de las tecnologías es función de los tipos de fallos de cada máquina, y no se pueden usar todas las tecnologías por igual pues cada uno tiene una implementación propia, aunque si existe un patrón común a seguir para una correcta monitorización que consiste en:

- i. Vigilancia constante mediante mediciones para detectar el problema.
- ii. Protección mediante análisis de la señal.
- iii. Diagnóstico para ese problema específico.
- iv. Pronóstico para el próximo error del equipo.

Por lo general, al monitorizar, se entiende también la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos.

2.3 Tecnologías mantenimiento predictivo

2.3.1 Análisis vibraciones

Actualmente es la tecnología más utilizada actualmente, tanto como para supervisión y para diagnóstico de sistemas rotativos, e incluso permite el diagnóstico en máquinas eléctricas. En términos generales, basamos esta tecnología en el estudio de las vibraciones inherentes al comportamiento de un sistema, que es similar al concepto de desplazamiento respecto a su posición de equilibrio.

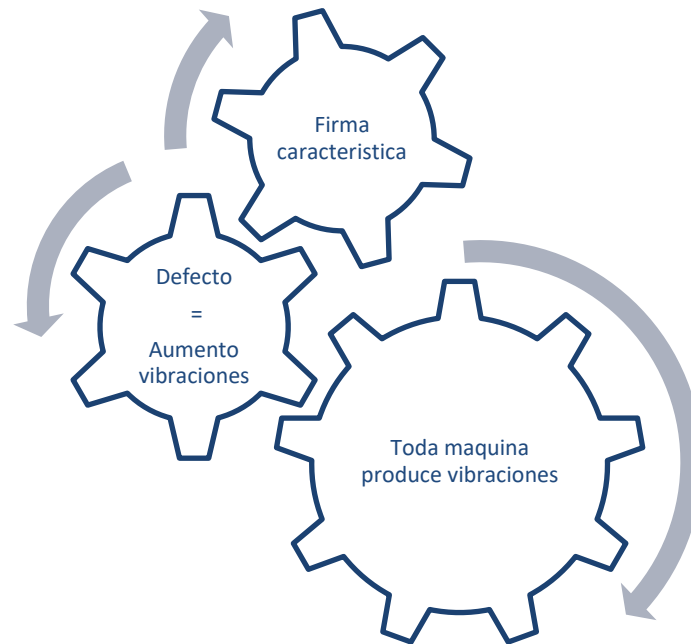


Figura 2-3 Principios del análisis de vibraciones

Para poder efectuar este mantenimiento se parte de la suposición de que todas las máquinas producen vibraciones que se deben a holguras de fábrica, desequilibrios o desajustes, sin importar como de bien ajustado pueda estar la máquina. En caso de que se produzcan defectos, estos siempre incurren en un aumento de vibraciones, que generan un cambio en las vibraciones que se identifican como espectros o Firma característica que permite identificar los errores. Podemos resumirlo en la anterior Figura 2-3 Principios del análisis de vibraciones.

:



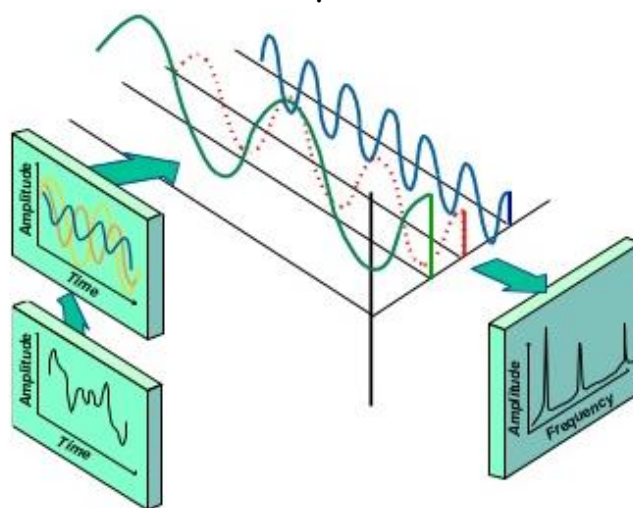
Figura 2-4 Análisis vibraciones de Ademinsa

Las etapas que sigue el análisis de vibraciones serían las mencionadas anteriormente en

Mantenimiento predictivo:

- i. Mediciones de las vibraciones mediante señales eléctricas producidas por un acelerómetro, que tiene que ser preciso en su funcionamiento y su lugar de montaje.
- ii. Protección mediante la asignación de los niveles de alarma y fallo, parametrizando las bandas de frecuencia de interés en función de las frecuencias de los posibles fallos de la máquina, para poner los límites del nivel de alarma.
- iii. Procesamiento de la señal, mediante Fourier para descomponer la señal principal compleja en señales armónicas simples de distintas frecuencias, representando un espectro de frecuencia con datos de frecuencia / amplitud (véase Figura 2-5 Espectro de frecuencia).
- iv. Diagnóstico mediante una comparación del espectro obtenido respecto a la Firma característica de cada avería. Para asegurar un buen diagnóstico, debemos tener un pleno conocimiento de la máquina en referencia a velocidad, carga, número de etapas, frecuencias de trabajo, bolas de rodamientos, etc.

Para llevar a cabo estos análisis, hacemos uso de sensores de vibración monoaxiales, biaxiales o triaxiales, uno para cada eje del movimiento, o en su defecto, un software diseñado para ello. Entre los sensores más comunes que podemos encontrar en el mercado, destacan los acelerómetros, los captadores de velocidad y desplazamiento. Pueden traer distintas configuraciones, como análisis de datos en tiempo real, adaptables a condiciones atmosféricas adversas, compatibilidad con distintos softwares.



Introduction to Portable Vibration Analysis • Emerson Confidential • 5/10/2015 • Slide 15

EMERSON
Process Management

Figura 2-5 Espectro de frecuencia [6]

Este método se ha usado tanto como para la industria naval como para la marina, con buenos resultados en ambos casos [5], detectando fallos tales como desalineaciones, desequilibrios, rozamientos, holguras, resonancias o problemas eléctricos.

Actualmente, la Escuela Naval se cuenta con el *Scan Paint 2D*, equipo de acústica avanzada provisto de un captador de velocidad de partículas y de una cámara, que representa sobre una superficie captada con la cámara una representación de la velocidad de partículas y presión sonora que puede graficar los espectrogramas de velocidad de partícula consiguiendo resultados similares.

2.3.1.1 Análisis espectral. Frecuencia, periodo y amplitud

El análisis de vibraciones no es algo sencillo, y para una mejor comprensión de este concepto, se va a explicar en qué consiste, que datos se parametrizan y algunos ejemplos a seguir [5].

La frecuencia es el número de veces que se repite un acontecimiento por unidad de tiempo. En las vibraciones se puede definir como el número de ciclos que ocurren por unidad de tiempo y, si especificamos más, en el análisis de vibraciones de un motor rotativo, esa frecuencia es el número de veces que se da esa vibración en concreto, pudiendo asociar frecuencias determinadas a distintos elementos de un motor, o incluso a distintos problemas asociados a esas vibraciones como puede ser un desalineamiento, una holgura, un defecto en los rodamientos, etc. Pero no es tan sencillo, porque la vibración que se registra en un motor es la combinación de todas las vibraciones y haría falta algo más para poder asociarlas con errores. La frecuencia es exactamente la inversa del periodo y en el análisis se representa en el eje de abscisas.

El periodo es el tiempo que se tarda en realizarse un ciclo de dicho acontecimiento. Se representa mediante la letra T y se mide en unidades de tiempo, sobre una figura se representa como la distancia en tiempo de cresta a cresta en una onda armónica simple.

La amplitud se corresponde con la intensidad de la onda de vibración, y es indicativa de la severidad de la misma. Es junto a la frecuencia uno de los parámetros más importantes de análisis y se puede medir de varias maneras:

- Desplazamiento (micras): es la magnitud más adecuada para bajas frecuencias (por debajo de 10 Hz), pues es difícil medir la amplitud en otras magnitudes. Se suele medir de pico a pico (micras P-P) Viene dada por la siguiente expresión analítica, donde 'X' es el desplazamiento real, la 'x' el desplazamiento total de la onda, 'w' la velocidad angular y 't' el tiempo de medición:

$$X = x \times \sin(w \times t)$$

- Velocidad (mm/s): es la magnitud más adecuada para las vibraciones con rango medio de frecuencia (de 10 Hz a 1000 Hz) que es donde se suelen encontrar la mayoría de los problemas mecánicos, y se representa mediante la siguiente función:

$$V = \frac{dx}{dt} = Wx \times \cos(Wt + \frac{\pi}{2})$$

- Aceleración (m/s² o G's): basan esta medida en la aceleración de la amplitud. Se utiliza exclusivamente para análisis con frecuencias muy altas (rango de KHz) dado que, para frecuencias menores, la aceleración es muy pequeña y no es digno de representación en una gráfica.

$$a = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = W^2 \times X \sin Wt = W^2 \times X \sin(wt + \pi)$$

Igualmente hay que observar cómo estamos representando estos datos, pues se puede sobrentender que es el valor de pico, de pico a pico, RMS o valor promedio (AVG), tal y como se muestra en la siguiente figura:

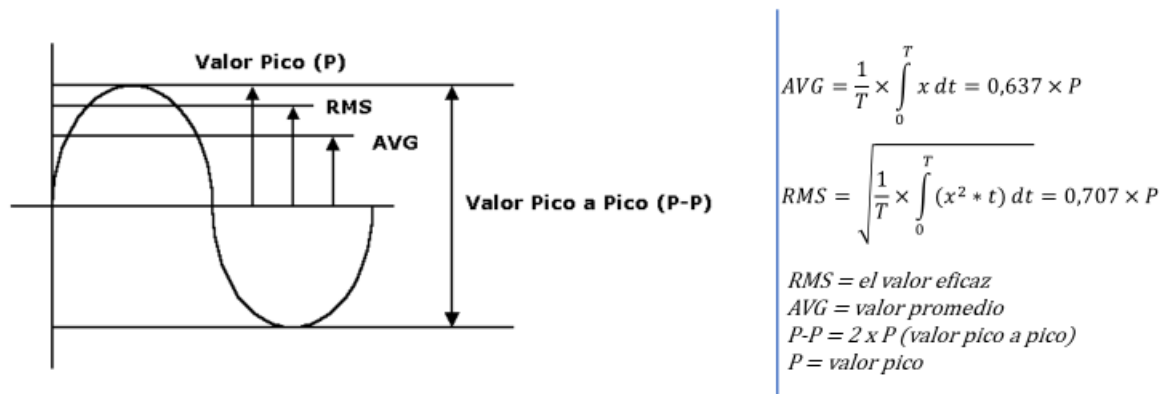


Figura 2-6 Representación de medidas de amplitud. (Elaboración propia a partir de [5])

2.3.1.2 Fuerza centrífuga

La fuerza que provoca una masa en un motor de rotación se define mediante la siguiente fórmula:

$$F_{cf} = m \times r \times w^2$$

Donde 'm' es la masa del elemento, la 'r' es la distancia del centro de gravedad al centro de rotación y 'w' es la velocidad de rotación o la velocidad angular ($2 \times \pi \times f$).

Evidentemente, este parámetro cobra importancia en los problemas de desequilibrios, que se deben a una fuerza centrífuga descompensada en el rotor. Representan los problemas más acusados en los motores rotativos, justo al desgaste de las piezas. El aumento o incorporación de la masa o el aumento en dos de la distancia en el sistema afecta incrementando la fuerza de dicha masa en el doble; sin embargo, el aumento de las revoluciones multiplica por cuatro la fuerza ejercida sobre el sistema, por lo que, dado que el motor en estudio aumenta mucho las revoluciones durante el trabajo, puede acrecentar mucho un error que no se nota en mínimas revoluciones y sí acentuarse al subir las revoluciones.

2.3.1.3 Comportamiento frecuencial de aceleración, velocidad y desplazamiento

Como se ha mencionado anteriormente, según el tipo de máquina, usaremos desplazamiento, velocidad o aceleración para expresar la amplitud, y puede ser un problema que usemos una magnitud distinta para la detección de problemas. Como podemos ver en los siguientes ejemplos [5]:

- El desgaste de un rodamiento en un análisis espectral, medido en micras a la izquierda y en G's a la derecha

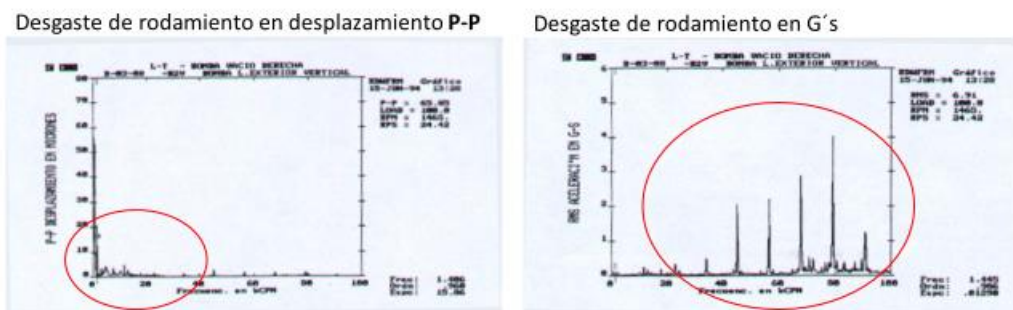


Figura 2-7 Comparación análisis espectral rodamiento con distintas medidas amplitudes (Elaboración propia a partir de [5])

- En el siguiente gráfico se observa el comportamiento de los análisis espectrales según como se mida la amplitud.

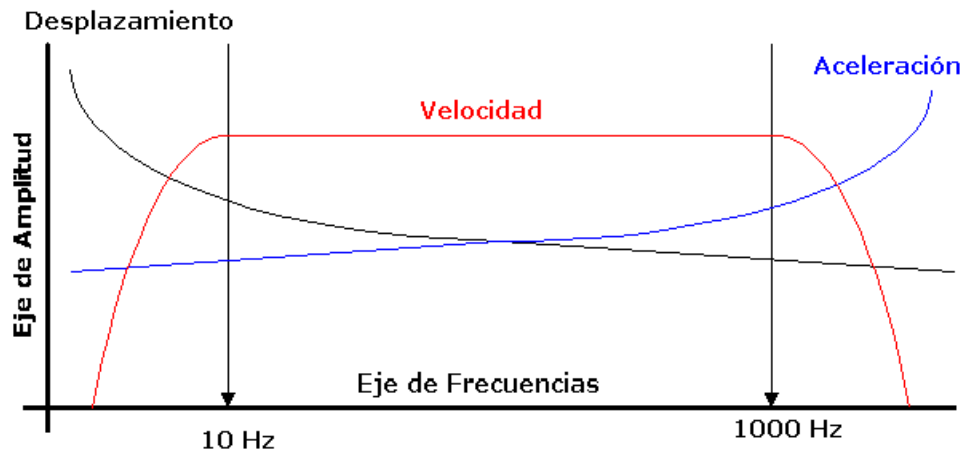


Figura 2-8 Representación medidas [5]

Como vemos, la velocidad abarca el espectro donde ocurre la mayoría de los problemas mecánicos, y es por ello por lo que la normativa ISO utiliza esta magnitud.

2.3.1.4 Transformada de Fourier

Es cierto que cuando analizamos estos parámetros estamos tomando como muestra de representación una frecuencia muy determinada. Sin embargo, resulta que lo real no es tan ideal, los parámetros que podemos obtener de frecuencia a lo largo del tiempo son resultado de las interferencias entre todas las ondas que pueda haber con frecuencias distintas. No obstante, es posible a partir de esta gráfica en el tiempo, sacar una función con dominio de la frecuencia. Para ello se usará la transformada de Fourier.

La transformada de Fourier procesa una onda compleja, formada por una componente principal de frecuencia, las armónicas de esta frecuencia y una cantidad grande de frecuencias de menor amplitud, expresadas en función del tiempo, a una gráfica en función de frecuencias, en las que ha dividido esta onda compleja en todas las frecuencias que la forma. Véase en el siguiente ejemplo:

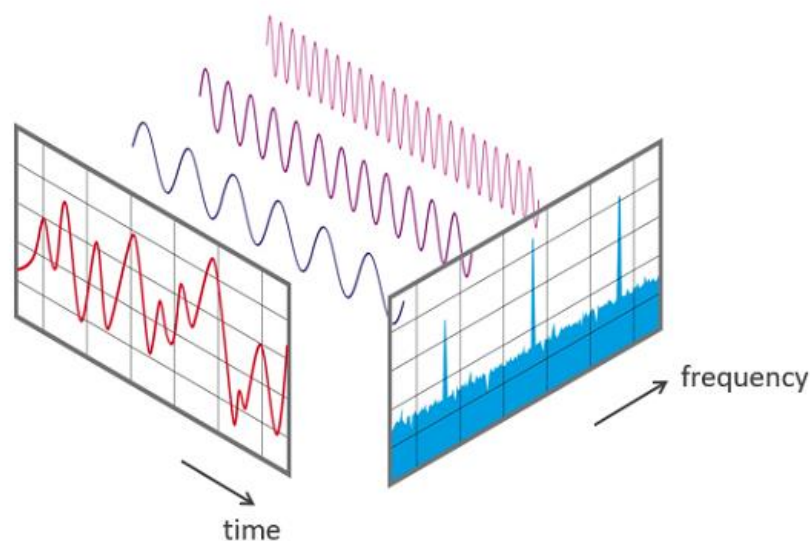


Figura 2-9 Representación visual de la transformada de Fourier [7]

En términos de motor, para hallar posibles frecuencias de fallos, distinguiremos entre varias frecuencias:

- La frecuencia “Uno por o 1x”: las frecuencias que se tomaran como referencia, que corresponde al régimen de revoluciones del rotor de la máquina (RPM/60 Hz). Esta línea espectral generará frecuencias múltiples exactas, denominadas armónicos. En un motor es posible llegar hasta armónicos de cuarto grado.
- Bandas laterales: son frecuencias transportadas por otras frecuencias. Si se producen por modulación de amplitud, se denominarán modulaciones

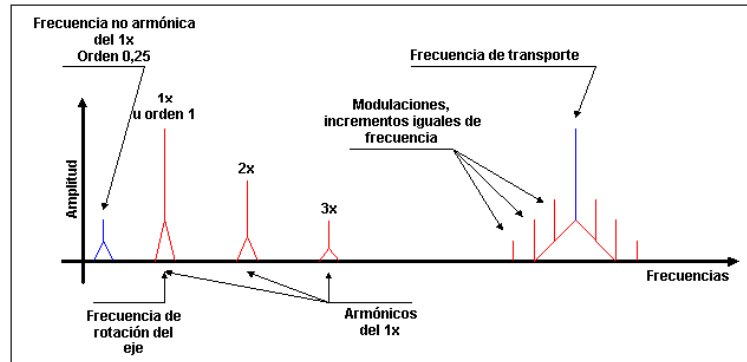


Figura 2-10 Tipos de frecuencias [5]

2.3.2 Análisis de características vibratorias o radiación sonora

Esta análisis, muy similar al análisis de vibraciones, es un método de análisis predictivo que esta por desarrollarse, pues los equipos de acústica necesarios son muy avanzados y complejos. Es la tecnología que se va a implementar en el desarrollo del trabajo (Análisis de radiación sonora con el equipo de acústica avanzada Scan & Paint).

En líneas generales, pues se desarrollará más adelante, esta tecnología combina simultáneamente la medición de presión sonora y velocidad de partículas, con el objetivo de representar el sonido gráficamente para localizar focos sonoros. Sucede que, al igual que se detectan las señales acústicas a través de un sensor y la presión a través del micrófono incorporado en el sensor, es capaz de distribuir todos estos datos a partir de un área mediante un algoritmo y de procesar las variaciones del espectro en el espacio. Dado que los datos se obtienen de manera asíncrona, es decir, diferidos en el tiempo y espacio, es necesario representarlos en el dominio de frecuencia mediante la utilización de la densidad espectral de potencia y los filtros de pasa banda, de manera que obtenemos un espectro de frecuencias de velocidad de partículas posible de analizar y análogo al obtenido en el análisis de vibraciones [8].

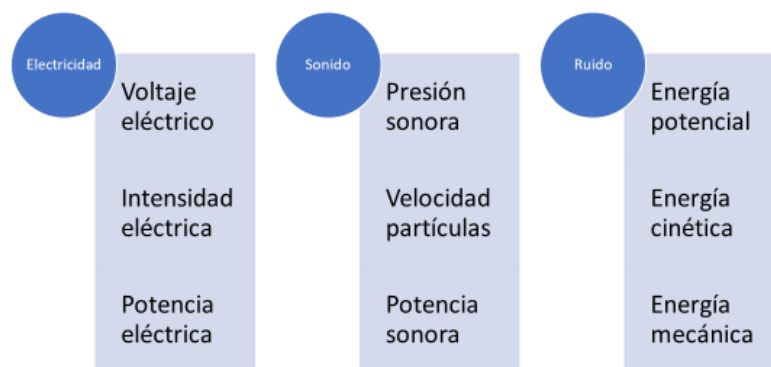


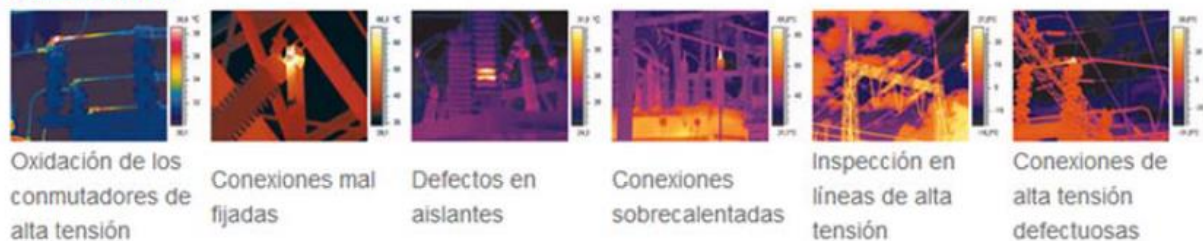
Figura 2-11 Analogías sonido, energía y electricidad

2.3.3 Termografía

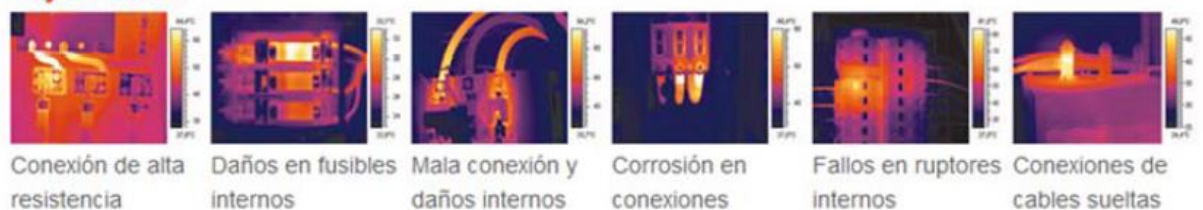
Es la tecnología que estudia el comportamiento de la temperatura de los sistemas para determinar el buen funcionamiento de éste. Tiene la ventaja de poder adquirir datos de temperatura a una distancia sin contacto del sistema, de analizar grandes áreas de sistema en un corto periodo de tiempo, es de gran ayuda para extinción de incendios, no necesita personal especializado para la adquisición de datos y se basan en la explotación del espectro infrarrojo, con el cual se localizan fuentes de calor y zonas de calor no normales, los cuales junto a variaciones de temperatura anormales pueden ser síntomas de fallos electromecánicos del sistema. Como desventajas, predominan el gasto del material, si se necesita personal experto para los pronósticos y no es capaz de detectar temperaturas en zonas interiores cubiertas con materiales no “transparentes al IR”.

Se utilizará este sistema con el fin de controlar principalmente equipos eléctricos como líneas eléctricas, cuadros eléctricos, transformadores, etc. En sistemas mecánicos como son: los motores rotativos, cojinetes, correas, turbinas, cintas transportadoras o caja de transmisiones; sucede que se pueden sobrecalentar debidos a errores de alineamiento o desgaste de piezas, por lo que, mediante la termografía, inspeccionamos en busca de ese exceso de calor antes de las averías, por ejemplo, cortocircuitos en el cableado o desgaste de escobillas; proporcionando un método sustitutivo al análisis de vibraciones que en estos casos, funciona mejor pues, estas averías no producen tantas vibraciones en proporción a los aumentos de temperatura que presentan. Esta tecnología se puede utilizar tanto para mantenimiento preventivo (adquisición de datos puntuales) como para predictivo (adquisición y procesamiento automático), a continuación, una amplia aplicación de la termografía en distintos ámbitos.

Alta tensión



Baja tensión



Mecánicas

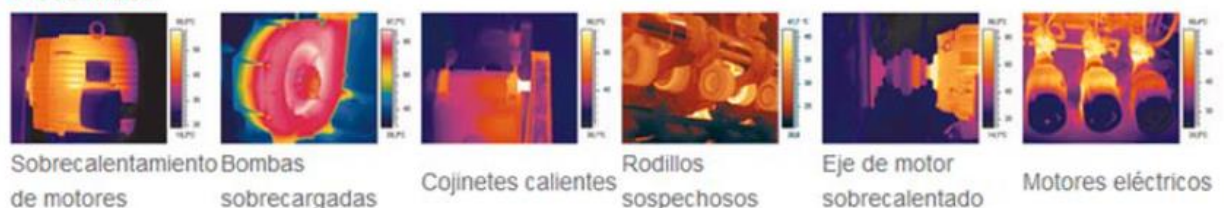


Figura 2-12 Aplicación termografía [7]

2.3.4 Ultrasonidos

Esta tecnología se basa en las ondas de sonido de alta frecuencia (ultrasonidos) que producen las variaciones microscópicas de las fuerzas de rozamiento en una máquina, permitiendo una detección mucho más temprana que la esperada en un análisis de vibraciones debido a un aumento de las vibraciones o en la termografía en un aumento de la temperatura. Esto permite un margen más amplio de actuación para realizar un plan de mantenimiento sin consecuencias graves en el sistema.

Esta técnica está muy difundida por su gran versatilidad, pues tiene gran variedad de aplicaciones, el único costo que conlleva es la adquisición del material pues no hay que implantarlo en ninguna máquina, y no se necesita personal experto para el uso de esta tecnología, pues suelen venir de fábrica con un software muy intuitivo y fácil de interpretar.

Como se ha mencionado, esta tecnología se basa en la captación de estos ultrasonidos y las frecuencias de estos ultrasonidos se encuentran sobre el rango de los 40.000 Hz, frecuencia que supera el umbral de audibilidad humano, que se sitúa entre 20 y 20.000 Hz. Debido a que estos ultrasonidos siguen las leyes de transmisión de la luz, a partir del tiempo de emisión podemos conocer la distancia al defecto, y es fácil de localizar la procedencia de estos ultrasonidos incluso aunque estemos en un ambiente ruidoso. Los instrumentos que utilizamos para convertir estos sonidos inaudibles en ondas audibles son los detectores ultrasónicos, que mediante unos audífonos permite escuchar los ultrasonidos, y representa gráficamente estos ultrasonidos en un monitor móvil.



Figura 2-13 Representación gráfica ultrasonidos mediante equipo “Sonotek Sonaphone”

2.3.5 Análisis de lubricantes

Este método permite conocer el grado de degradación de los equipos mediante el análisis fisicoquímico realizado a los aceites lubricantes en servicio y el posterior control de las partículas de desgaste contenidas en los lubricantes, dando a conocer fallos actuales de lubricación en piezas del sistema. La falta o desaparición de los efectos del lubricante puede provocar desgaste de material debido a alto rozamiento al que están sometidos las piezas, el bloqueo por dilataciones o incluso la fundición de la pieza por los aumentos de temperatura (que es lo que sucede en los motores si existiera aceite en el cárter). Con propiedades lubricantes no solo se hace mención de la cantidad de lubricante, lo cual sería el primer parámetro a controlar, si no las propiedades que lo caracterizan, aparte de los contaminantes que pueda tener como polvo o partículas pertenecientes al material lubricado, como vemos en la siguiente tabla:

Elemento químico	Procedencia
Estaño	Rodamientos, soldaduras
Plomo	Cojinetes
Plata	Pasador pistón
Níquel	Tren de válvulas
Titanio	Álabes turbina
Sodio	Agua salada

Tabla 2-3 Relación elementos químicos—elementos de un motor (Elaboración propia)

La implementación de este método es tarea ardua pues el análisis de los lubricantes no se pueden realizar in situ, es necesario realizarlos en laboratorios y enviarlos mediante lotes adecuados, y por cada tipo de pieza con su lubricante determinado. Para el caso de partículas metálicas que no se puedan extraer de los lubricantes se usará el análisis ferrográfico, mediante el cual podemos decantar estas partículas metálicas.

2.3.6 Análisis de gases de exhaustación del motor

El análisis de gases es principalmente utilizado para comprobar las emisiones y realizar comparaciones entre estos datos y la normativa que regula los porcentajes de los productos resultantes de las combustiones del motor. Hoy en día ha aumentado el número de vehículos y barcos muy rápidamente, por lo que los motores de combustión están en alza y se están convirtiendo en el mayor origen de emisiones contaminantes, que contribuyen al calentamiento global. Los gases emitidos de combustión interna son óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxidos de carbono (CO), hidrocarburos (HC), inquemados debidos a una combustión incompleta y aldehídos. Todos estos gases son conocidos por ser perjudiciales para el medioambiente y la salud, desarrollando efectos adversos en la habilidad mental, degradación de la circulación sanguínea, nervios, órganos y aumento de la presión sanguínea.

Las emisiones de CO_2 en el año 1996 resultaron ser en su 77,5% del total, producto de las combustiones de sólidos y líquidos, y un 8,3 % restante debido a combustibles gaseosos. Se ha estudiado las repercusiones del CO_2 en la atmosfera y es por ello por lo que se ha intentado normalizar este proceso de combustión, imponiendo unos límites cada vez son más estrictos. Igualmente, las investigaciones sobre los componentes de la combustión de diésel o metano con un catalizador de oxidación han concluido con una reducción eficaz de CO, hidrocarburos, NO_x y NO. Se exige reducir principalmente gases como son NO, NO_x y CO.

No obstante, el objetivo de este análisis de emisiones no es otro que el mantenimiento del motor, mediante el estudio de los porcentajes y los regímenes el motor para sacar conclusiones adelantadas sobre posibles síntomas que este sufriendo. Sin embargo, se describen a continuación maneras de controlar estas emisiones y como mejorarlas con el fin de mejorar las condiciones del motor a largo plazo:

- **Sensor de oxígeno o sensor *Lambda*:** dado que el motor no controla los porcentajes de aire y combustible que usa en la combustión (ni los carburadores ni los sistemas de inyección electrónicos), para controlar estas mezclas se necesita de un sensor que indique el porcentaje que entra al motor, el sensor *Lambda*, colocado a la salida del colector de escape; analizando las emisiones circulantes y enviando información constantemente a la ECM del motor, que es el módulo que controla las mezclas en función del régimen del motor. Esta proporción, teóricamente en motores gasolina es de 14,7:1, es decir, se necesita 14,7 gramos de aire por cada gramo de combustible para una combustión óptima; mientras que en motores diésel es de 14.5:1, muy parecida entre sí. A este porcentaje se llama relación estequiométrica pues, la relación varía de 12 a 16 y dependiendo de qué relación sea la mezcla, podemos denominarla de la siguiente manera:
 - Mezcla pobre: es resultante de las relaciones de aire-combustible mayores de 14,5:1. En estas condiciones, el motor aumenta la temperatura de combustión, facilitando la producción de óxidos de nitrógeno (NO_x). Además, si la mezcla alcanza niveles de 16 o mayores, puede pasar que no todo el combustible se inflame por abundancia de O_2 y se pare.
 - Mezcla rica: tipo de mezcla con relaciones de aire-combustibles menores a 14,5:1, es decir, cuando hay un exceso de combustible en la mezcla, el cual no se quemará y por tanto saldrá en los gases de escape en forma de monóxido de carbono (CO) y hollín.

En términos genéricos, también se conoce *Lambda* como el cociente entre la cantidad de aire que exige la relación estequiométrica para una combustión completa, y la relación de aire real que entra al motor, siendo la siguiente ecuación:

$$\text{Lambda} = \frac{\text{Masa real de aire}}{\text{Masa teórica de aire}}$$

El factor *Lambda* no puede mantenerse siempre en un motor, pues va variando continuamente entre unos límites, puesto que no proporcionaría rendimientos ni potencias máximas. Para un dado factor *Lambda* entendemos lo siguiente:

- *Lambda* = 1: se obtiene una combustión perfecta, dado que aire aspirado es igual al teórico.
- *Lambda* > 1: indica exceso de aire, con lo cual empeora los rendimientos, pero asegurando aun así una combustión eficaz en cuanto aprovechamiento del combustible (120% aire teórico). Es la relación que suele dar menores consumos.
- *Lambda* < 1: indica escasez de aire, proporcionando una mezcla rica en aire. (aire aspirado un 80% del aire teórico). Es la relación que suele dar potencia máxima en un motor.

Como se comentó anteriormente, la relación *Lambda* afecta en gran medida a las emisiones de escape, por lo que pueden ser indicativo del estado de funcionamiento del motor. A continuación, vemos en qué condiciones se genera en máxima cantidad las siguientes fases:

- Monóxido de carbono (CO): aumenta en mezclas ricas, con factores Lambda menores de uno, dado que no hay oxígeno suficiente para todo el combustible, por lo que se genera elevadas cantidades de CO; sin embargo, para mezclas pobres, al haber suficiente oxígeno para todo el combustible, se genera poco CO.
- Dióxido de carbono (CO₂): es máxima para las reacciones con una Lambda aproximada a 1. Fijando este parámetro se es capaz de deducir la calidad de la combustión.
- Hidrocarburos (HC): las cantidades máximas se obtienen en mezclas ricas, donde no hay suficiente oxígeno para quemar el combustible, y se producen inquemados. No obstante, para mezclas demasiado pobres, se puede producir fallos de combustión por la mala propagación de la llama de encendido. Generalmente, el factor Lambda óptimo para la menor producción es 1,2.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): para la producción de este elemento influye mayoritariamente la temperatura y la presencia de oxígeno. Cuanto más oxígeno, más probabilidad de que se produzca NO_x, es por ello por lo que en mezclas pobres se generaría más NO_x, sin embargo, cuanto más pobre sea la mezcla, más oxígeno habrá, y menor será la temperatura de combustión, y por consiguiente los óxidos de nitrógeno en la combustión.
- Óxidos de azufre (SO_x): la producción de este elemento no depende exactamente de la cantidad de oxígeno, o de la temperatura, sino del tipo de combustible que se utilice. La producción de este contaminante es peligrosa tanto para la máquina, por la posible corrosión, como para la salud de los operarios.

El interés en saber cómo se forma los gases de escape y en qué condiciones varían no es otra que limitar en la medida de lo posible, la producción de estos gases contaminantes que son, el monóxido de carbono, los inquemados (hidrocarburos) y los óxidos de nitrógeno. Se observa en la gráfica-resumen de lo mencionado anteriormente, Figura 2-14 Comportamiento de los gases de escape según factor *Lambda*, que es imposible mantener la mínima concentración de los tres gases citados pues, para valores de *Lambda* entre 0.8 y 1.1, los valores de CO y HC son demasiado altos frente a un NO_x bajo. Es necesario garantizar una combustión completa con un factor *Lambda* mayor a 1,05 para obtener niveles bajos de CO y HC, al mismo que tiempo que un buen comportamiento de los óxidos de nitrógeno (NO_x).

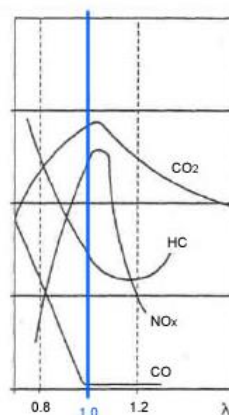


Figura 2-14 Comportamiento de los gases de escape según factor *Lambda* [9]

El objetivo de buscar esta condición del motor en el que se reduzcan al punto óptimo estas emisiones, es el mantenimiento de la máquina, para no afectar a la salud de los operarios, y para un adecuado funcionamiento de éste, pues estos gases no solo son perjudiciales para

el ser humano, sino que son perjudiciales para la máquina, pues determinan el funcionamiento de la misma. Esta condición deseada se reconoce con el sobrenombre de ‘ventana *Lambda*’. Esta condición se puede mejorar mediante la implementación de tecnologías que favorezcan la reducción de gases como pueden ser el sistema de inyección electrónico mediante dosis que facilita la mezcla del combustible y el oxígeno consiguiendo combustiones completas independientemente de lo pobre que puedan ser las mezclas; o la regulación de la mezcla para que trabaje cerca de la ‘ventana *Lambda*’ o el uso del catalizador, para una posterior depuración.

- **Sistema de ventilación positiva del Cártter (PCV):** durante el funcionamiento del motor se generan vapores en el interior del cárter debido a las altas presiones que hace que se oxiden los lubricantes del motor. Aún más notables son estos gases cuando el motor ha perdido estanqueidad y no comprime igual de bien. Si estos gases generados en el cárter se condensan y se mezclan con el lubricante en cuestión (véase aceite) puede conseguir una pérdida de todas las propiedades del lubricante, teniendo que sustituirlo eventualmente. Para evitar este fallo, el motor dispone de un mecanismo de ventilación en el cárter que arrastra al exterior los gases producidos por el aceite o los introducidos de la gasolina, según van entrando en el mismo, manteniendo la presión de la lubricación. Estos ventiladores tienen dos formas de operar:
 - Ventilación abierta: se trata de un tubo que une el cárter con el exterior, a través de la tapa de balancines, basado en la propiedad de movimiento de los gases de mayor a menor presión. Esta práctica está prohibida debido a la gran contaminación que produce los gases emitidos de la combustión.
 - Ventilación cerrada: consiste en unir el cárter al colector de admisión de manera que los gases se mueven y vuelven a quemarse en la cámara de combustión junto con la mezcla. Es una ventilación más rápida ya que los gases son aspirados mediante el efecto Venturi (además de que están a mayor presión) y lubrica la culata al tener un porcentaje mínimo de aceite en los gases (existe una válvula de ventilación positiva que condensa el aceite de los vapores para que retornen al cárter y no interfieran en el proceso de inyección). Sin embargo, es teoría y en la práctica se puede observar que el motor puede producir sonidos anormales debido a este mecanismo, y que se arregla simplemente retirando este tubo.

Existe una válvula que regula la entrada de estos vapores llamado válvula de mariposa, que se acciona por la fuerte depresión que ejerce el motor cuando entra en ralentí, y que, al acelerar, se disminuye esta presión y se reanuda la ventilación, como se puede ver en la siguiente gráfica.

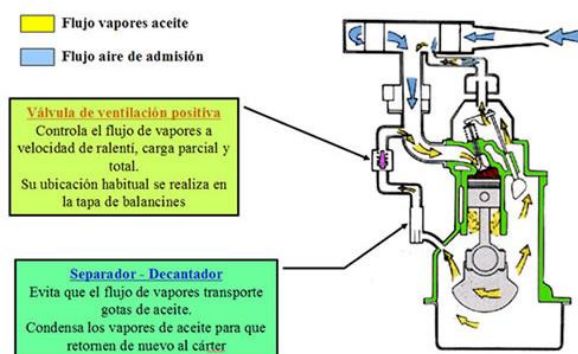


Figura 2-15 Representación ventilación cerrada [9]

- **Canister o control evaporativo de gases (Filtro de carbón activo):** este elemento tiene un objetivo muy sencillo, que es evitar la evaporación del combustible, por ser volátil, inflamable y evaporable a temperatura ambiente.

Este bote contiene carbón activo que retiene provisionalmente los vapores de hidrocarburo con el fin de reutilizarlos para su quemado posterior. La manera trabajar de este elemento difiere en el régimen de funcionamiento del motor, pero con la llegada de la electrónica, se realiza todo a partir de la centralita de inyección ECM (módulo de control electrónico) que actúa sobre una electroválvula teniendo en cuenta la temperatura del motor (no funciona hasta una determinada temperatura), las revoluciones del motor (en ralentí no funciona), la carga del motor (con mariposa totalmente no funciona) y si está arrancado (durante el mismo no funciona). Funciona al unísono con el sensor *Lambda*, pues el Canister se purga hasta que la sonda manda una señal de que la mezcla es rica, y se controla la purga hasta la siguiente señal donde la sonda *Lambda* indica que la proporción de la mezcla es correcta.

Es mediante un tubo cómo el Canister comunica el tanque de gasolina y el carburador con el colector de admisión, y dispone de una válvula de cierre de combustible que impide la entrada de combustible en los tubos.

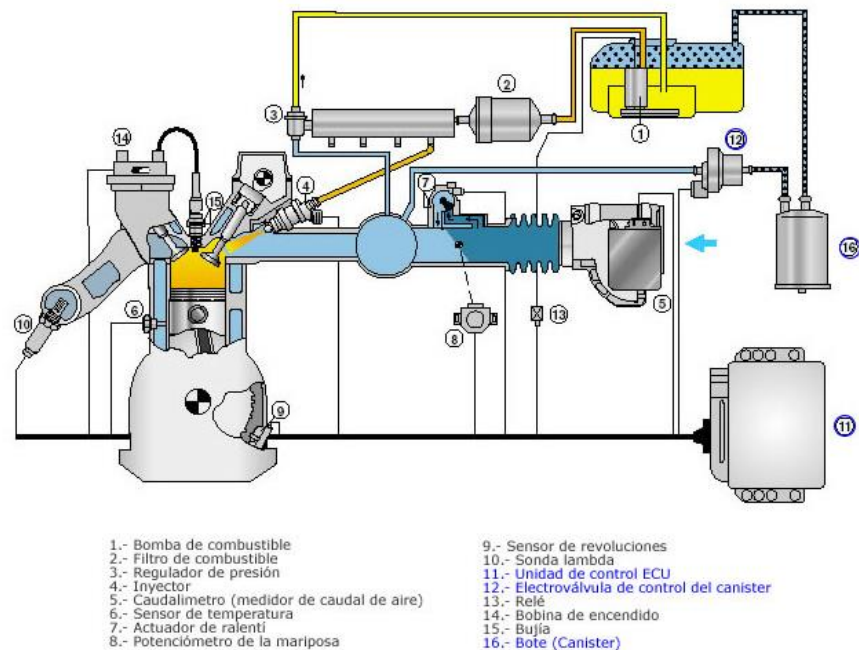


Figura 2-16 Canister en un sistema de inyección electrónica Motronic de Bosch [9]

- Válvula de recirculación de los gases de escape (EGR):** se hará una breve mención a este método ya que el objetivo de este elemento es cumplir la normativa vigente pues solo afecta a los óxidos de nitrógeno (NO_x), recirculándolos al colector de admisión y reduciendo la cantidad de oxígeno y reduciendo la temperatura, provocando menos óxidos de nitrógeno. Este elemento es capaz de reducir la producción de NO_x en un 50% y de reducir en un 10% la formación de partículas de hollín. En motores marinos, al ser muy pesados deben de ser refrigerados. El sistema EGR se suele activar a partir de una temperatura, y con una carga parcial del motor, y controlado a partir de ECM, que decide que cantidad de gases recircular y en qué momento. Las válvulas EGR de motores diésel suelen ser de gran diámetro debido a la gran tasa de reciclaje de los gases, y pueden ser tanto válvulas de accionamiento neumático como eléctrico.

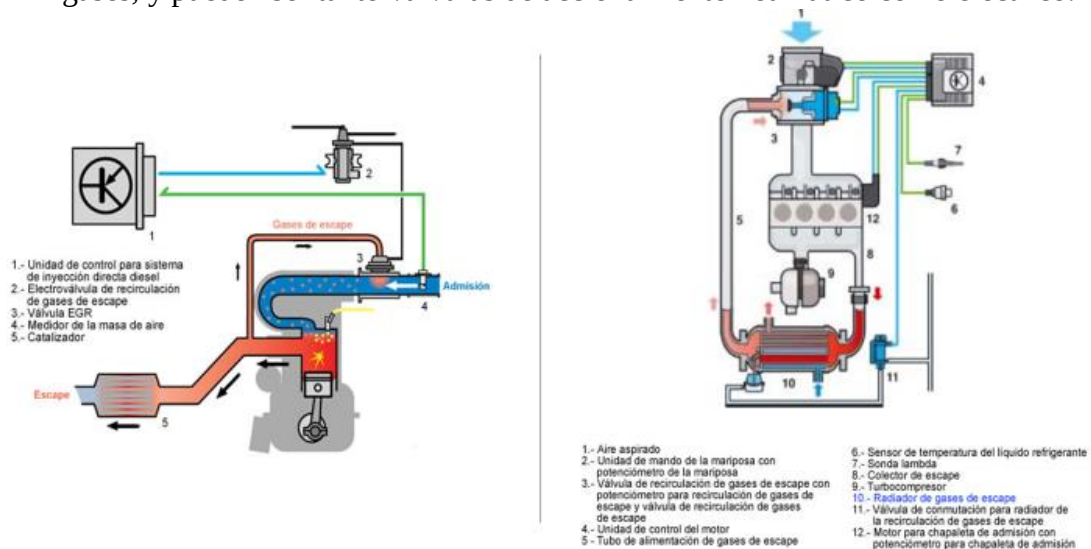


Figura 2-17 Esquema de la válvula EGR con y sin enfriamiento [9]

- Sistema de inyección adicional de aire en el escape:** la finalidad de este elemento es introducir un volumen de aire en el colector de escape para completar la combustión de los gases expulsados, reduciendo mediante combustión los porcentajes de CO e inquemados del sistema. Este elemento es muy eficaz en las combustiones con mezclas ricas, que es donde más escasez de oxígeno existe, y en los arranques en frío de los motores. Es un elemento muy recurrido en los motores gasolina por trabajar con mezclas ricas, ya que en los motores diésel se suele trabajar con mezclas pobres.

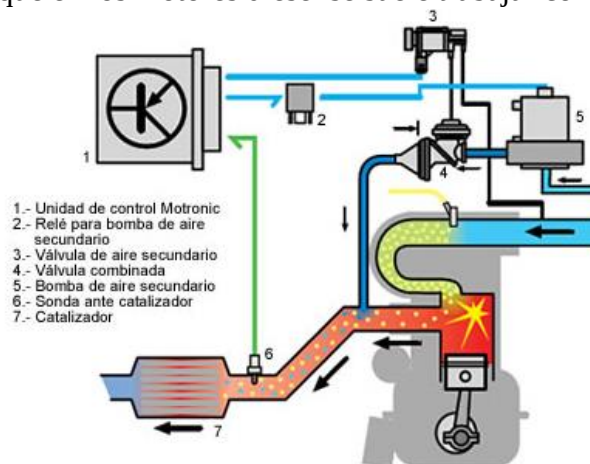


Figura 2-18 Esquema sistema inyección de aire en el escape [9]

- **Catalizador:** al igual que el EGR, la función de este elemento es reducir los gases contaminantes producidos por la combustión para cumplir la normativa vigente. En este caso, el catalizador se encarga de reducir los niveles de concentración de los inquemados (HC), de los monóxidos de carbono (CO) y del monóxido de nitrógeno (NO). Es un aparato que se coloca en la salida del colector de escape, justo antes de expulsarse a la atmosfera, en el cual mediante la absorción del calor de los gases (primordial para un buen funcionamiento, mantenerlo entre temperaturas de 400 y 700° C). El catalizador purifica mediante los químicos activos como pueden ser Platino, Rodio o Paladio, que se basan en dos reacciones químicas:
 - Reducción: extrae el oxígeno de los componentes de escape
 - Oxidación: adición de oxígeno a los gases de escape con el fin de volver a quemarlos, de manera similar al proceso de inyección de aire en el colector de escape.

Según el tipo de funcionamiento, existen varios tipos de catalizadores:

- Catalizador oxidante: o catalizador de ‘dos vías’ porque trata dos gases. Este catalizador permite la reducción de CO y HC. Se utilizan principalmente en motores diésel debido a que la temperatura de los gases no es suficientemente alta, a diferencia de los motores de gasolina, como para fundir el catalizador.
- Catalizador de dos vías: también llamado catalizador de tres vías en ‘bucle abierto’. Este catalizador solo habitual en américa, precisa de una toma intermedia de aire que reduce los NO_x, y la parte final, similar al catalizador oxidante donde se reduce los otros gases contaminantes.
- Catalizador de tres vías: también conocido como catalizador de bucle cerrado, siendo los más usados en la actualidad. Se denominan de tres vías debido a la reducción de los tres elementos más importantes, como son el CO, el NO_x y los hidrocarburos. La eficiencia de este elemento depende de la composición de los gases de admisión, que debe ser la más cercana a la estequiométrica, siendo esta información dada por el sensor *Lambda*, ya que los catalizadores también se controlan desde el ECM.

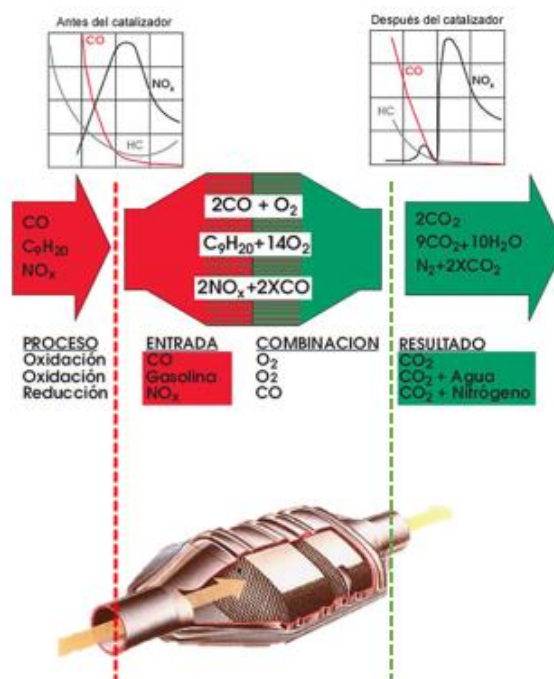


Figura 2-19 Procesos químicos en un catalizador de tres vías (Elaboración propia a partir de [9])

- **Filtro de partículas para motores diésel:** el objetivo de este filtro es reducir las partículas de hollín, que en realidad son inquemados, y que se identifican fácilmente como el denso humo negro que puede dejar el motor a medida que avanza. En este caso, cabe destacar que depende exclusivamente del combustible, siendo el diésel más contaminante y propenso a generar hollín, puesto que está formado por mayores cadenas de hidrocarburos que la gasolina. También depende del régimen de revoluciones del motor y de la carga, pues con cargas medias o menores, la inyección de combustible es menor respecto al aire introducido y hay suficiente oxígeno como para llevar a cabo la combustión completa. Sin embargo, en regímenes con altas cargas de esfuerzo, como son las aceleraciones, se inyecta gran cantidad de combustible y puede pasar que no haya suficiente oxígeno, lo cual generará inquemados que se agruparán para formar hollín, aparte del dióxido de azufre (si el combustible lo contiene).

El origen de las partículas de hollín depende de las operaciones y características del motor, pues depende de la alimentación del aire, el modo de inyección, la propagación de la llama o la proporción de oxígeno en la mezcla. Son demasiado los factores que afectan, por lo que es una manera de conocer la calidad de la combustión. Por ejemplo, el sistema de inyección mediante bombas reduce la generación de hollín, pero la dosificación mediante pulverizaciones junto a la alta presión de inyección no implica que el tamaño de las partículas de hollín sea más pequeño, de hecho, se ha llegado a la conclusión de que el tamaño de la partícula es independiente del proceso de combustión, siendo finalmente muy parecidos en los inyectores-bomba, motores de cámara de turbulencia o “common rail”.

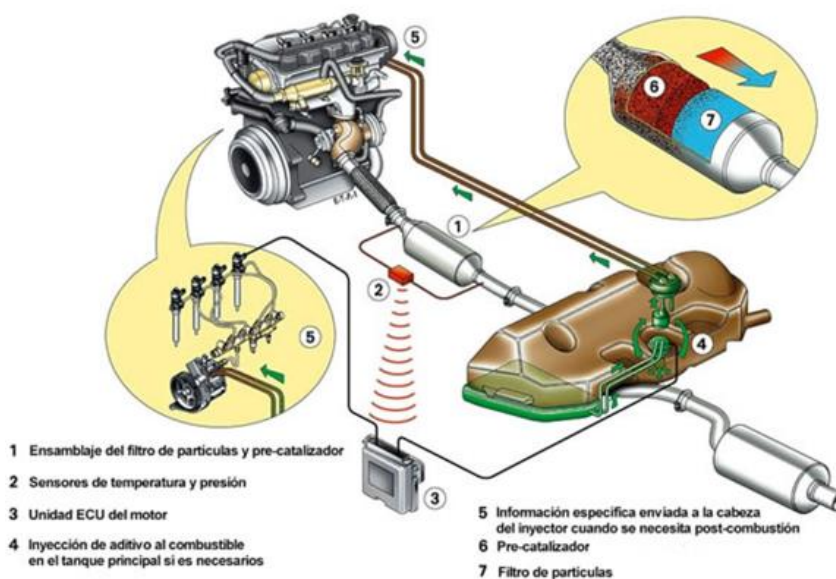


Figura 2-20 Esquema filtro de partículas de un motor [9]

Los medios por los cuales sí se consigue reducir estas partículas, es mediante el diseño de fábrica como puede ser: el establecimiento de flujos continuos y constantes de los gases de admisión y entrada, las altas presiones de inyección y la geometría de la cámara de combustión y el diseño de la cabeza del pistón. También se pueden reducir mediante la introducción de filtros, entre los cuales encontramos:

- Filtro de partículas diésel con aditivos, implementados en motores con el filtro alejado del motor, con aditivo para aumentar la temperatura
- Filtro de partículas diésel sin aditivos, implementados en los filtros cercanos al motor, en los que no es necesario aumentar la temperatura de los gases.

Como resumen, se puede observar en la siguiente figura como quedaría dispuesta la línea de escape de un motor con la implementación de algunos de los elementos anteriormente explicados.

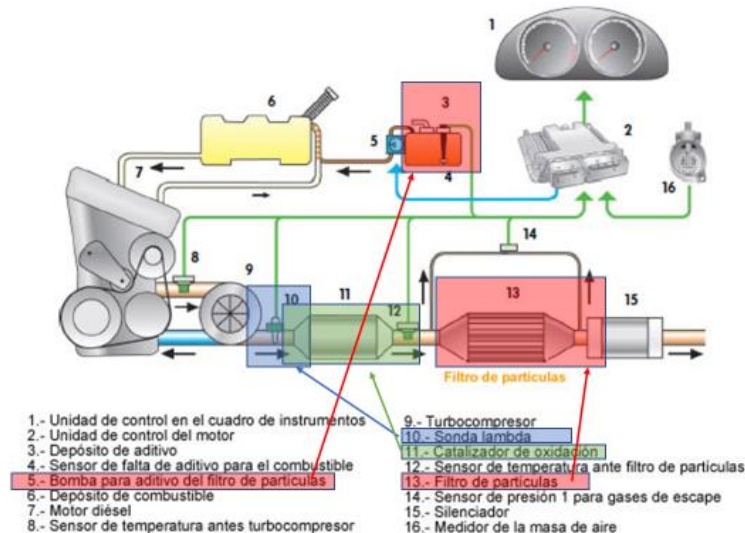


Figura 2-21 Esquema de la línea de escape del motor

2.4 Mantenimiento en la Armada

Desde un punto de vista naval ya se ha visto que la implementación de estos mantenimientos puede llevar más tiempo del normal y resulta ser complicados; pero, cuando se trata de implementarlo en la Armada se convierte algo mucho más complejo. El futuro del mantenimiento depende la capacidad que se tenga para derribar esos retos que aparecen tras el desarrollo de plataformas militares y civiles. Algunas barreras eran conocidas antes de empezar este proyecto, como pueden ser:

- El continuo análisis y adquisición de datos de los sistemas de nuestras plataformas, pues si no existen datos que procesar tampoco el procesamiento ni diagnóstico.
- Los sistemas de mantenimiento actuales no son capaces de diagnosticar fallos, es de decir, de razonar fallos inminentes ni medidas a tomar.
- Sigue siendo inexacta la precisión de las predicciones de vida útil de los equipos.

Estos retos tienen una razón de ser, pues la Armada no posee equipos sencillos y comunes en sus buques, sino de la tecnología más avanzada y específica para poder llevar a cabo la misión para las que han sido diseñados. Es por ello por lo que, en este caso, la implementación resulta poco económica y una auténtica revolución en el ámbito naval; pues la capacidad para gestionar la flota y mantener altos niveles de fiabilidad, acompañado por la recolección de todos los datos necesarios que se obtienen de estos gigantes tecnológicos, y el procesamiento de todo ello es una tarea de gran dificultad.

Ante este nuevo reto surge la pregunta de si resulta rentable la implantación de esta nueva metodología. No es difícil de justificar pues, hoy en día, todos los buques que se entregan a la Armada poseen la capacidad para recolectar todo tipo de datos automáticamente, útiles para el mantenimiento mediante el *Sistema Integrado de Control de Plataforma (SICP)*.

2.4.1 SICP

El *Sistema Integrado de Control de Plataforma* consiste en un sistema incorporado en los buques con el que se pretenden controlar remotamente los equipos y servicios que forman parte de la plataforma del buque, desde una cámara de control central, el control del buque, propulsión, generación y distribución eléctrica y hasta servicios auxiliares. Todo ello mediante la implementación de autómatas, conmutadores, sensores y accionadores. El SICP, además, cuenta con gran variedad de funciones útiles desde un punto de vista de mantenimiento.

- i. Registro de horas funcionamiento de máquinas y equipos.
- ii. Representación en tiempo real y “off line” de datos analógicos en diagramas de tendencias.
- iii. Almacenamiento de los datos de funcionamiento de las máquinas, cada un intervalo de tiempo a elegir por el operador o cada vez que se active la alarma, y que se pueden solicitar al equipo.
- iv. Capacidad de programar alarmas de mantenimiento en función de parámetros de proceso.

Sin embargo, si se fuera capaz de implementar ciertas mejoras se incrementaría, en gran medida, los servicios que puede prestar al barco. Algunas de estas medidas pueden ser:

- a. Generación en tiempo real o diferido (“Off line”) de alarmas de “fallo de condición”, que son generados por la combinación de valores de sensores que obtienen un parámetro que, a su vez, define una “Característica de funcionamiento” que pueda compararse al de un modelo en buen estado. Un ejemplo de parámetro sería la relación de las variaciones de presión y potencia en un motor que sí se suelen mantener, o el rendimiento adiabático de los compresores. Son distintos a las alarmas que proporciona el SICP al tratarse de unos valores estáticos, por ejemplo, niveles de presión altos o bajos, que no se consideran mantenimiento predictivo.
- b. Herramientas para generar y representar los datos obtenidos por los sensores del SICP, alarmas por “fallo de condición” y “características de funcionamiento” generándose informes basados en este último.

El objetivo de la Armada es la consecución de la denominada **Armada 4.0** que consiste en la interconexión de diversos aspectos. Se basa en la Industria 4.0 que, junto al *Big Data*, el IoT (*the Internet of things*) y la conectividad mundial, se resume en sacar el máximo partido a todos los equipos para obtener la mayor cantidad de datos posibles. La también denominada **la Cuarta Revolución Industrial** surge de la transformación digital de la población, en la que se interconecta “el mundo físico” y “el entorno digital” mediante interfaces de comunicación, en el cual se lleva a cabo un procesamiento de todos los datos que ayudarán al operador a tomar una decisión.

2.4.2 Armada 4.0

Tornando este tema al ámbito naval, podemos denominar al “mundo físico” como el “buque inteligente”, dado que es capaz de adquirir y procesar todos los datos administrados por sus equipos y autómatas programables, mientras que el “entorno digital” se conocería como la maqueta digital, que es la representación virtual en tres dimensiones del buque en cuestión, con el cual intentamos representar el buque real a partir de todos los datos obtenidos. De esta manera podemos ejercer simulaciones y control de todos los equipos. Cuanta más información se posea, más realista será la maqueta digital. Es por ello por lo que la Armada trabaja junto a Navantia para la incorporación de todos los elementos necesarios para el objetivo común: conseguir esa información funcional de los sistemas de los barcos como pueden ser las válvulas de sistemas de contraincendios, los recorrido de humo, evacuación personal posible, caudales, temperaturas o revoluciones de los motores, etc.

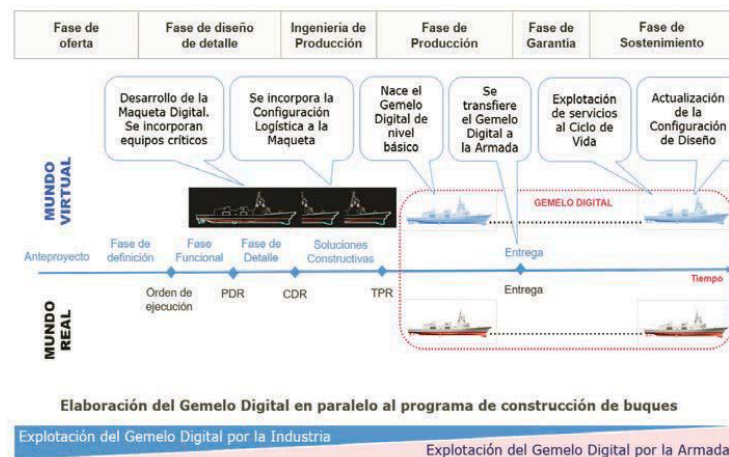


Figura 2-22 Ciclo de vida del gemelo digital [10]

El momento en el que se tiene tanta información que se considera una representación idéntica de la realidad física, se puede hablar de un "gemelo digital", sobre el cual apoyar los tres aspectos logísticos del ciclo de vida de una unidad, para conseguir un sostenimiento pleno y de mayor ciclo de operatividad de un barco, que es algo parecido a lo que persigue el RCM. Por lo que decir "Mantenimiento RCM en la Armada" resulta equivalente a decir "Armada 4.0".

El modelo de apoyo Logístico en una maqueta digital se basa en:

- Mantenimiento (preventivo, correctivo y predictivo) que exige de la maqueta disponer del despiece y la información de todos sus equipos, así como el procesamiento de datos para llegar a conclusiones a priori y los planes e historiales de mantenimiento informatizados.
- Aprovisionamiento, representando en la maqueta las existencias de material disponibles en el buque, los pedidos y los cargos, y una clara organización intuitiva y eficaz para gestionar el aprovisionamiento en puerto y en la mar.
- Ingeniería del ciclo de vida, con el objetivo de controlar y llevar una predicción óptima para alargar todo lo posible la vida operativa del buque, cumpliendo los estándares recogidos en los proyectos de construcción de los mismos.

Consideramos que es fundamental aprovechar las tecnologías de vanguardia para mejorar la Armada y su eficiencia, tanto a nivel administrativo y operativo, como se ha visto, al igual que a nivel didáctico y de adiestramiento e instrucción para el combate (preparación de unidades para las CALOP antes de una misión). Todo ello mediante las técnicas de modelado y simulación de entornos sensoriales 3D artificial, también conocido como "realidad virtual", replicando el comportamiento operativo del buque en ambientes operativos.

Para que la maqueta sea capaz de proporcionar toda la información que el apoyo logístico va a utilizar a lo largo del ciclo de vida del barco, va a ser necesario que se definan, en la fase de diseño, cómo queremos que se desarrolle el proyecto a largo plazo, para especificar datos, intereses a tener en cuenta para desarrollar el buque y funciones necesarias que ha de proporcionar. Esto significa que, si la Armada contempla en unos años el pleno mantenimiento del barco por cuenta propia, éste deberá aportar todos los datos posibles para ello. Se deben establecer los niveles de autonomía de cada proceso en la maqueta, de manera que el "buque inteligente" reaccione de manera similar y automática a lo dispuesto en el reglamento, como detectar errores de diseño y recomendar automáticamente soluciones de ingeniería, mejoras de eficiencia energética, seguridad física, entre otros, con el fin de ir enriqueciendo la maqueta digital a lo largo de su vida mediante el autoaprendizaje o inteligencia artificial.

Igual de importante es el factor de *Big Data* en tiempo real, al que se podrá acceder en tiempo real y diferido según las necesidades del momento. Igualmente, se contempla la inclusión del principio de

modularidad (que se basa en el funcionamiento por módulos para flexibilizar el ciclo de vida del buque) y de la intercambiabilidad de los sistemas. Todo ello en el ámbito de la interoperabilidad de los módulos nuevos y ya existentes, para poder explotar al máximo los recursos obtenidos recientemente y la posibilidad de incorporarlos a sistemas ya conocidos, o que aún no se han innovado. En la siguiente figura se contemplan todos los principios de diseño del buque.



Figura 2-23 Principios de diseño de la maqueta digital

Para resumir el concepto de maqueta digital se han de enunciar entre otros los siguientes aspectos:

- Para llevar a cabo los mantenimientos adecuados desde un entorno externo al barco se deberá visualizar el despiece de la maqueta o la secuencia de montaje de los componentes, lo cual es entorno hostil debido a la complejidad del proyecto. Se deberá mostrar de forma intuitiva.
- Para efectuar obras de modificación se deberá comprobar inicialmente la plataforma virtual, para verificar la integración física en cuanto espacio, conexiones, alimentación eléctrica, impacto en las diferentes firmas del barco.
- Para los requisitos contractuales, como pueden ser esfuerzos admitidos, simulaciones en mala mar, o cualquier otro tipo no justificable en una prueba de mar, se deberá disponer de simulaciones informáticas que verifiquen el estado del barco.

Las nuevas fragatas F-110 son muestra de la disposición de la Armada española por conseguir los objetivos propuestos. La obtención del gemelo digital de la F-110 debe ser la piedra angular del proyecto en el cual desarrollar nuevos proyectos; procurando que sean maquetas flexibles, adaptables al entorno turbulento y escalables para no poner restricciones en cuanto al potencial que estas adquisiciones pueden dar a la nueva Armada 4.0. [10].

2.4.3 Política de mantenimiento en la Armada

Actualmente, en la Armada se cuenta con varios tipos de mantenimiento, pues no todos los barcos necesitan la misma gestión de sus equipos. Por ejemplo, los patrulleros no tienen la misma capacidad para la medición de datos que los buques de aprovisionamiento BAC ‘Patiño’ o ‘Cantabria’ o las fragatas F-100 ‘Álvaro de Bazán’ o incluso la F-105 ‘Cristóbal Colón’, que es de botadura posterior a las F-100, puestos que en cada uno se realizan distintos métodos de previsión de averías.

El mantenimiento en la Armada es una importante función logística, que se apoya en la adquisición de datos de manera automática en los buques más modernos, o en la revisión diaria de los equipos por parte del personal. Lo que si se desarrolla en todos los buques y unidades es llevar a cabo, en la medida de lo posible, los tres tipos de mantenimientos principales:

- El Mantenimiento Correctivo realizado por todos, en función de la severidad del repuesto.
- Mantenimiento preventivo, es el más común. Es aquí donde clasificamos los procedimientos *Whiskey* que se llevan a cabo en la Armada:
 - a. W1, W2 y W3: realizados por la dotación del buque. Corresponde a los servicios correspondientes a las 24 horas, 150 horas o 6 meses y a las 300 horas o año de funcionamiento.
 - b. W4, W5 y W6: se realizan en astillero y corresponde con los mantenimientos realizados cada 1500 horas o dos años, 3000 horas o 6 años y 6000 horas o 1 año, respectivamente.
- Mantenimiento predictivo se realiza a través de la Sección Técnica perteneciente a la Jefatura Industrial de ARFER, aunque está relativamente en proceso. Principalmente, en la Armada se desarrollan análisis termográficos y análisis de vibraciones, éstos últimos únicamente en las F-100 y siempre en los periodos de inmovilización programadas (PIP). Tales análisis se comparan siempre con los datos de fabricante, si es posible; en caso contrario se toman como valores iniciales los obtenidos en alguna prueba previa y basándose en la normativa vigente. Es por ello por lo que cuantas más mediciones, mayor fiabilidad proporcionará la base de datos extraída en función de la experiencia, y mejores evaluaciones se harán sobre las desviaciones de alguno de sus parámetros.

Todos los informes realizados se emiten a través de la plataforma GALIA, como podemos ver en la siguiente figura.

Seguimiento de Partes - Internet Explorer

SEGUIMIENTO DE PARTES DE MANTENIMIENTO

Arsenal: FERROL | Jefatura: ARFER, JEFATURA DE MANTENIM | Ramo: MANTENIMIENTO PREDICTIVO | Taller: Todos | Grupo: Todos

BUIs: Tipo BUI: Todos | Solo BUIs Activos

Resultados de la Búsqueda: 29 partes encontradas.

Aud.	Entrada	R.	Nombre BUI	Pr	Parte	HSC	Motivo de la petición	Coste T.	Grupo	SO	Modulo	EX	AP	Inm
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C077182	5142314	INSPECCIONAR POR ANALISIS DE		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C076182	5142214	INSPECCIONAR POR ANALISIS DE		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C075182	5142114	INSPECCIONAR POR ANALISIS DE		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C06018	324213	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05918	324212	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05818	324211	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05718	324416	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05618	324415	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05518	324414	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05418	324413	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05318	324412	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C05218	324411	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04918	324129	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04818	324128	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04718	324127	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04618	324126	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04518	324125	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04418	324124	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04318	324123	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04218	324122	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04118	324121	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR LOS		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C04018	324112	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
09/10/2018			ALVARO DE BAZA		C03918	324111	INSPECCIONAR, PROBAR Y AJUSTAR EL		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
02/10/2018			ALVARO DE BAZA		E038182	524131	INSPECCIONAR Y PROBAR CONJUNTO BOMBA		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
05/06/2018			BLAS DE LEZO	6	C061181	5142114	INSPECCIONAR POR ANALISIS DE		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS
05/06/2018			BLAS DE LEZO	6	C01618	251212	INSPECCIONAR POR ANALISIS DE		MP-TMP-	A	Finalización Ramo	--	--	INS

Figura 2-24 Captura del sistema GALIA

Habiendo definido los mantenimientos que existen en la Armada, podemos clasificar también quien realiza estos mantenimientos:

- Primer escalón: se refiere a la entidad del barco en sí, que realiza las labores de mantenimiento necesarias para mantener la operatividad en la medida de lo posible. Depende del comandante.
- Segundo escalón: es el abordado por parte de los arsenales de la Armada. La autoridad de cada Arsenal es responsable.
- Tercer escalón: desarrollado por empresas privadas ajenas a la Armada, estando la responsabilidad en la autoridad del Arsenal y de la empresa civil.

Por último, conviene indicar que el momento en el que se llevan a cabo estos mantenimientos sigue una clasificación:

- a. Según disponibilidad operativa:
 - En periodo operativo.
 - En PIP (periodos de inmovilización programada).
- b. Según capacidad:
 - Nivel A: a pequeña escala.
 - Nivel B: requiere construcción piezas en los tornos de los barcos de los que hay repuestos.
 - Nivel C: mantenimientos complejos de rehabilitación de equipos además de fabricar componentes en caso necesario.

3 TRABAJOS PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE LAS LANCHAS DE INSTRUCCIÓN

3.1 Documentos de referencia

3.1.1 *Normativa sobre análisis de lubricantes*

Dado que no es objeto de investigación se hará una breve mención a esta amplia normativa. Básicamente hay que tener en cuenta que existen muchas restricciones o guías de uso para la lubricación de motores, hay que tener en cuenta tanto como el lubricante en sí, como los aditivos que se le añaden para mejorar las características lubricativas.

Se distinguirán los lubricantes utilizados para motor, regulados mediante la normativa SAE, en cuanto a viscosidad, la normativa ACEA y API para la calidad, y siempre teniendo en cuenta las especificaciones dadas por los constructores.

Algo parecido sucederá con el aceite de los engranajes, que estarán regulados por viscosidad y calidad por las mismas autoridades, mientras que añaden otra normativa para las transmisiones automáticas (ATF) y los fluidos utilizados para las servodirecciones. Si el uso no son motores, sino industrias y aceites hidráulicos, la viscosidad y las distintas clasificaciones vienen determinadas por la normativa ISO vigente.

Bajo el amparo de las normas UNE se encuentran los líquidos refrigerantes, regulados por la norma UNE 26-361, clasificándolos según su composición, tipo y calidad. Para los fluidos de frenos, cuya certificación es dada por el Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), la clasificación se realiza según la procedencia, añadiendo también alguna normativa sobre viscosidad según la SAE.

Por último, se encuentran las grasas, que se clasifican según la consistencia de ésta según el grado NLGI (*National Lubricating Grease Institute*), obtenido en el ensayo ASTM D217. También posee una clasificación atribuida a la normativa ISO 6743-9 y DIN 51825 [11].

3.1.2 *Normativa sobre análisis de gases de exhaustación*

Está regulado por el Ministerio de Industria, turismo y comercio, mediante el Real Decreto 1088/2010 que modifica la anterior norma vigente propuesta, El Real Decreto 61/2006 del 31 de enero, en el que se especifican los combustibles a utilizar y el contenido de azufre de dichos combustibles. Se cita literalmente lo referente al Real Decreto que se aplica a nuestros motores:

«Artículo 3. Especificaciones técnicas de gasóleos.

1. Gasóleos de automoción (clase A). –Las especificaciones técnicas para los gasóleos de automoción (clase A) destinados a ser utilizados en vehículos equipados con un motor diésel serán las que se recogen en el anexo III de este real decreto.

2. Gasóleos para usos agrícola y marítimo (clase B). –Las especificaciones técnicas para los gasóleos, uso agrícola y marítimo (clase B), son las que se relacionan en el anexo III bis de este real decreto con la particularidad que se indica en el siguiente párrafo.

A partir del 1 de enero de 2011, el contenido máximo autorizado de azufre de estos gasóleos será de 10 mg/kg, pudiéndose producir entregas a usuarios finales con un contenido en azufre de hasta 20 mg/kg, como consecuencia de la contaminación en la cadena de suministro. Hasta el 31 de diciembre de 2011 se podrá comercializar gasóleo que contenga un máximo de 1.000 mg/kg de azufre para vehículos ferroviarios y tractores agrícolas y forestales, siempre y cuando este límite no ponga en riesgo el funcionamiento adecuado de los sistemas de control de emisiones.

3. Gasóleos de calefacción (clase C). –Las especificaciones para los gasóleos de calefacción (clase C) son las que se relacionan en el anexo III bis de este real decreto.

4. Hasta el 31 de diciembre del 2012, no serán de aplicación al gasóleo para uso marítimo en las islas Canarias, los límites máximos de azufre establecidos, siempre y cuando no supere los 3.000 mg/kg.» [11].

En el caso de las lanchas de instrucción se ha de cumplir este Real Decreto, ya que el combustible utilizado es el denominado Gasóleo B, concretamente el Mare+ correspondiente a Repsol, con un mínimo porcentaje de contenido en azufre, que no afectará a las emisiones de escape del motor. Es un gasóleo exclusivo de Repsol formulado para proteger el sistema de alimentación e inyección de su motor y optimizar la combustión y el consumo de carburante. Se ha desarrollado en colaboración con fabricantes de motores de última generación (common rail). Gasóleo Mar e+ cumple las especificaciones españolas publicadas en el BOE RD 1088/2010.

ESPECIFICACIONES INTERNAS (ISO 8217)

Características Gasóleo B			
Número de cetano	mínimo 49	Residuo carbonoso (sobre 10% final destilación)	máx. 0,30
Índice de cetano	mínimo 46	Contaminación (agua), mg/kg	máx. 200
Densidad a 15°C, kg/m ³	820-880	Contaminación (partículas sólidas), mg/kg	máx. 24
Contenido de azufre, mg/kg	máx. 10	Contenido de cenizas	máx. 0,01
Viscosidad cinemática a 40°C	2,00 a 4,50	Corrosión al cobre (3h a 50°C)	Clase 1
Punto de inflamación	mínimo 60	Estabilidad a la oxidación (en presencia de metales y almacenamiento prolongado)	máx. 25 (máx. 100)
Punto de obstrucción de filtro frío (POFF)		Lubricidad, WS1.4 a 60°C, micrómetros	máx. 460
invierno (1 de octubre a 31 de marzo)	máx. -10	Reacción con agua por separación (por turbidez)	máx. 200 (máx. 70)
verano (1 de abril a 30 de septiembre)	máx. -6	Garantía de calidad trazador marca Repsol	BOE RD 1088/2010 (Marcador propio)
Punto de enturbiamiento, °C	máximo +4	Color	Rojo

Tabla 3-1 Especificaciones gasóleo mar e+

En cuanto a los óxidos de nitrógeno se aprobó, el 26 de septiembre de 1997, junto a la modificación del MARPOL 73/78, el código técnico relativo al control de emisiones de NOx de los motores diésel marinos.

A partir del 19 de mayo de 2005 entra en vigor el Anexo VI del convenio MARPOL, titulado “Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”, esto incluye a todos los motores diésel marinos anexados en la regla 13, lo que significa que todos los motores diésel marinos deben ajustarse a los límites en emisiones fijados por dicho código. El MEPC 53, promulgado el julio del 2005, convino que tanto el convenio MARPOL como el Código técnico sobre los NOx fueran revisados, elaborándose el actual MEPC 58, en octubre de 2008. Estas medidas se adoptan dada la importancia del sector marítimo en la contaminación atmosférica a nivel mundial [12].

3.1.3 Normativas sobre intensidad acústica

La normativa para clasificar, entre otros, la severidad de la vibración depende del ámbito de aplicación: Nacional (UNE 20-180-86), Internacional (ISO) y las recomendaciones y guías de los fabricantes sobre los niveles de vibración permisibles en la maquinaria.

En cuanto a los aparatos de medición utilizados y los sensores de medida tales como analizadores de vibraciones y acelerómetros, se encuentran igualmente regulados englobando medidas de seguridad, calibración, temperaturas, y más parámetros mediante normas muy habituales como son IEC, MIL y CISPR. También se encuentran normas nacionales que hacen referencia a los instrumentos tales como:

- UNE 21-328-75 (1) “Características relativas a los transductores electromecánicos destinados a la medida de choques y vibraciones”.
- UNE 21-328-75 (2) “Clases de captadores de vibraciones y elementos sensibles empleados en estos captadores”.
- UNE 95-010-86 “Vibraciones y choques. Terminología”.

También existen normativas y guías de severidad que se basan en amplitud y frecuencia. Son:

- i. La ISO 3945.
- ii. La ISO 2372-1974 “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operaciones entre 100 y 200 rev/s. Bases para La especificación de estándares de evaluación.” Se caracteriza por aplicarse a motores rotativos entre 600 y 1200 RPM, y por distinguir varios tipos de motores rotativos:

Clase	Equipos	Potencia	Otros
Clase I	Pequeños	15 KW	-
Clase II	Medios	15 a 75 KW	-
Clase III	Grandes	300 KW	Cimentación especial
		Sobre 75 KW	Cimentación rígida
		Sobre 300 KW	Cimentación especial
Clase IV	Turbo máquinas	-	RPM > velocidad crítica

Tabla 3-2 Tipos maquinas rotativas ISO 2372

- iii. La Carta de Rathbone es la primera guía aceptada con la que se desarrollan dos escalas logarítmicas en las que, a partir de la frecuencia y de las amplitudes, se puede sacar la severidad de la vibración. Sin embargo, presenta varias desventajas como la no consideración de tipo de máquina, potencia ni rigidez de los anclajes, pues solamente funciona con motores rotativos y no con los alternativos o los industriales. Igualmente, la carta de Rathbone está diseñada exclusivamente para rotativas de bajas revoluciones por minuto. Esto se debe a que, en sistemas con una misma amplitud, cuanto mayor frecuencia tenga el sistema, mayor severidad se le adjudica. La vibración a baja frecuencia no es peligrosa y es visible en las averías de los rodamientos que se producen a muy altas

frecuencias. Es por ello por lo que las amplitudes de baja frecuencia se miden en desplazamientos y las de alta frecuencia en velocidad o aceleración.

3.2 Criterios de selección de equipos y de técnicas a aplicar para la caracterización de los motores.

El equipo que se ha elegido para intentar desarrollar el plan de mantenimiento RCM ha sido el motor marino *Caterpillar C-18*, disponible por pares en las cuatro lanchas de Instrucción, emplazadas en la Escuela Naval Militar de Marín. Los criterios que se han llevado para realizar este trabajo en estos equipos han sido:

- Accesibilidad a los motores para su estudio, consulta de datos e información.
- El propio mantenimiento se lleva a cabo en la Escuela Naval y es extensible a cualquier barco de la Armada, por lo que un buen aprendizaje del mantenimiento en ella asegura una buena formación.
- Actual plan de mantenimiento es potencialmente muy bueno, pues nunca se ha intentado confeccionar un plan de estas características debido a la falta de herramientas y equipos.
- Posibilidad de inculcar a los futuros oficiales de la Armada la importancia del mantenimiento de los equipos, de una correcta obtención de datos y un buen procesamiento de ellos; sin desperdiciar información que pueda ser de gran relevancia y precisos pronósticos de tiempos de vida.

3.2.1 Selección de las técnicas a aplicar

Para gestionar este plan de mantenimiento RCM haremos uso de la guía del fabricante y recomendaciones, como el manual de lanchas. Las técnicas que usaremos para asegurar un buen mantenimiento RCM y una buena fiabilidad del producto serán:

- i. Mantenimiento preventivo o PMS a partir de las recomendaciones del fabricante.
- ii. Análisis de vibraciones con el fin de hallar futuros problemas.
- iii. Análisis de los gases de exhaustación, para determinar las buenas condiciones de combustión del motor.
- iv. Análisis de lubricantes, para verificar el estado de degradación actual del equipo.



Figura 3-1 Motor propulsión C18

3.2.2 Descripción motor Caterpillar C18

Las lanchas de instrucción montan dos motores *Caterpillar C-18*, aportados por la empresa *Caterpillar*, con distribuidora en Vigo, en cuyos astilleros se fabricaron las lanchas de instrucción *Rodman 66*. Estos motores se montan en las cuatro lanchas de Instrucción, entregadas a la Armada Española en 2006, siendo los motores por pares y hallándose un total de ocho. Podemos observar las características que forman este motor en el siguiente cuadro de características:

DATOS GENERALES

<i>Tipo de combustible</i>	Diesel
<i>Número de cilindros</i>	6 en línea
<i>Diámetro</i>	145 mm
<i>Carrera</i>	183 mm
<i>Cilindrada</i>	18,1 litros
<i>Relación de compresión</i>	16,3:1
<i>Aspiración</i>	Turboalimentado y Posenfriador aire-aire
<i>Refrigeración</i>	Circuito separado JW
<i>Velocidad y potencia al volante (sin ventilador)</i>	2100 rpm y 470 kWm
<i>Sentido de giro (desde el volante)</i>	CCW
SISTEMA DE ADMISIÓN	
<i>Volumen de aire de combustión</i>	43,8 m ³ /min
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	
<i>Volumen de agua incluido el radiador</i>	76 litros
<i>Volumen de agua sin radiador</i>	22 litros
<i>Potencia consumida por el ventilador</i>	14 kW
SISTEMA DE ESCAPE	
<i>Caudal de gases de escape</i>	22,6 m ³ /min
<i>Temperatura gases de escape</i>	522,4 °C
<i>Contrapresión máxima de escape</i>	10 kPa
SISTEMA DE COMBUSTIBLE	
<i>Temperatura máxima retorno de combustible</i>	38 °C
SISTEMA DE LUBRICACIÓN	
<i>Capacidad del cárter de aceite</i>	38 litros
<i>Tipo de aceite recomendado</i>	API CI-4 y normativa <i>Caterpillar</i> ECF-1
SISTEMAS AUXILIARES	
<i>Carcasa de volante</i>	SAE 1
<i>Toma de fuerza</i>	Brida SAE A, eje 11 dientes
<i>Toma de fuerza adicional</i>	Brida SAE B. Par máximo 237 Nm.
<i>Sentido de giro</i>	Contrario al sentido de giro del cigüeñal y 1,2 velocidad de giro
SISTEMA DE ARRANQUE	
<i>Tensión de baterías</i>	24 Vcc
CONDICIONES DE TRABAJO (Datos a 2100 rpm y 470 kWm)	
<i>Calor absorbido en agua de refrigeración</i>	160 kW
<i>Calor radiado</i>	124 kW
<i>Consumo de combustible</i>	131 l/h

Tabla 3-3 Cuadro características del motor [9]

El bloque motor está fabricado a partir de un molde con hierro fundido, contando como base de sustentación el propio barco, al que transmite las vibraciones producidas. El motor se subdivide en múltiples sistemas [16] [17] [18] [19]:

1- Sistema de refrigeración:

- Radiador, montado sobre motor, formado por dos núcleos: posenfriador (aire – aire) y refrigeración camisas (agua – aire) incorporando tanque de expansión que participa en el sistema de enfriamiento del sistema. Las lanchas de instrucción disponen de un circuito cerrado de refrigeración de agua dulce, que es enfriado continuamente por agua del mar, mediante el intercambiador de calor y por bombeo. Esta agua de mar previamente pasa por el posenfriador de aire, consiguiendo un mayor rendimiento térmico. Además, también se refrigera mediante el circuito de lubricación. Este sistema está formado por:
 - Bomba de agua centrifuga accionada por engranajes.
 - Enfriador de aceite.
 - Un termostato del agua que regula la temperatura del refrigerante del motor.
 - Bomba de agua auxiliar o un posenfriador de circuito separado (SCAC).
 - Posenfriador de agua de mar.
- El aceite lubricante del motor es suministrado por una bomba de engranajes, es enfriado y filtrado. Las válvulas de derivación proporcionan flujo continuo del lubricante a los componentes del motor [8].
- Ventilador aspirante accionado mediante correa trapezoidal.
- Camisa de cilindro que, genera un espacio entre ambos elementos que es la galería de refrigeración, que por tener este motor una camisa seca, se refrigera mediante el contacto con la fundición del bloque, que es donde se hace la refrigeración del motor.

2- Sistema de admisión:

- Turbocompresor, es la combinación de la tobera que acelera los gases de escape y el compresor de aire que utiliza la energía cinética de los gases de escape para comprimir los gases de entrada, consiguiendo una mayor concentración de oxígeno, más presión de admisión y una mejor mezcla de aire y combustible, que genera un mayor rendimiento del motor.
- Filtro de tipo seco, con dos elementos filtrantes e indicador de servicio para cambio de filtro, montado sobre motor.
- Compresor de aire, mecanismo que mediante la energía cinética de los gases de escape comprime los gases de entrada.

3- Sistemas de transmisión:

- Cigüeñal, situado en la parte inferior del bloque, que separa el cigüeñal del resto del bloque, al cual se le transmite la energía mecánica generada por la combustión.
- Árbol de levas, que es el elemento que sincroniza la apertura de las válvulas de admisión y escape de los gases procedentes de la combustión. Las válvulas están cerradas por defecto debido al muelle que las sujeta, y para abrirlas, se accionan sobre ellas una leva, que se encuentran sobre un eje paralelo al cigüeñal. Cada leva es accionada por el cigüeñal, que gira de forma inversa al eje del cigüeñal y con la velocidad reducida a la mitad. Este movimiento circular de las levas, que impactan en un elemento llamado taqué, y el

empujador va al balancín desde el taqué transmitiendo mediante los balancines un movimiento alternativo a las válvulas.

- Correa trapezoidal, transmite el movimiento del cigüeñal al árbol de levas, y a todo el motor, comúnmente denominado correa de distribución.
- Volante, elemento acoplado al eje de del cigüeñal, que es de una pieza en motores pequeños o dos en grandes y tiene como misión absorber el exceso de trabajo motor acumulado en forma de energía cinética y devolverlo cuando tienda a disminuir la velocidad de giro del motor, diseñado con un dentado en la llanta de la periferia para engranar el motor de arranque.

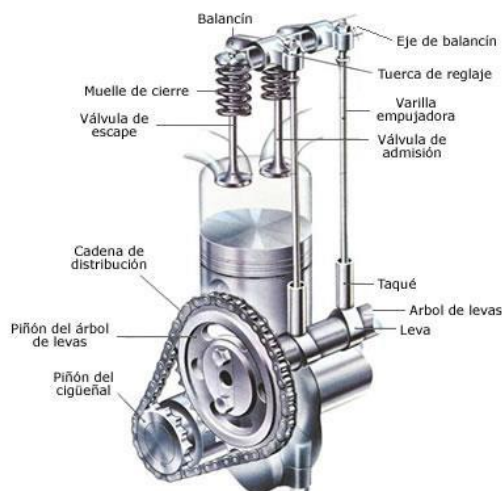


Figura 3-2 Representación funcionamiento apertura válvulas [9]

4- Sistema de lubricación:

- Cárter de aceite, que es el espacio entre la bancada y los cilindros donde se controla el nivel de aceite y desde donde se bombea el aceite a los elementos del motor a través de un circuito de lubricación (mediante las bombas de engranajes), proporcionando una lubricación y refrigeración necesaria en este tipo de motores. Se trata un cárter húmedo, que se diferencia de un cárter seco en que este no tiene un depósito aparte al cual redirigirse el aceite del cárter e impulsarse desde allí y está construido con una chapa soldada.
- Enfriador de aceite de lubricación con válvula de derivación.
- Filtro de aceite.
- Bomba de circulación de aceite de engranajes accionada por el motor.
- Aceite lubricante para primer llenado.
- Eliminación de gases.

5- Armazón:

- Base de la tapa de válvulas y mazo de cables por inyector.
- Culata de cilindros, parte del bloque motor.

6- Sistema de escape de gases:

- Colector escape seco.
- Tubo con salida frontal que redirecciona los gases al turbocompresor, accionando mecánicamente el compresor de aire que comprime los gases de entrada.

7- Sistema de arranque y carga:

- Motor arranque eléctrico de 24 Vcc.
- Juego de 2 baterías de arranque con soporte, cables y botellas de ácido para llenado.
- Alternador de carga de 24 V y 80 A.

8- Sistema de combustible:

- Filtro de combustible.
- Bomba de transferencia de combustible.
- Refrigerador de combustible.
- Bomba manual de cebado de combustible.
- Inyector de combustible, que junto a los inyectores unitarios electrónicos combinan la dosificación de combustible respecto a duración y sincronización, consiguiendo altas presiones de inyección. Es el módulo de control electrónico (ECM) el que controla la cantidad de combustible que se inyecta mediante señales eléctricas, al igual que proporciona un control preciso sobre la sincronización, porque varía según las condiciones de operación del motor, optimizando el rendimiento del motor para arrancar y minimiza el ruido. Gracias a las altas presiones de inyección, se consigue una reducción de consumo de combustible y de emisiones.

El avance de la sincronización se logra por medio del control preciso del encendido de los inyectores de los inyectores unitarios electrónicos. La velocidad del motor se controla ajustando la duración del encendido, y dispone de un sensor de velocidad/sincronización que proporciona información al módulo de control electrónico para detectar la posición del cilindro y la velocidad del motor [9] [10].

El uso de este tipo de inyectores electrónicos está muy extendido, en particular el uso del “common rail”, el cual se usa en los motores de las lanchas de instrucción, que consiste en un sistema colector de combustible a alta presión común a los inyectores de todos los cilindros, comprendida entre 400 y 2000 bar gracias a una bomba mecánica de alta presión. La apertura de las válvulas se consigue mediante pulsos eléctricos a través de solenoides, que permiten:

- Preinyección: mejora combustión y reduce el ruido.
- Postinyección: regula las emisiones en el escape.

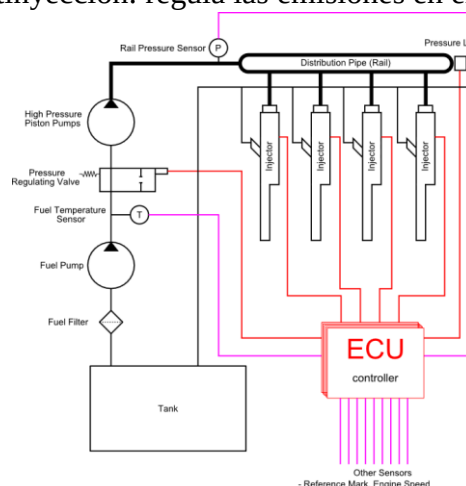


Figura 3-3 Esquema sistema inyección electrónica: common rail [11]

Anexo 1. Planos elementos bloque motor [12]. Se facilita una visión general del conjunto en la siguiente tabla en las que se puede observar el motor desde ambas perspectivas, junto a una leyenda en la que se indican los elementos a tener en cuenta para realizar una valoración global del motor.

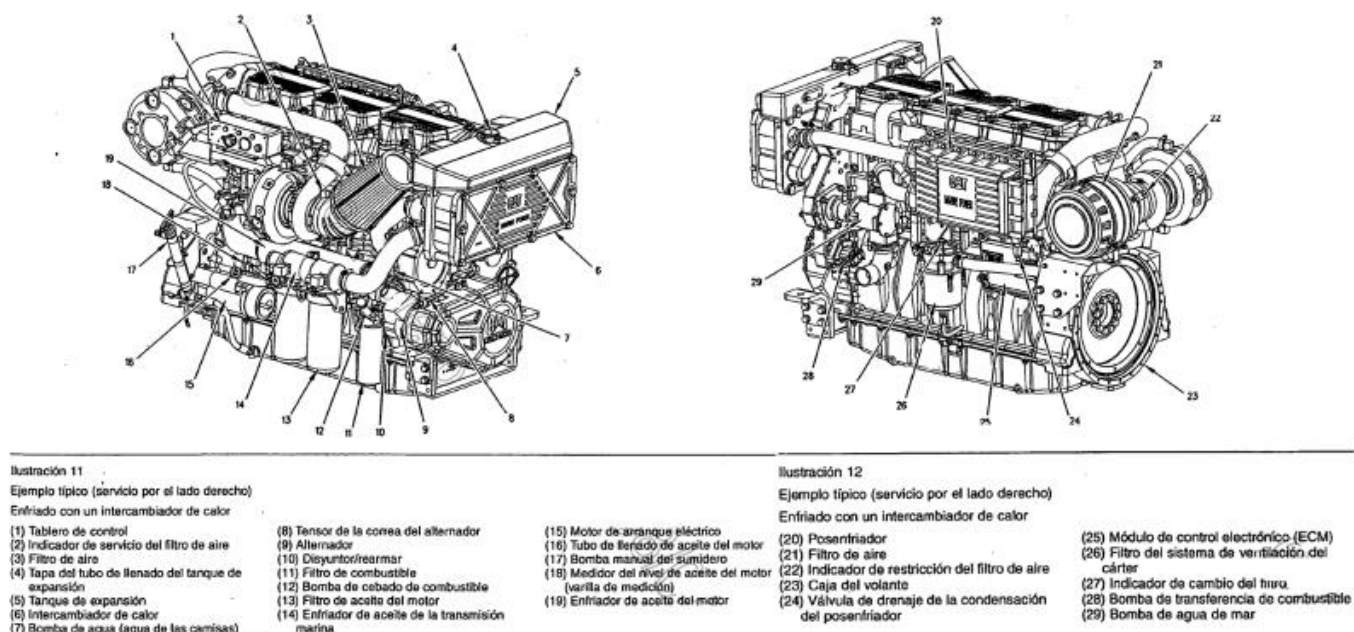


Tabla 3-4 Descripción general del motor *Caterpillar C18*

3.2.3 Diagrama teórico frente a diagrama real del motor

Para la numeración de los cilindros se sigue la norma UNE 10052-72 y la norma DIN 73021; desde el lado contrario al volante de inercia, que coincide con la salida de la potencia, siendo la numeración de los pistones de la siguiente manera (Figura 3-4 Numeración de las válvulas de admisión y escape (Elaboración propia)). El sentido de giro del motor es antihorario, desde el volante de inercia [11]. La disposición de las muñequillas se realiza en función del número de cilindros del motor, con el objetivo de compensar los impulsos motrices con respecto a la rotación de este. En cuanto al ángulo de separación coincide con la distancia entre encendidos que es:

$$\text{ángulo separación} = \frac{720^\circ}{n^\circ \text{ cilindros}} = 120^\circ$$

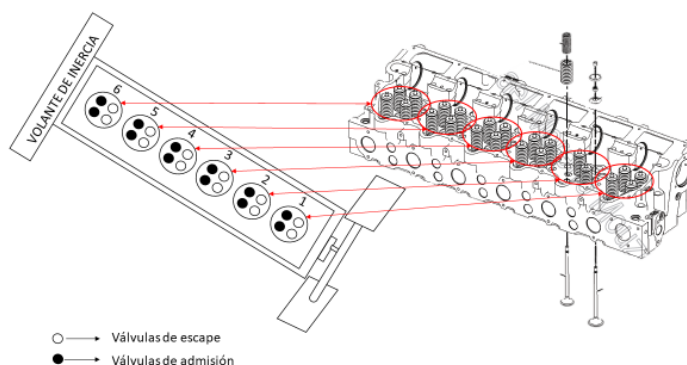


Figura 3-4 Numeración de las válvulas de admisión y escape (Elaboración propia)

También, sabemos según el fabricante que el orden de encendido de los pistones es 1-5-3-6-2-4, con un ángulo de encendido de 120° y que podemos graficar de la siguiente manera:

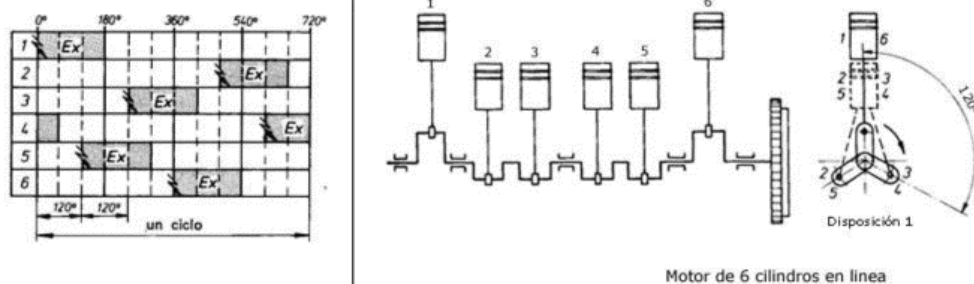


Figura 3-5 Disposición de muñequillas y orden de encendido [11]

El ciclo teórico del motor podemos dividirlo en cuatro tiempos:

- Admisión: recorrido del pistón desde el punto máximo superior (PMS) hasta el punto máximo inferior (PMI) en el que el aire entra al cilindro por la válvula de admisión, que está abierta hasta que el pistón llegue al PMI, que se cierra.
- Compresión: recorrido del pistón desde el PMI al PMS, con la válvula de aspiración cerrada (la de escape también) en la que la presión y temperatura se incrementa en un proceso adiabático.
- Combustión – expansión: recorrido desde el PMS hasta el PMI por segunda vez, en el que se produce la combustión en el PMS debido a la alta presión de la mezcla y se expande en un proceso isóbaro, dado que se compensa la entrada gradual de combustible con la expansión de la cámara, considerado adiabática.
- Escape: recorrido desde el PMI al PMS, en el cual los gases salen por la válvula de escape, abierta en el PMI, reduciéndose la presión de los gases hasta la presión de entrada, repitiéndose el ciclo.

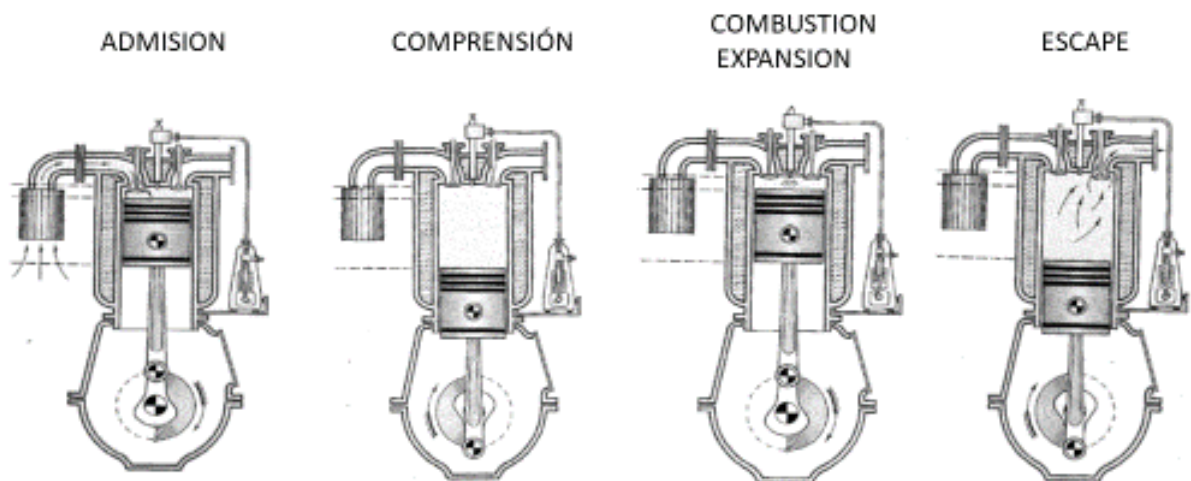


Figura 3-6 Representación del ciclo teórico pistón. (Elaboración propia a partir de [11])

Debido a que regulamos el motor mediante modificaciones según el funcionamiento, la búsqueda de la máxima eficiencia y la posibilidad de accionar las válvulas, y que, además, según el motor, se pueden adelantar o retrasar sus etapas, podemos llegar a la conclusión de que el ciclo real que seguirá este motor diferirá del ideal. La siguiente figura refleja esta característica:

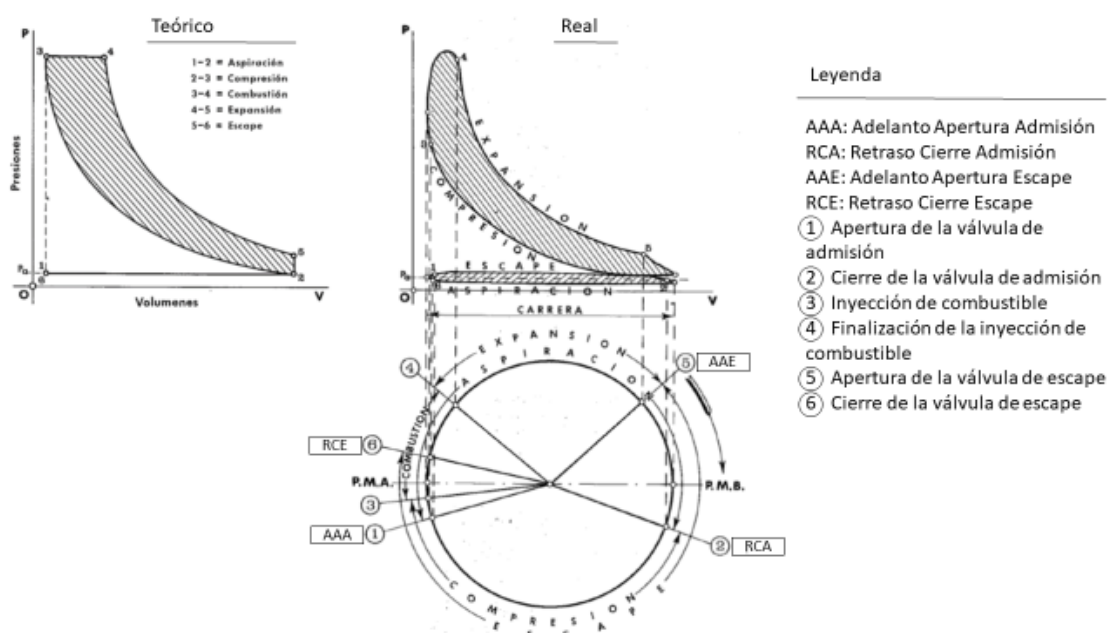


Figura 3-7 Diagrama circular ciclo del motor real frente a teórico

3.2.4 Datos parametrizados del motor que se evaluarán de la lancha.

El motor ofrece los siguientes parámetros de engranaje, mantenimiento y vigilancia:

Parámetros engranaje	Parámetro mantenimiento	Parámetro vigilancia motor
Velocidad baja en vacío y máxima de arrastre	Capacidad aceite motor	Baja presión de aceite del motor – Reducción de potencia
Relación Aire/Combustible	Modalidad indicadora de mantenimiento	Alta temperatura de refrigerante del motor- Reducción de potencia, punto de disparo
Sensor presión y temperatura de combustible	Factor corrección combustible	Alta temperatura de aire de admisión - Reducción de potencia, punto de disparo, demora
Sensor nivel refrigerante	Intervalo de mantenimiento Preventivo de Nivel 1	Bajo nivel de refrigerante – Advertencia/Reducción de potencia, demora
Sensor presión y temperatura del aceite de la transmisión		Alta temperatura del aceite de transmisión – advertencia, punto de disparo, demora
Numero motores sincronizados		Alta presión del aceite de la transmisión – Advertencia, punto de disparo, demora
Acelerador secundario		

Tabla 3-5 Parámetros del motor C-18

3.3 Plan de mantenimiento aportado por el fabricante

El programa de intervalos de mantenimiento que recomienda el fabricante se basa o en el consumo de combustible, las horas de servicio o el tiempo de calendario, lo que ocurra primero de las tres, decantará las acciones de reacción.

Programa mantenimiento recomendado por el fabricante

Cuando sea necesario

Desconectar Batería o cable de la batería
Calibración Calibrar el indicador aceite
Cebado Del sistema de combustible
Limpieza / reemplazar Colador de agua de mar
Comprobar almacenamiento motor
Inspeccionar sistema intercambiador de calor
Limpiar Motor
Limpieza Núcleo posenfriador
Reemplazar batería
Inspeccionar / reemplazar Varillas de cinc

Diariamente

Drenar Filtro primario del sistema de combustible o separador de agua
Inspeccionar Indicador servicio filtro de aire del motor
Inspeccionar Indicador servicio filtro de ventilación del cárter cerrado
Inspección máquina
Comprobar Nivel de aceite de la transmisión marina
Comprobar Nivel de aceite del motor
Comprobar Refrigerante del sistema de enfriamiento

Cada 50 horas / cada semana

Limpieza / inspección Colador de agua de mar
Inspeccionar y limpieza Válvula drenaje de condensador del posenfriador
Inspección / reemplazar Varillas de cinc

500 horas iniciales

Obtener (nivel 2) Muestra refrigerante del sistema de enfriamiento

500 horas de servicio

Obtener (nivel 1) Muestra refrigerante del sistema de enfriamiento

Cada año 250 horas de servicio / 14.400 litros

Cambiar Aceite y filtro motor
Comprobar y añadir Aditivo de refrigerante suplementario (CSA) del sistema de Enfriamiento
Drenar Agua y sedimentos del tanque de combustible
Inspeccionar rodete caucho Bomba agua
Inspeccionar, ajuste o reemplazar Correa alternador
Limpiar y reemplazar Elemento filtro del aire del motor
Reemplazar Filtro primario del sistema de combustible o separador de agua
Reemplazar Filtro secundario del sistema de combustible
Inspeccionar / ajustar Luz válvulas del motor
Limpiar Motor
Obtener Muestra aceite del motor
Obtener (nivel 2) Muestra refrigerante del sistema de enfriamiento
Comprobar Nivel de electrolito de la batería
Limpiar Respiradero del cárter
Inspeccionar / limpieza Válvula drenaje de condensador del posenfriador

PROGRAMA MANTENIMIENTO RECOMENDADO POR EL FABRICANTE

500 horas de servicio / 28.500 litros / Cada año

Cambiar Aceite y filtro motor

1.000 horas de servicio / 57.000 litros

Limpiar / probar Núcleo posenfriador

Reemplazar Filtro de eliminación de vapores del cárter (CCV)

Inspeccionar Turbocompresor

Cada 3000 horas de servicio / 170.400 litros

Inspeccionar Amortiguador vibraciones cigüeñal

Inspeccionar rodete de bronce Bomba agua

Inspeccionar Intercambiador de calor

Inspeccionar y ajustar Luz válvulas del motor

Inspeccionar Motor de arranque

Reemplazar Núcleo posenfriador

Añadir Prolongador de refrigerante de larga duración (ELC) para sistemas de enfriamiento

Cambiar Refrigerante del sistema de enfriamiento

Inspeccionar Rotaválvulas del motor

Comprobar, limpiar y calibrar Sensores velocidad / sincronización del motor

Inspeccionar Soportes motor

Reemplazar Termostato de agua del sistema de enfriamiento

Cada 5.000 horas de servicio / 284.000 litros

Inspeccionar Alternador

Inspeccionar Bomba agua

Reacondicionamiento general del extremo superior del motor

Cada 6.000 horas de servicio / 340.000 litros

Cambiar Refrigerante del sistema de enfriamiento

Cada 10.000 horas de servicio / 570.000 litros

Consideraciones de reacondicionamiento general

Inspeccionar, limpiar y apretar Prisionero a tierra de la culata

Tabla 3-6 Recomendaciones del fabricante

3.4 Análisis de radiación sonora con el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*

3.4.1 Introducción y equipo de mediciones acústicas

A modo introductorio, es necesario definir que es el sonido ya que los conceptos y parámetros acústicos de interés para el presente TFG:

- **Sonido:** es la combinación de la oscilación de *la velocidad de partícula* y las variaciones de presión respecto a la presión atmosférica. También se puede describir como el desplazamiento de una onda mecánica a través del aire.
- **Potencia sonora (W):** se define como la energía por unidad de tiempo que emite una fuente sonora. Es el origen de lo que se conoce como ‘sonido’ o ‘ruido’.
- **Presión sonora (N/m^2):** es la diferencia de presión producida por las variaciones oscilatorias de la presión derivados de la propagación de una onda en relación con la presión atmosférica. Estas variaciones oscilatorias de la presión se deben al desplazamiento de una onda mecánica que se propaga a través del aire. Su magnitud depende de la potencia sonora, de la distancia al foco acústico y a las condiciones ambientales. El oído humano reacciona frente a estas variaciones de presión, que es lo que nos permite oír.
- **Intensidad sonora (W/m^2):** magnitud vectorial que indica el nivel de energía que fluye a través del espacio y en función del tiempo, coincidiendo con la dirección de propagación de las ondas. Representa, a grandes rasgos, la cantidad de energía, la dirección y el sentido; a diferencia de la presión sonora, que no es vectorial. Sin embargo, este parámetro acústico también se ve afectado por la distancia al foco sonoro y las condiciones físicas del entorno.
- **Velocidad de partículas:** es el origen del desplazamiento de las ondas mecánicas que se propagan a través del aire, pues este desplazamiento se debe al movimiento de las moléculas de aire debido a los esfuerzos producidos en el medio de propagación, que, a su vez, se deben al movimiento de partículas que colisionan con las partículas vecinas, y así sucesivamente.

Existe una relación entre los parámetros acústicos, pues donde la presión es máxima, la velocidad es cero, y viceversa. Por lo que, cuando se evalúan las condiciones de un campo acústico muy cerca de una superficie que está radiando (por ejemplo, un motor en estudio), *la velocidad de partículas* de esa superficie tiene su máxima variación, y la *velocidad de partícula* del ruido de fondo es cero, debido a que la presión sonora del ruido es máxima.

Además, la *velocidad de partículas* es el parámetro de estudio principal frente a la *presión sonora* en campo cercano debido a que, es muy eficaz en detección de focos sonoros, pues es muy sensible hacia la captación de movimiento radiado por la fuente, pero no por reflexiones en el entorno ya que no producen vibración en el elemento, aunque si contribuyen a la presión sonora. Esto nos ayuda a medir en ambientes cerrados en los que existe gran reflexión de sonidos, y es una de las mayores ventajas que ofrece trabajar con *velocidad de partícula* [20]. Véase la siguiente figura.

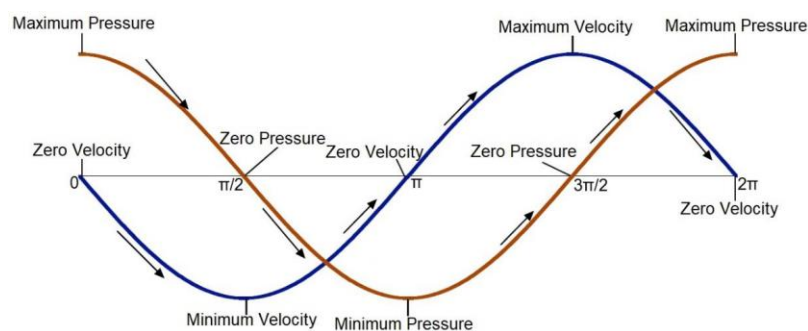


Figura 3-8 Variación de presión acústica y velocidad de partículas para un tono puro [22]

Para mejorar el mantenimiento, y optimizar la filosofía RCM al máximo, se ha decidido realizar un análisis de características acústicas derivadas de la radiación (vibración sonora) de los motores en los dos regímenes de funcionamiento. Para las medidas acústicas se utiliza la técnica desarrollada por el equipo acústico avanzado *Scan & Paint*, adquiriendo la información acústica necesaria para elaborar los mapas sonoros. Este nuevo método es un derivado de las técnicas de escaneo que durante años han estado en el mercado, pero que hasta ahora han sido poco utilizadas debido al alto coste de los sistemas de posicionamiento de los sensores y a sus altas limitaciones a la hora de evaluar distintos entornos.

El equipo *Scan & Paint 2D* permite graficar campos sonoros estacionarios con una alta resolución, aportando:

- Los parámetros acústicos derivados de un foco sonoro como son la velocidad de partículas, la intensidad del sonido y la presión del sonido.
- El coeficiente de pérdida de transmisión (disponible con el módulo TL) para detectar la existencia de elementos constructivos con pérdidas de aislamiento o con “fugas” acústicas.
- El coeficiente de absorción sonora de materiales (disponible con el complemento de absorción in situ).

Todo ello se consigue mediante la utilización de una sonda en el ancho de banda comprendido entre 20 Hz – 10 KHz. Esta herramienta es capaz de escanear un sólido, realizar un mapa sonoro general del elemento y procesar el mismo para el rango de frecuencias elegido por el usuario; de manera que se puede detectar distintas averías para las distintas frecuencias de operación, cuyo proceso sería muy complicado sin este equipo acústico. El sistema es una excelente herramienta de ingeniería para la resolución de problemas o la evaluación comparativa de todo tipo de objetos. Solo lleva unos minutos completar la medición. Los resultados del escaneo son traducidos por el software en un mapa de color, superpuesto en una fotografía del foco sonoro medido, lo que permite encontrar, por ejemplo, el origen de un ruido anormal [20].



Figura 3-9 Representación sistema *Scan & Paint* [20]

El equipo de acústica avanzada *Scan & Paint* consta de los siguientes elementos:

- Cámara, que incorporada en el software graba la toma de datos con el equipo para después sincronizar el video y tales datos.
- Módulo de adquisición de datos, que comunica el ordenador con el software y el equipo.
- Acondicionador de la señal “MFPA-2”, que trata la señal transmitida por el sensor PU.
- Sensor ‘PU’ compuesto por el sensor ‘*Microflown*’ y el micrófono.

La sonda ‘PU’ utilizada es una combinación de dos sensores:

- El sensor *Microflown*: un transductor basado en sistemas micro electromecánicos (SMEM), capaz de medir directamente la velocidad de las partículas acústicas. El elemento sensor consta de dos alambres ultradelgados. Estos cables son resistencias de platino que actúan como sensores de temperatura. Son alimentados por una corriente eléctrica que hace que se calienten. Las variaciones locales de temperatura provocan

cambios en la resistencia de los cables. Cuando la velocidad de las partículas acústicas (sonido) se propaga a través de los cables, altera asimétricamente la distribución de la temperatura alrededor de las resistencias (cables). La diferencia de resistencia resultante proporciona una señal lineal de banda ancha (20 Hz hasta, al menos, 10 kHz) con una directividad en forma de ocho, que es proporcional a la velocidad de las partículas acústicas.



Figura 3-10 Sensor ‘Microflow’ [20]

- El micrófono: que se encarga de medir la presión sonora en los distintos puntos. Posee una membrana que reacciona a las diferencias de presión sonoras, convirtiéndolas en señales eléctricas mediante un transductor.

3.4.2 Conceptos de interés del Scan & Paint

Como se ha explicado, la técnica consiste en captar las señales acústicas mediante el movimiento manual de un transductor (en este caso la sonda PU), al mismo tiempo que se va grabando la toma de datos. En la etapa de postproceso, la posición del sensor se extrae aplicando detección automática de color a cada fotograma del video. Es, entonces, posible aplicar dos métodos distintos de mapeo:

- Método por cuadrícula:** consiste en la asignación de los puntos de referencia tomados para la medición a distintas cuadrículas de la imagen, fijadas para la representación visual del campo sonoro. Esta discretización del espacio se consigue mediante un algoritmo, que asigna las posiciones detectadas mediante el seguimiento automático de la sonda a las cuadrículas en las que se divide la imagen (véase Figura 3-11 Representación del proceso de discretización espacial). Hasta este punto solo se ha trabajado en 2D, pero la sonda tiene coordenadas 3D, por lo que hay que redefinir una relación entre estas coordenadas y los píxeles y metros del plano en el espacio; de modo que, si no se coloca la cámara de manera perpendicular al área medida, puede dar lugar a errores de posicionamiento. Además, un micrófono de referencia fija puede ser utilizado para preservar la información relativa de la fase a través del campo sonoro en las diferentes posiciones de la cuadrícula. La ubicación de este plano común debe asignarse a una posición que tenga un alto grado de linealidad con el área de medición cubierta, obteniéndose altos valores de coherencia.

- ii. **Método por puntos:** este método resulta más simple de entender, no se realiza ninguna discretización espacial de las medidas, si no que a cada medición tomada se le asignan unas coordenadas. Es distinto porque, a diferencia del anterior, no “comprende” las medidas tomadas alrededor y, al representarse, pueden existir incoherencias en áreas pequeñas del plano medido que no ocurrirían en el método por cuadrículas [21].

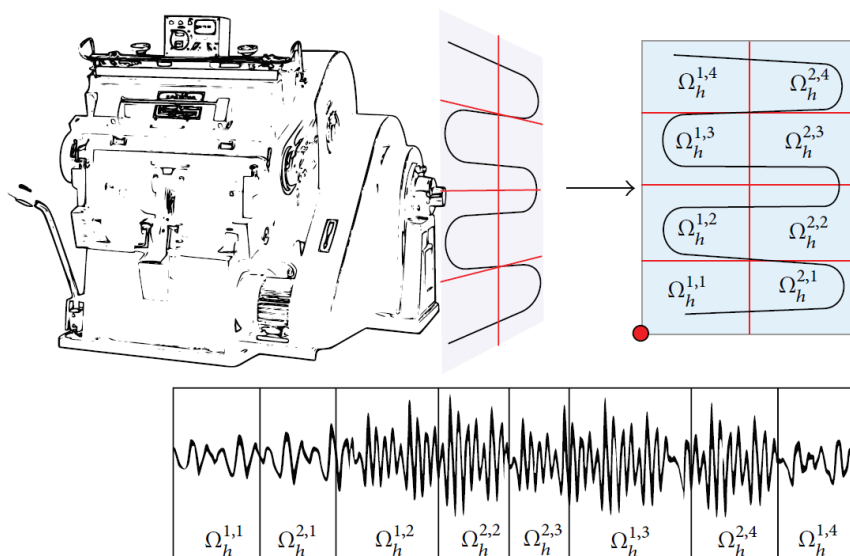


Figura 3-11 Representación del proceso de discretización espacial [21]

3.4.3 Secuencia de actuación

Para la medida de datos acústicos derivados de la radiación sonora del motor se han contemplado dos situaciones operativas del motor de la lancha de instrucción. La primera para el motor sin carga y a mínimas revoluciones, y la segunda para el motor en carga y con rango de revoluciones entre 800 - 1000 RPM. Se ha decidido así ya que, en caso de existir algún defecto, y no observarse con 600 RPM, saldrá a la vista nada más se suba revoluciones y se aumente el porcentaje de carga.

Se organizaron dos salidas de lanchas, una en la mar con el uso práctico habitual de las lanchas por parte de los alumnos, y otra en puerto. El objetivo de esta medida de datos es sacar una huella acústica de los motores para que se pueda utilizar en adelante como referencia de comparación de valores; de manera que cuantas más mediciones se hagan a lo largo del tiempo, más útil se volverá esta técnica, y adelantar posibles averías o desgaste del motor asociados a picos de frecuencia observados en esta huella acústica inicial de referencia.

Para el montaje del equipo, simplemente se han de conectar cámara y el módulo de adquisición al ordenador, el sensor PU al “MFPa-2” y conectar ambas CPU, como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 3-12 Montaje equipo

En rasgos generales, para la medida de datos acústicos, se decidió colocar el equipo sobre los motores que se encuentran frente al motor en estudio. Igualmente, para hacer más fácil la detección automática, se utilizó la pantalla antivientos roja alrededor de la sonda. Para iniciar las medidas, solo hay que comprobar lo siguiente:

- Disponer del ordenador con el software indicado “*Microflown Vela*”, ejecutarlo como administrador y abrir el *Scan & Paint*. Se debe encender una luz verde de comprobación en el módulo de adquisición de datos y abrir la pestaña principal de *HW Setup*.
- Conectar la cámara al ordenador y comprobar la sincronización (se recomienda conectar al principio) mediante la visualización (*advanced settings*) o en la pestaña principal “captura”.
- En “*Analog-Input*”, pestaña “*input adapter*”, elegir “*Dtol*”, para extraer el sonido del micrófono (y no ‘*windsound*’, que corresponde a la tarjeta sonido del ordenador).
- Modificar los parámetros atmosféricos si es necesario.
- Introducir los parámetros y números de serie de la sonda PU.
- Nos movemos a la pestaña de “*Captura*”, comprobamos visualmente que esta todo en orden, y pulsamos “*medir*”.

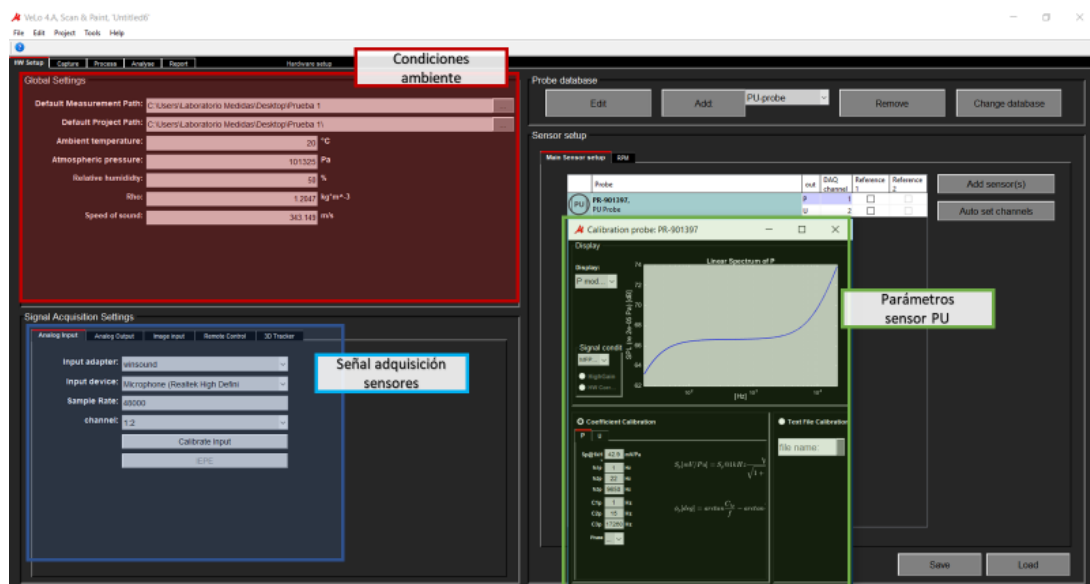


Figura 3-13 Interfaz software *Microflown Vela*

3.5 Espectros. Casos prácticos de interpretación

Para iniciarnos en el contexto de los espectros de frecuencia, conceptos necesarios pues los aporta el equipo de medidas, se exponen y analizan a continuación casos prácticos de espectros de una motobomba para su entendimiento, derivados de la fuente bibliográfica [5].

3.5.1 Desequilibrio estático o dinámico

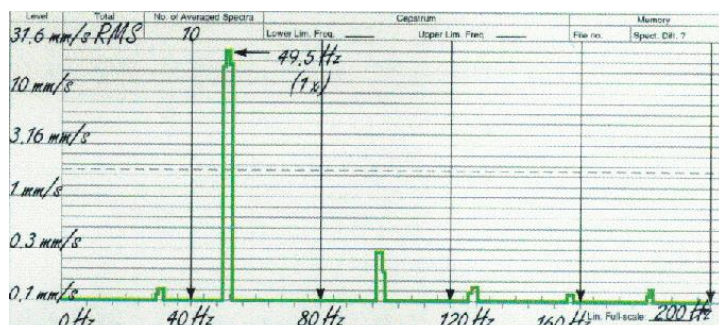


Figura 3-14 Desequilibrio estático

Se puede observar un pico de 28 mm/s correspondiente a la frecuencia 49,5 Hz, correspondiente a la velocidad de rotación de la motobomba. Se entiende radial por la repetición desfasada, y se suele asociar con las frecuencias de giro del rotor.

3.5.2 Desalineación del grupo

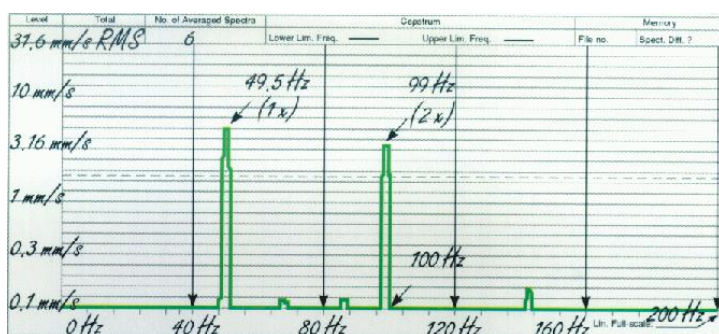


Figura 3-15 Desalineación del grupo

El equipo rotativo, cuya frecuencia de giro es 49,5 KHz (1x) presenta un armónico de primer grado con un pico de 3,5 mm/s al doble de la frecuencia de giro (2x). Este nivel de vibración radial no se considera admisible. Se suele asociar con armónicos 2x y 3x

3.5.3 Motobomba desalineada

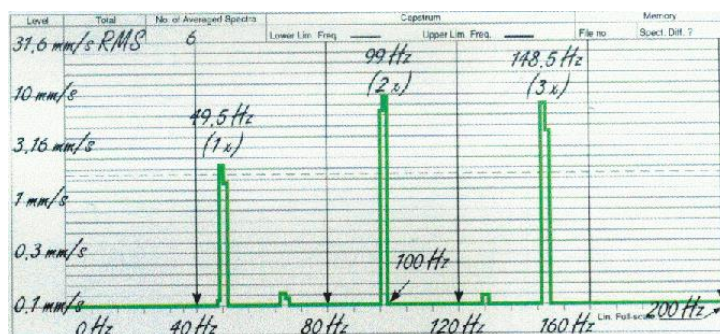


Figura 3-16 Motobomba desalineada

Existen picos de vibración radial, con armónicos de primer (2x) y segundo grado (3x) muy elevados en comparación con el desequilibrio (1x), que es razonable. Análogamente a la Desalineación del grupo, asociamos este defecto tanto en el armónico 2x o 3x.

3.5.4 Holguras mecánicas en la bancada. Fijación bancada floja

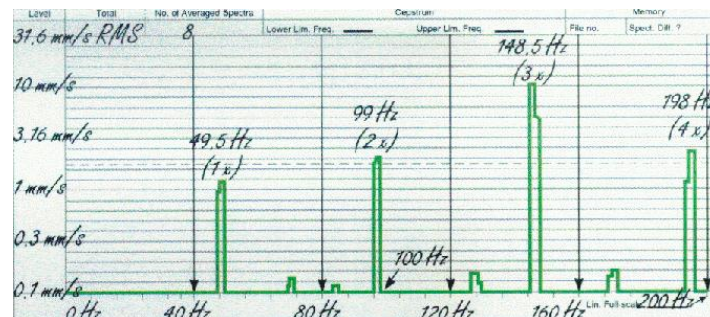


Figura 3-17 Holguras mecánicas en la bancada. Fijación bancada floja (I)

En este caso, aparecen armónicos de hasta tercer grado (4x), destacando el segundo (3x). Se asocian muy frecuentemente a las desalineaciones o acoplamientos dañados, es decir, a todos los armónicos de todas las frecuencias de giro del rotor.

3.5.5 Apriete bancada

Basándose en el análisis anterior Holguras mecánicas en la bancada, se decidió apretar equivalentemente los pernos de apriete a la cimentación, dando el siguiente resultado.

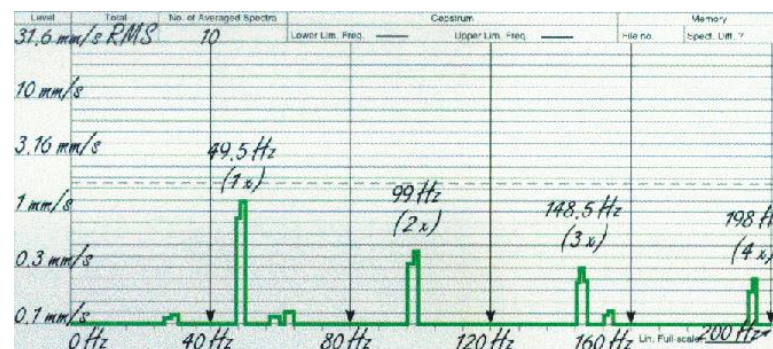


Figura 3-18 Apriete bancada (I)

Los armónicos descienden totalmente, sin embargo, el desequilibrio del conjunto no varía, pero se considera de nivel aceptable.

3.5.6 Rozamiento

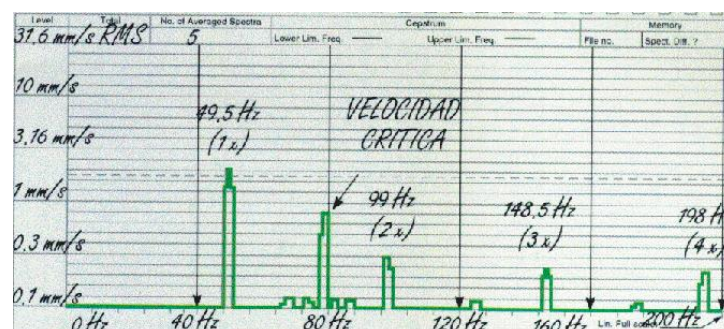


Figura 3-19 Rozamiento

Se tienen en cuenta las frecuencias naturales de flexión más bajas (frecuencias críticas) de un rotor, pueden servir de ayuda para la detección de fenómenos de rozamiento entre rotor y estator.

Los rozamientos son característicos por tener picos forzados sin relación alguna en las frecuencias obtenidas. Por ejemplo, como se ve en la figura, esa frecuencia de 80 Hz no corresponde con ninguna armónica, si no con la frecuencia de flexión del rotor de la bomba.

3.5.7 Rodamiento dañado

Una técnica de diagnóstico de rodamientos es la observación de la alta frecuencia. Si no hay frecuencias de vibración forzadas, que son las que se asignan a los armónicos, en esas altas frecuencias (engranajes, paso de álabes o turbinas), la existencia de picos se debe seguramente a defectos en los rodamientos.

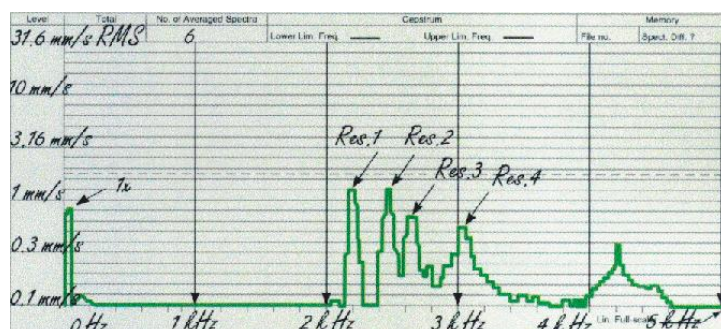


Figura 3-20 Rodamiento dañado I

En la primera imagen, se mostraba un rodamiento dañado con picos entre 2 y 3,5 KHz.

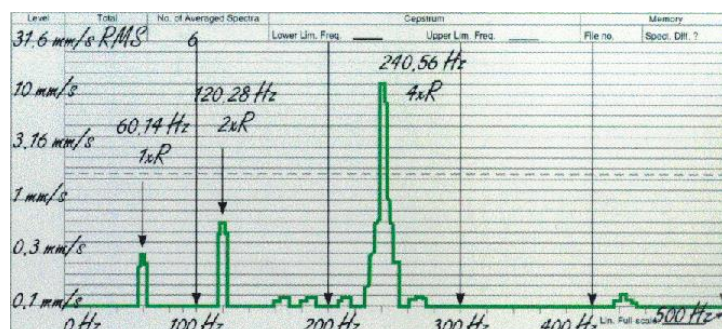


Figura 3-21 Rodamiento dañado II

Para calcular el espectro de un rodamiento dañado, basta con calcular la frecuencia de paso de bola respecto a la parte interior del rodamiento, al igual que la frecuencia de giro de la bola. EL rodamiento puede presentar hasta armónicos de cuarto grado, el cual es muy elevado en la imagen

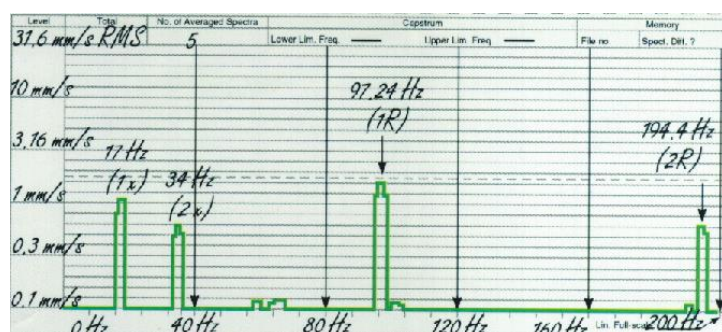


Figura 3-22 Rodamiento dañado III

3.6 Análisis de los gases de exhaustación

3.6.1 Introducción y datos de fábrica.

Como se ha indicado anteriormente en el Análisis de gases de exhaustación del motor, se usará esta técnica de mantenimiento predictivo con el fin de incorporarlo al plan de mantenimiento de las Lanchas de instrucción. El objetivo de estas mediciones es la elaboración de tablas para un breve análisis del que poder sacar conclusiones de funcionamiento. Estas tablas se basarán en los datos obtenidos mediante la toma de medidas en las múltiples salidas que se han efectuado en las lanchas de instrucción y de los datos ofrecidos por los displays disponibles en las lanchas de instrucción.

Antes de entregar las lanchas a la ENM, fueron sometidos a pruebas de fábrica con las que se han elaborado distintas tablas de funcionamiento. Para la tabla de emisiones se aportarán los siguientes datos:

Velocidad RPM	Potencia kW	Par Nm	Consumo específico g/kWh	Consumo combustible l/h
2100	470	2137	233,8	131,0
2000	470	2244	229,9	128,8
1900	470	2362	224,5	125,8
1800	470	2493	218,9	122,6
1700	465	2611	214,5	118,8
1600	455	2714	212,5	115,2
1500	441	2807	211,4	111,1
1400	422	2879	210,7	106,0
1300	387	2842	210,3	97,0
1200	309	2457	211,3	77,8
1100	258	2243	214,4	66,0

Tabla 3-7 Datos de potencia-par-consumo de combustible [14]

RPM	2100	2100	2100	2100	2100
% carga	100	75	50	25	10
Potencia motor kWm	470,0	352,5	235,0	117,5	47,0
NOx (mg/Nm ³)	1.237,1	838,3	692,5	1.483,0	1.800,3
CO (mg/Nm ³)	190,2	184,5	212,4	644,7	1.203,4
HC (mg/Nm ³)	16,8	28,5	45,1	56,7	132,7
Partículas(mg/Nm ³)	24,8	32,3	51,5	125,0	134,0
% O2 en escape	10,50	12,00	14,00	15,20	16,90

Tabla 3-8 Emisiones (valores nominales) [14]

RPM	2100	2100	2100	2100	2100
% carga	100	75	50	25	10
Potencia motor kWm	470,0	352,5	235,0	117,5	47,0
NOx (mg/Nm ³)	1.336,1	905,4	747,9	1.601,7	1.944,4
CO (mg/Nm ³)	355,6	345,0	397,2	1.205,6	2.250,3
HC (mg/Nm ³)	31,8	53,8	85,3	107,1	250,8
Partículas(mg/Nm ³)	48,3	63,0	100,4	243,8	261,4
% O2 en escape	10,50	12,00	14,00	15,20	16,90

Los valores de emisiones dados en mg/Nm³ están referidos al 5% de O₂.

Tabla 3-9 Emisiones (valores garantizados) [14]

3.6.2 Generalidades de las medidas

Como se puede ver, la guía de emisiones aportada por *Caterpillar*, clasifican los siguientes niveles de emisiones mediante dos parámetros: *revoluciones y porcentaje de carga de la máquina*. Estas pruebas se deben hacer en un ambiente controlado con una maquinaria muy específica, que no están disponibles para uso propio. El problema reside en que, teniendo solo esa tabla de comparación, no es posible elaborar una con el fin de comparar; ya que lo único que somos capaces de variar son las revoluciones del motor, puesto que el porcentaje de carga del motor viene determinado por la resistencia hidrodinámica y de empuje que tiene la lancha.

Sin embargo, es bueno saber qué *porcentaje de carga* guarda el motor. El diseño de los motores siempre se hace teniendo en cuenta que el mayor rendimiento de un motor se genera para un porcentaje de carga del 85%, de manera que el rendimiento en ralentí es mínimo y a medida que va mejorando la carga va mejorando la eficiencia, hasta llegar al 85%, donde empeora progresivamente. Se quiere comprobar si estos datos tienen repercusión en los gases de escape del motor, e implementarlo como un posible nuevo síntoma que prevenga de futuros errores. Antes de comenzar los cálculos de *carga del motor* se va a definir en que consiste ésta exactamente.

La *carga motor* es equivalente al *par motor* que tiene que administrar un motor para vencer una resistencia que se opone a su movimiento. En términos más simples, el motor de un coche puede trabajar a 2000 revoluciones, que no es lo mismo hacerlo en una cuesta que en una superficie plana, es decir, quizás es suficiente 2000 rpm en superficie plana para lograr una velocidad de 40 km/h mientras que, en una cuesta, podemos observar que el motor no puede ofrecer tanta potencia y que tenemos que acelerar (meter más combustible) para que el coche no se pare. Bien, eso es porque a esas revoluciones, el coche no ofrece suficiente par motor como para vencer esa resistencia, pero si en vez de a 2000 rpm estamos a 3000 rpm, resulta que no solo se ahoga, sino que acelera, eso es porque a esas revoluciones, el motor tiene suficiente par motor para vencer esa resistencia. Básicamente, lo importante es la forma de la curva del par motor, que sea lo más llena posible y que se alcance a bajas revoluciones, altos picos de torque.

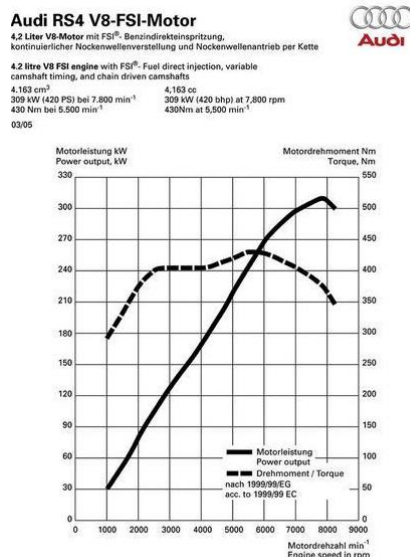


Tabla 3-10 Gráfica motor del Audi RS4

Como podemos ver en la gráfica anterior, hay dos curvas, la relativa a la *potencia*, y la del *par motor*. Este motor se considera bueno debido a lo “llena que está” la curva del par motor; es decir, el par motor que ofrece a 1000 rpm es muy considerable. En caso de que el coche se encuentre en una pendiente de subida que le esté ofreciendo una resistencia mayor al par motor, solo tiene que subir a 2000 rpm, para vencer esa resistencia y no ahogar el motor.

En el caso de las lanchas de instrucción, esta carga motor depende únicamente de la cantidad de combustible usado en cada combustión. Calcular la carga del motor resulta muy similar a calcular el rendimiento del motor. Por ello, independientemente de todos los datos que tengamos (temperaturas, caudales de agua, refrigeración, etc.), técnicamente para relacionar revoluciones y potencia solo podemos emplear la variación de presión demandada por el circuito, que se puede relacionar con el rendimiento del turbocompresor. Pues la presión que demanda el turbocompresor y la presión de los gases de escape que accionan la turbina de éste pueden ser claves para el cálculo final. Entonces, teniendo las presiones de aire a la entrada, y a la salida del turbocompresor, se puede calcular ese rendimiento del turbo, que podemos extrapolar al porcentaje de carga del motor en general. No obstante, si el motor da el porcentaje de carga en la pantalla de datos, al igual que hace el motor de la lancha de instrucción, se utilizará preferentemente.

Ahora que se ha explicado la primera parte de la elaboración de la tabla, se complementará con los porcentajes de emisiones extraídos según el régimen de revoluciones. Para ello se hará uso del equipo “Testo 340”. Se trata de un analizador de combustión móvil con sensores de O₂, CO, NO, NO₂ y SO₂, y una sonda que hacen su transporte y manejo, fácil y sencillo. Ni las altas concentraciones de gas, ni el alto contenido de humedad son problema para esta sonda, dado que tiene un amplio rango de medición y un depósito de agua para ir depositando las posibles condensaciones de los gases analizados.

Medición de CO (con compensación de H₂)

Rango	0 hasta 10000 ppm
Exactitud	±10 ppm o ±10 % del v.m. (0 hasta 200 ppm) ±20 ppm o ±5 % del v.m. (201 hasta 2000 ppm) ±10 % del v.m. (2001 hasta 10000 ppm)
Resolución	1 ppm
Tiempo de respuesta t ₉₀	< 40 s

Medición de O₂

Rango	0 hasta 4000 ppm
Exactitud	±5 ppm (0 hasta 99 ppm) ±5 % del v.m. (100 hasta 1999 ppm) ±10 % del v.m. (2000 hasta 4000 ppm)
Resolución	1 ppm
Tiempo de respuesta t ₉₀	< 30 s

Medición de NO bajo

Rango	0 hasta 300 ppm
Exactitud	±2 ppm (0 hasta 39,9 ppm) ±5 % del v.m. (Resto rango)
Resolución	0,1 ppm
Tiempo de respuesta t ₉₀	< 30 s

Medición de NO₂

Rango	0 hasta 500 ppm
Exactitud	±10 ppm (0 hasta 199 ppm) ±5 % del v.m. (Resto rango)
Resolución	0,1 ppm
Tiempo de respuesta t ₉₀	< 40 s

Medición de SO₂

Rango	0 hasta 5000 ppm
Exactitud	±10 ppm (0 hasta 99 ppm) ±10 % del v.m. (Resto rango)
Resolución	1 ppm
Tiempo de respuesta t ₉₀	< 40 s

Tabla 3-11 Características Testo 340

4 DATOS DE REFERENCIA OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE LAS LANCHAS PARA SU EMPLEO EN PLAN DE MANTENIMIENTO DISEÑADO

4.1 Huella acústica del motor

4.1.1 Motor Babor Lancha de Instrucción A-123

Mediante el software “*Microflown Vela*” se procesaron todos los datos obtenidos de las mediciones sonoras y se realizó una comparativa, entre las mediciones en puerto, con cero porcentaje de carga en 600 rpm, y las mediciones en navegación, con un porcentaje de carga variable entre 30 - 50% y revoluciones entre 800 y 1000 rpm.

- a. Imágenes corresponden a la vista frontal del motor (desde crujía)

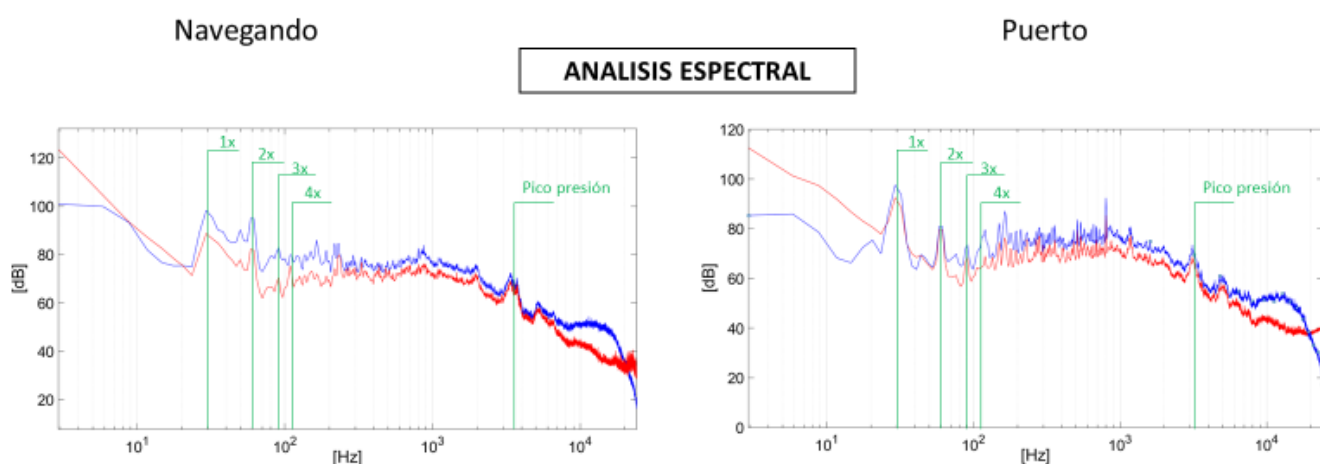


Figura 4-1 Comparativa espectro de frecuencias (vista frontal)

El espectro de frecuencias es el dato más importante en el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, pues es la primera gráfica que se consigue y de la que interpretamos las causas de los picos; para sacar, a continuación, las representaciones de velocidades de partículas sobre la imagen. En estas gráficas se representa tanto la *presión sonora* (línea azul) como la *velocidad de partículas* (línea roja) parámetro en el que se fijarán los análisis.

Analizando el espectro de la derecha, que se corresponde al del motor a 600 rpm y cero carga motor, se derivan varios datos de interés:

- i. Para 600 rpm en un motor de cuatro tiempos corresponde un total de 300 ciclos, y por cada ciclo corresponden dos vueltas de cigüeñal.
- ii. Mediante la siguiente formula, se sabe que la frecuencia con la que cada pistón combustiona es de 30 Hz. Esto no quita en una revolución en realidad haya 3 combustiones producidas cada 10 Hz, pero esto es en el dominio del tiempo, y se está trabajando en dominio de la frecuencia.

$$\text{Frecuencia de operación} = \frac{600 \text{ ó } 800 \text{ (rpm)} \times n^{\circ} \text{ pistones}}{60 \times 2 \text{ (motor 4T)}}$$

Por tanto, podemos indicar que los picos de frecuencia que se estudiaran detalladamente serán los de la frecuencia de operación (1x) y los múltiplos de la misma (denominados armónicos): teniendo los de primer (2x), segundo (3x) y tercer (4x) grado y los que sean anormalmente grandes.

Analizando la Figura 4-1 Comparativa espectro de frecuencias (vista frontal se observa que no existe gran diferencia entre ambos regímenes de trabajo, por lo que es un indicativo del buen funcionamiento de la máquina. De hecho, se puede apreciar como se atenúa la señal en el régimen de navegación, posiblemente debido a las altas temperaturas que alcanza el motor (del que deriva la dilatación que hace que trabaje con menos holguras mecánicas). No obstante, existe una frecuencia de 800 Hz en el régimen de puerto que se debería comprobar si permanece en análisis posteriores.

Igualmente hay que estudiar la aparición de los armónicos en los espectros anteriores[24], [5]:

- Primer armónico (2x): situado en la frecuencia de los 60 – 80 Hz, es derivado de un posible desequilibrio, dado que el pistón en una revolución se ha desplazado dos veces. Es de amplitud reducida en el régimen de puerto, pero al aumentar las revoluciones, se sitúa al mismo nivel que la intensidad sonora producida por las combustiones, por lo que puede ser síntomas de desgaste de cojinetes a largo tiempo.
- El segundo armónico (3x): situado en la frecuencia de 90- 110 Hz, puede ser derivado de un posible desalineamiento, dado que una revolución (combustionan tres pistones con un desfase de 120°) provoca pequeños movimientos en el eje. Sin embargo, al aumentar las revoluciones, aumenta la inercia de la máquina y éstos se reducen; por lo que no es un problema a tener en cuenta.
- El tercer armónico (4x): puede deberse a posibles holguras mecánicas existentes en todos los motores térmicos. Además, son reducidos y no tienen que significar aspectos a considerar.
- Pico de presión: los picos presentes en todos los espectrogramas de frecuencia, visibles en el rango de 2000 – 5000 Hz se deben a las oscilaciones de presión entre la cámara de precombustión y el espacio en el cilindro por encima del pistón. Su frecuencia, que es constante, es determinada por el volumen de la cámara y las dimensiones de la garganta. Estas oscilaciones tienen un considerable efecto sobre las características del ruido emitido por el motor. Es algo normal y que no indica ningún defecto.

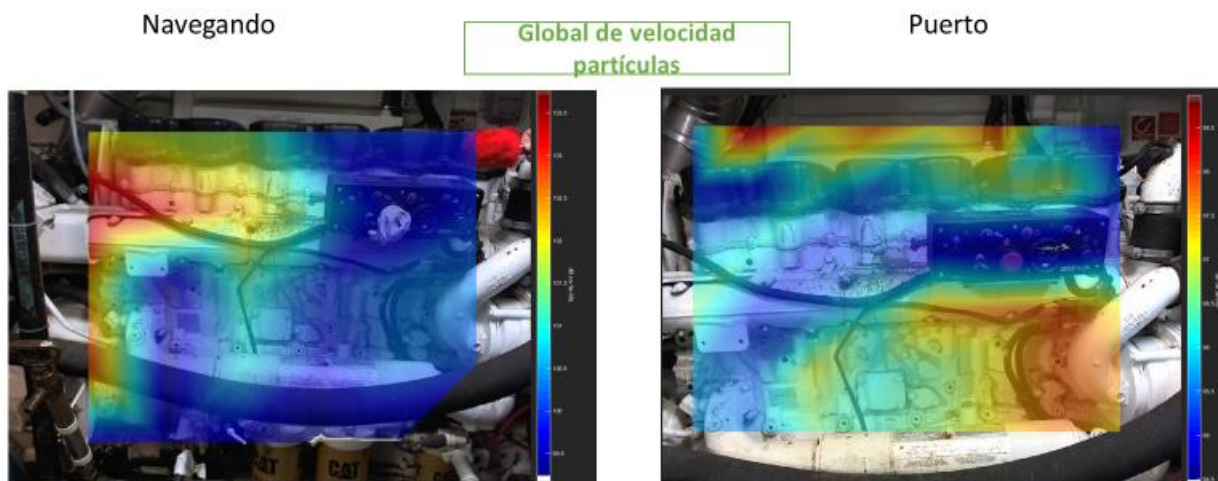


Figura 4-2 Comparativa representación de la velocidad de partículas (vista frontal)

En esta imagen, se observa la representación del parámetro acústico *velocidad de partículas* para todo el espectro de frecuencias que se puede analizar con el equipo *Scan & Paint*.

En la imagen de la izquierda (navegando), podemos observar como la velocidad de partícula adquiere valores más elevados en la zona de la izquierda, se deduce que es generada por el rozamiento del eje; mientras que, en la imagen de la derecha, prueba realizada en puerto con cero porcentaje de carga (es decir, sin transmitir movimiento al eje) la velocidad de partícula debida a la vibración del motor más acusada quizás se deba a los cables que vibran a una frecuencia muy alta. Pero, aun así, en cuanto al valor de referencia, es mucho menor que en la escala del motor navegando.

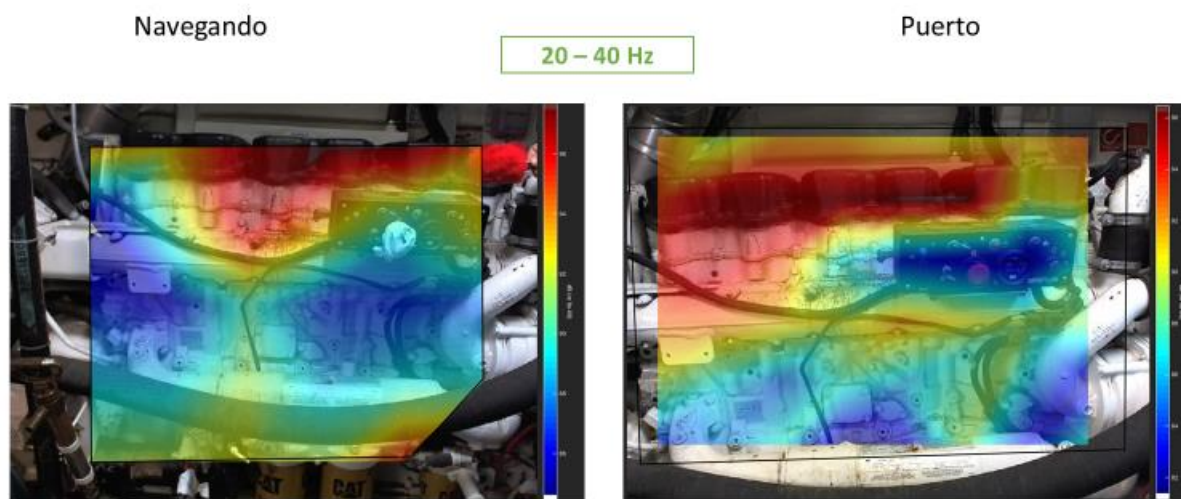


Figura 4-3 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 20 – 40 Hz (vista frontal)

En ambas representaciones se puede observar cómo, encontrándonos en el rango de frecuencia de operación, se acusa más la radiación sonora generada por la culata, donde se encuentran los pistones; confirmando todas las teorías obtenidas. Quizás esto puede indicar que los desequilibrios se encuentran en los pistones situados más a popa.

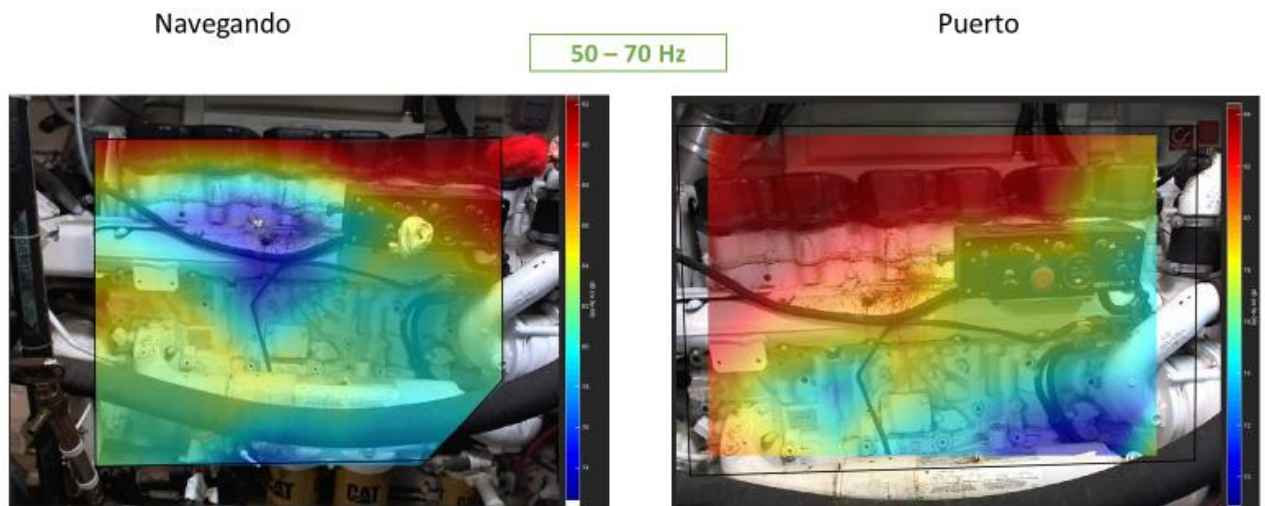


Figura 4-4 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 50 – 70 Hz (vista frontal)

Para la vista frontal sucede lo mismo que en la representación anterior: se observa como la radiación sonora más notable reside en la parte de la culata. En este caso, en ambas graficas se encuentran los mismos picos de amplitud. La ligera diferencia que existe entre ambas imágenes se puede explicar mediante el aumento de temperatura, en el que las radiaciones sonoras producidas en el rango del primer armónico se puedan explicar no solo por la ligera desalineación del grupo (sigue siendo un pico de amplitud muy pequeña), sino por la expansión del material al aumentar la temperatura, reduciendo las posibles holguras mecánicas y, por ende, las vibraciones del grupo motor (que es lo que sucede en la imagen de la izquierda).

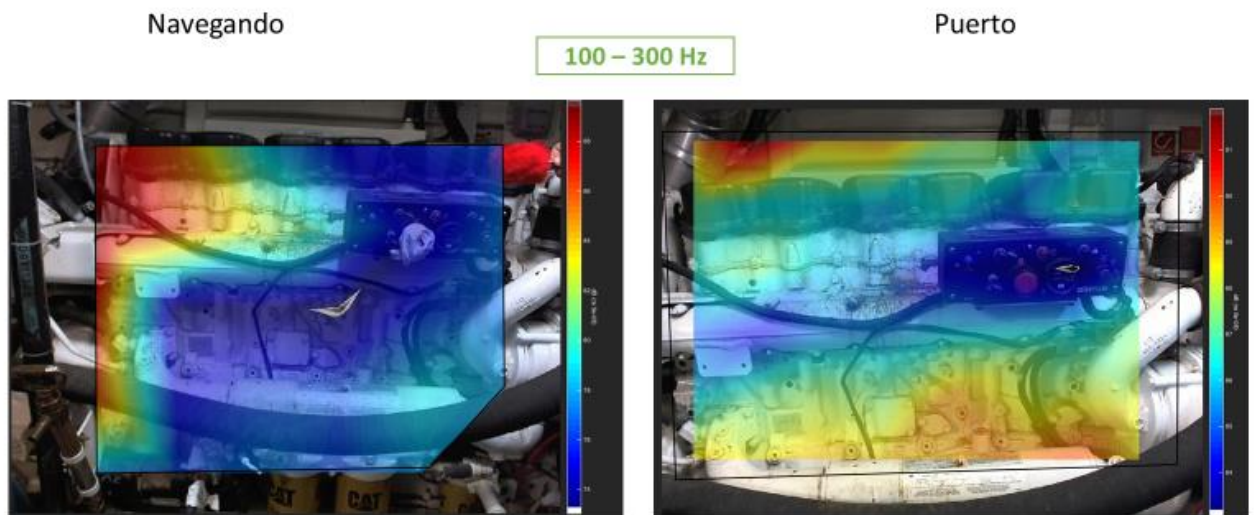


Figura 4-5 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 100 – 300 Hz (vista frontal)

Esta imagen nos basta para indicar como el rango de frecuencias del segundo y tercer armónico no son un problema a tener en cuenta, al ser inexistentes; pues, en este caso, se demuestra que las radiaciones sonoras son producidas por la rotación del eje (parte visiblemente más roja en la imagen de la izquierda); mientras que, en la derecha, es de menor radiación. El efecto rojo pueda darse debido a las reverberaciones del sonido en la cámara de máquinas.

- b. Las imágenes a continuación corresponden a una vista desde popa al eje del motor.

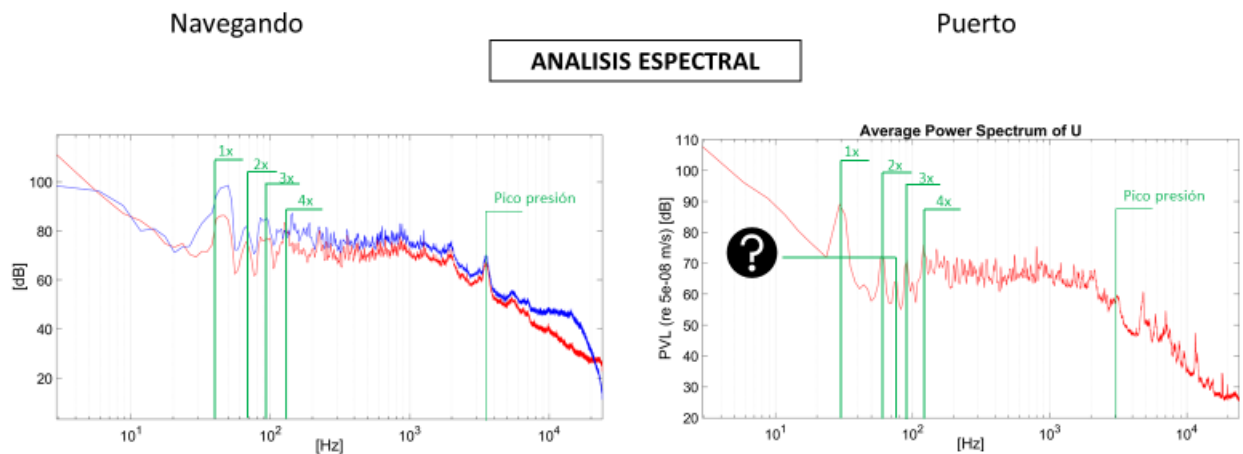


Figura 4-6 Comparativa espectro de frecuencias (vista perfil)

En esta gráfica, donde hay más influencia por parte de las radiaciones del eje, podemos observar el mismo principio seguido en la vista frontal; pero, en la imagen de la izquierda correspondiente al motor en régimen de navegación, el primer armónico (2x) tiene un pico más bajo, mientras que el segundo armónico (3x) tiene un pico prolongado, debido al solape entre un pico de causa desconocida y el armónico 3x en ese rango de frecuencias (que se puede observar en la gráfica de la derecha). Este solape se produce al aumentar las revoluciones, ya que este pico desconocido amplía el rango de frecuencias, por lo que es claro indicativo de que la causa detonante de esta sinuosidad es el rozamiento del eje con la chumacera (soporte que sujeta el eje). En cuanto al segundo y tercer armónico, se pueden deber a holguras mecánicas, igualmente no importantes.

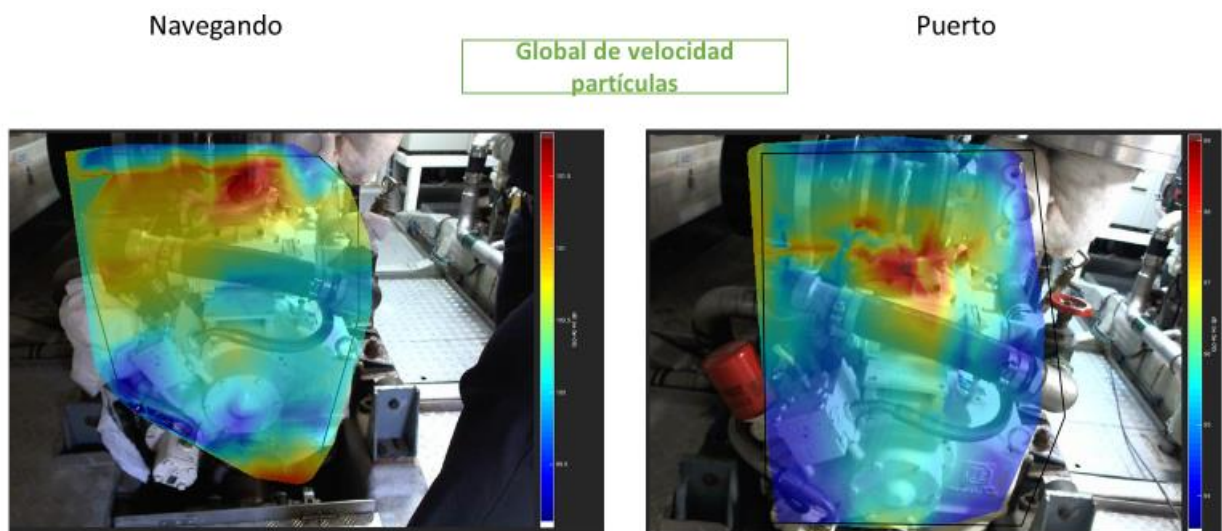


Figura 4-7 Comparativa representación gráfica de la velocidad de partículas (vista perfil)

Podemos apreciar en el caso del motor, en el régimen de navegación, que la máxima velocidad de partícula es debida a las revoluciones del eje y al turbocompresor; mientras que en el motor de la derecha son mínimas, siendo apreciables en las juntas.

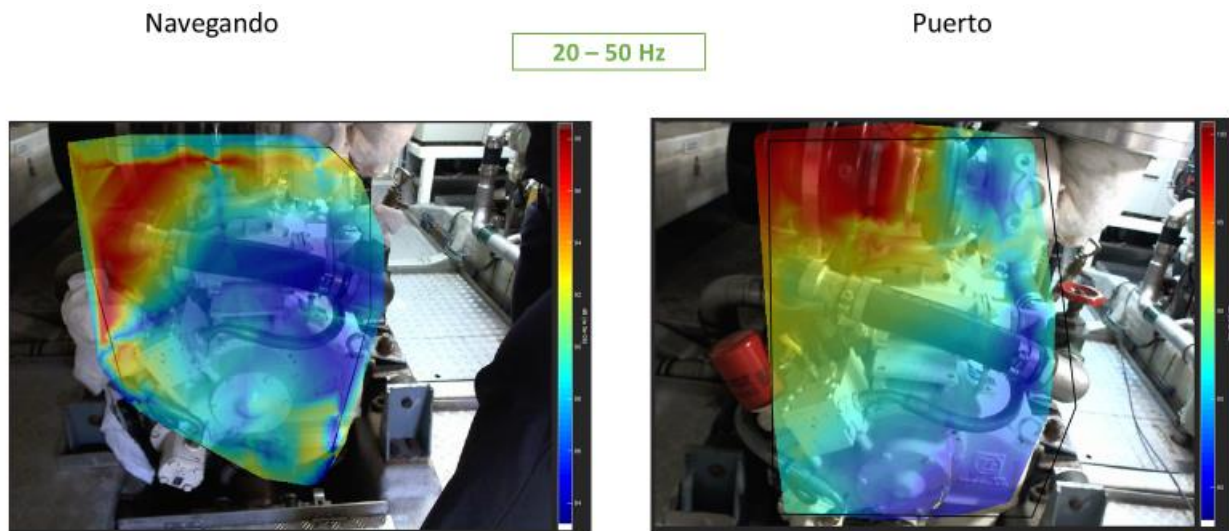


Figura 4-8 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 20 – 50 Hz (vista perfil)

En este rango de frecuencias, en ambas imágenes, se acusa la radiación del turbocompresor, más claro en la derecha que en la izquierda, debido a las posibles reverberaciones del sonido en la cámara de máquinas. Se asocia al régimen de operación que el turbocompresor posee.

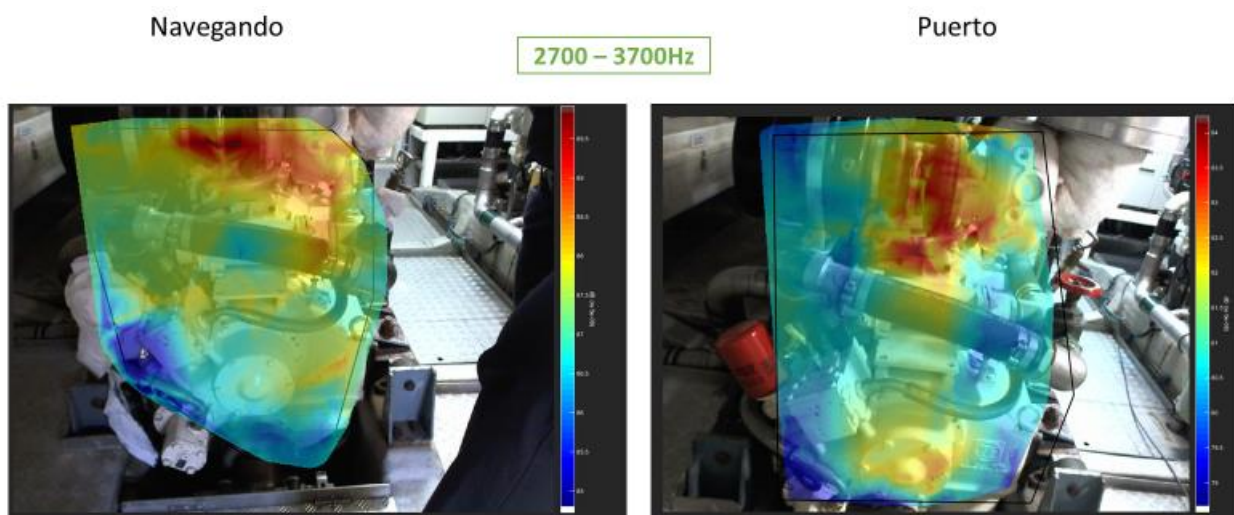


Figura 4-9 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 2700 – 3700 Hz (vista perfil)

En este rango de frecuencias es difícil predecir el comportamiento del motor, pero si podemos concluir que las radiaciones se deben al movimiento de los álabes de la turbina.

c. Por último, las medidas correspondientes a la vista desde el mamparo

Este análisis es muy similar al espectro de frecuencias de la vista frontal. Se observa que la parte del motor más radiante es el posenfriador, pero en el rango de frecuencias del primer armónico (2x) destaca la culata por el posible problema del desequilibrio, mientras que las holguras mecánicas y las desalineaciones presentes en el segundo y tercer armónico se desprecian debido a la baja amplitud de pico que poseen.

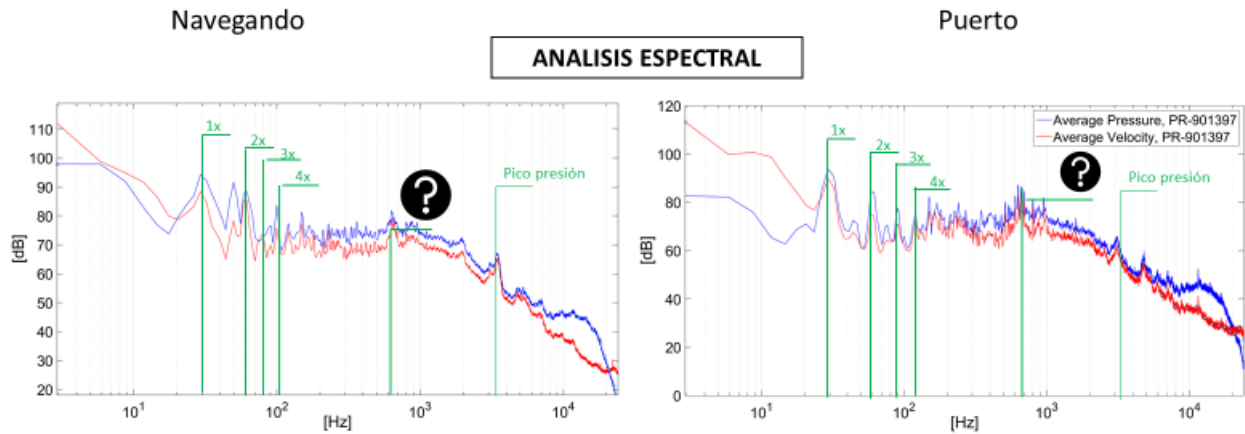


Figura 4-10 Comparativa espectro de frecuencias (vista posterior)

Aquí, además de los armónicos habituales y el pico de presión, se pueden apreciar en gran medida picos amplios en la frecuencia de los 800 Hz. Esto se debe a que las aletas del posenfriador generan mucha radiación sonora, debido a las vibraciones que produce el flujo de agua salada en el ángulo del recorrido que tiene el circuito de agua salada en el posenfriador. No se considera un elemento crítico del motor y por ello, no está bien anclado.

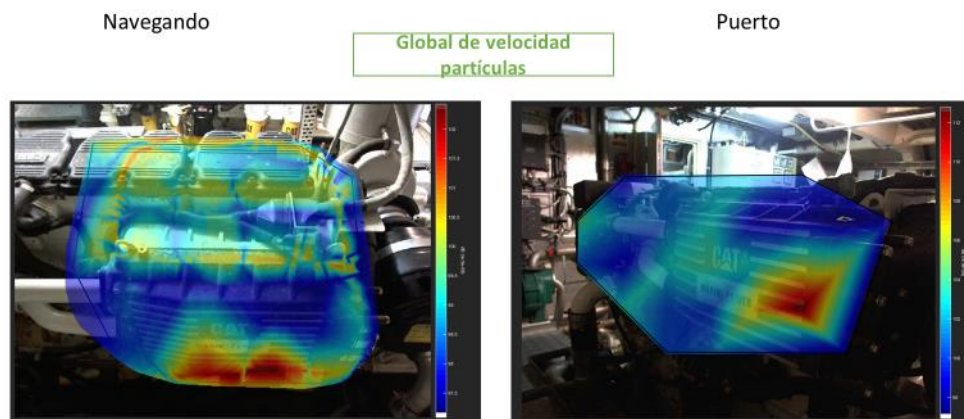


Figura 4-11 Comparativa representación gráfica de la velocidad de partículas (vista posterior)

Podemos ver que en el cuarto cilindro en el rango del primer armónico existe más radiación sonora que en el resto, por lo que quizás es en ese cilindro donde se encuentre el posible desequilibrio.

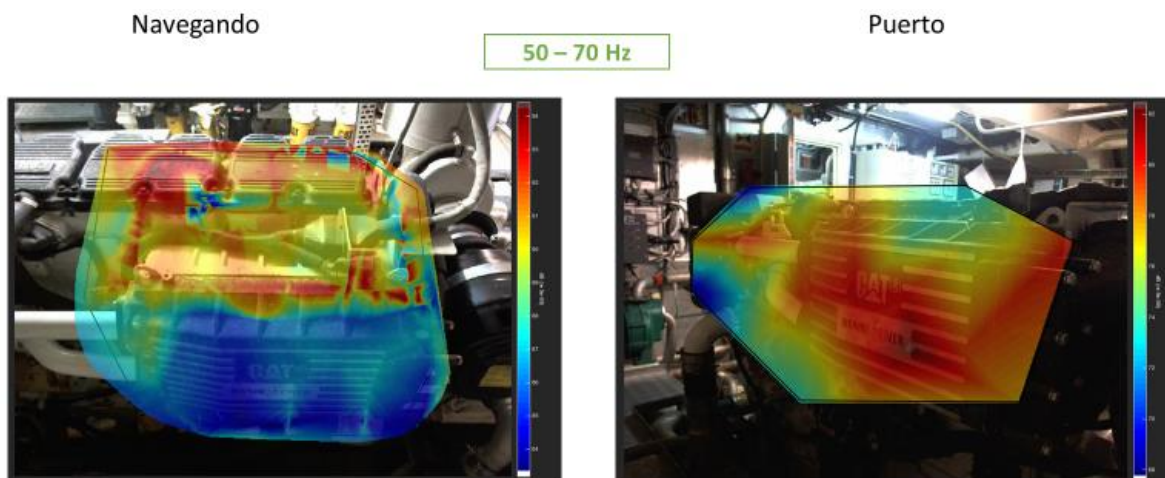


Figura 4-12 Comparativa representación velocidad de partículas acotada entre 50 – 70 Hz (vista posterior)

4.1.2 Motor Babor Lancha de Instrucción A-124

Las medidas in situ con el *Scan & Paint* permitieron obtener datos de la lancha A-124, en la cual solamente se han realizado medidas estando en puerto y en régimen mínimo de revoluciones con carga motor nula. Se ha hecho con el objetivo de comparar y sacar la huella acústica de la segunda serie de motores entregados a la Escuela.

a. Vista frontal

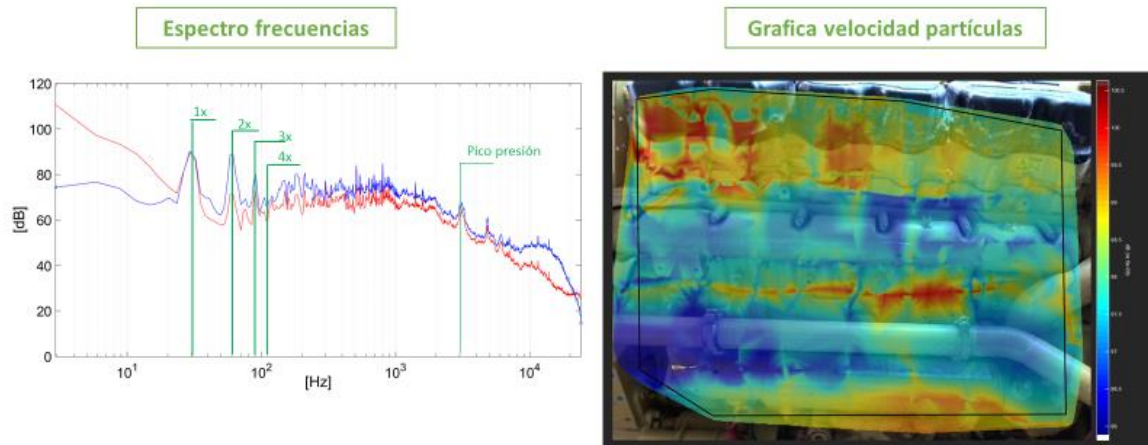


Figura 4-13 Espectro de frecuencia y gráfica velocidad partículas A-124 (vista frontal)

Es muy similar al de la Figura 4-1 Comparativa espectro de frecuencias (vista frontal, aunque se puede apreciar que no existe ese pico en la frecuencia de los 800 Hz que se veía en el primero, y los picos del primer armónico son menores.

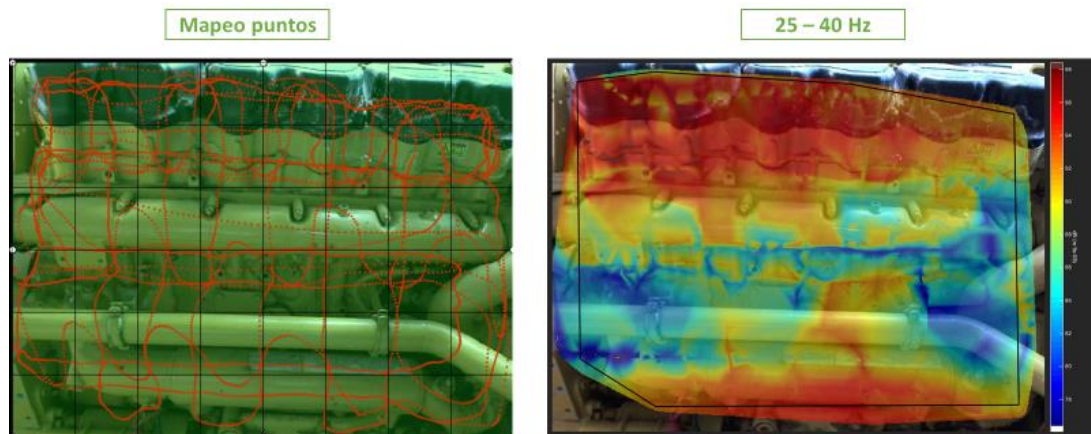


Figura 4-14 Grid de puntos y gráfica velocidad partículas 25 – 40 Hz A-124 (vista frontal)

En la imagen de la derecha, se observa todos los puntos de muestreo adquiridos por la sonda y como, mediante el algoritmo de discretización espacial, reparte por el método de cuadrículas todos los datos obtenidos en el dominio de tiempo. Según el procesado de estos datos, se puede graficar en la imagen del motor, los datos obtenidos. En este caso, se puede confirmar que, en el rango de operación del motor, la parte que genera más radiación sonora es la correspondiente a la culata, donde se producen las combustiones del cilindro.

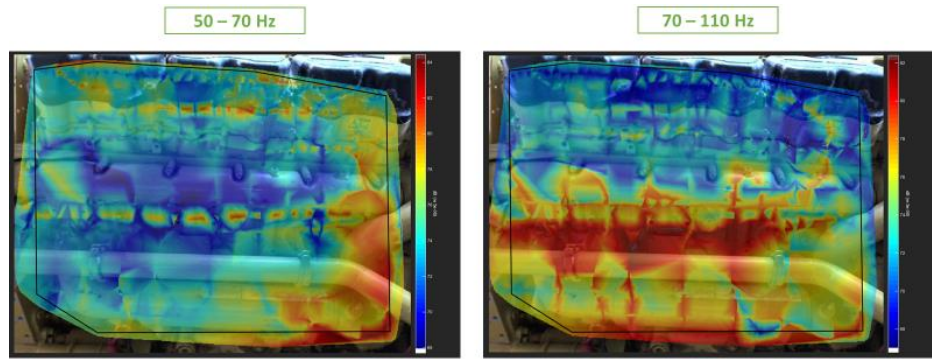


Figura 4-15 Representación velocidad partículas 50 – 70 y 70 - 110 Hz A-124 (vista frontal)

En esta última representación, es importante observar que, en el rango de frecuencias del armónico de segundo grado (3x), se confirma que las vibraciones son producidas por la desalineación del grupo debido a las combustiones de los cilindros desfasadas 120° que producen impulsos en el cigüeñal, que es la zona destacada de la imagen.

b. Vista perfil

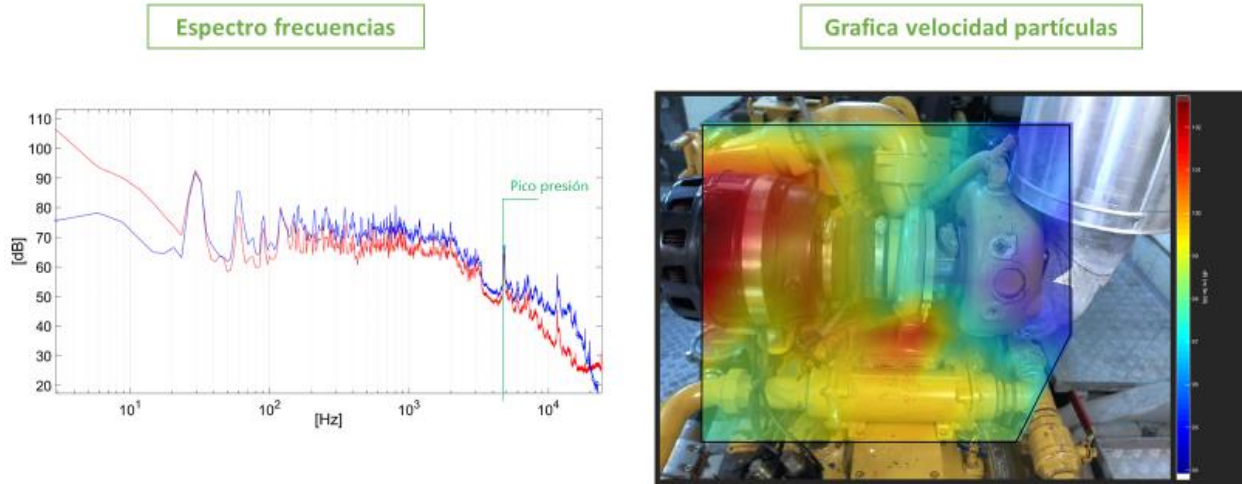


Figura 4-16 Espectro de frecuencia y gráfica velocidad partículas A-124 (vista perfil)

Se observa coincidencia, aunque quizás, los valores del parámetro de velocidad de partícula difieren debido a que no existen dos motores iguales, y menos si son de distintos lotes. A efectos básicos, los resultados son muy semejantes.

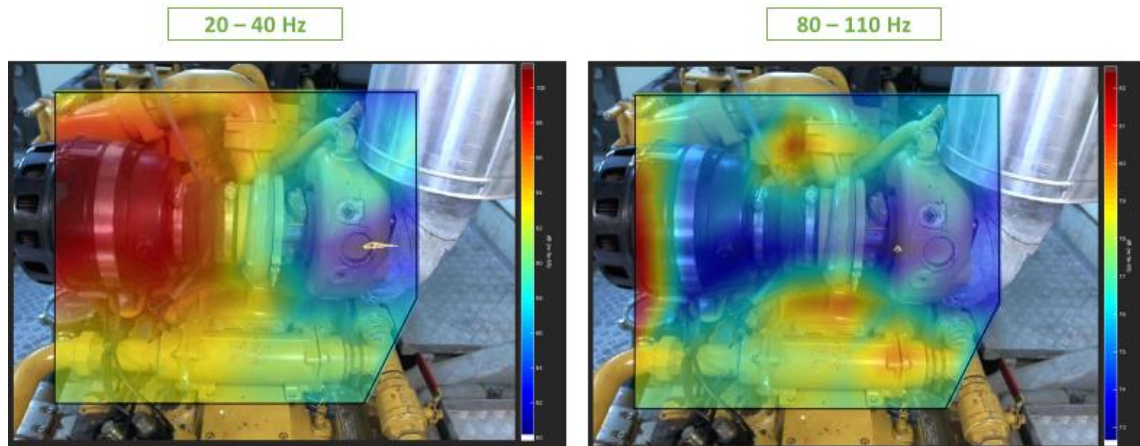


Figura 4-17 Gráfica velocidad partículas 20 – 40 y 80 - 110 Hz A-124 (vista perfil)

3. Vista posterior

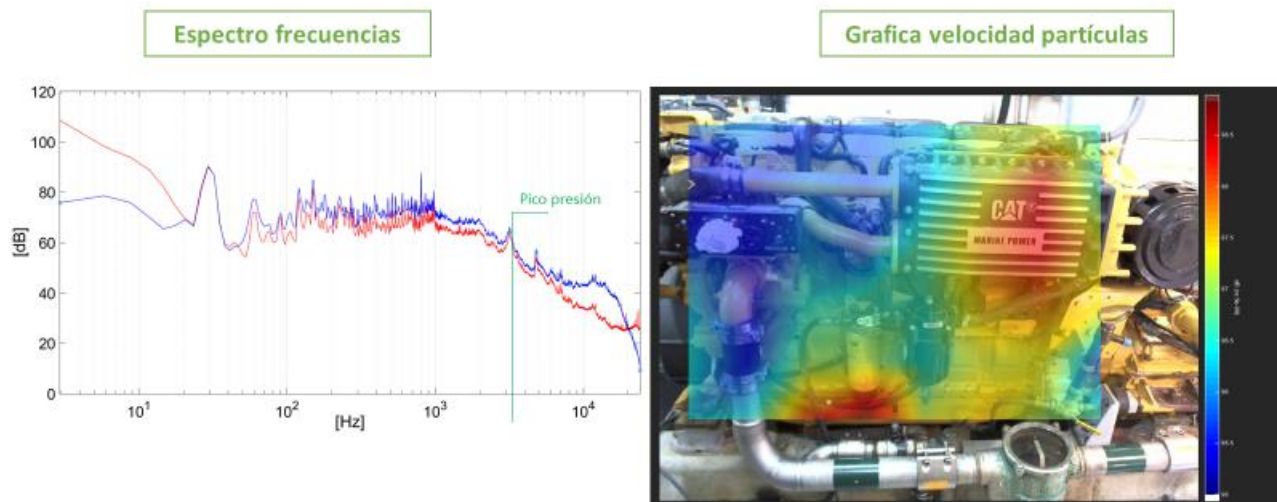


Figura 4-18 Espectro de frecuencia y gráfica velocidad partículas A-124 (vista posterior)

Se puede observar el pico de frecuencia de 800 Hz que también se apreciaba en el motor anterior, posiblemente debido a las fluctuaciones del agua en las tuberías del posenfriador.

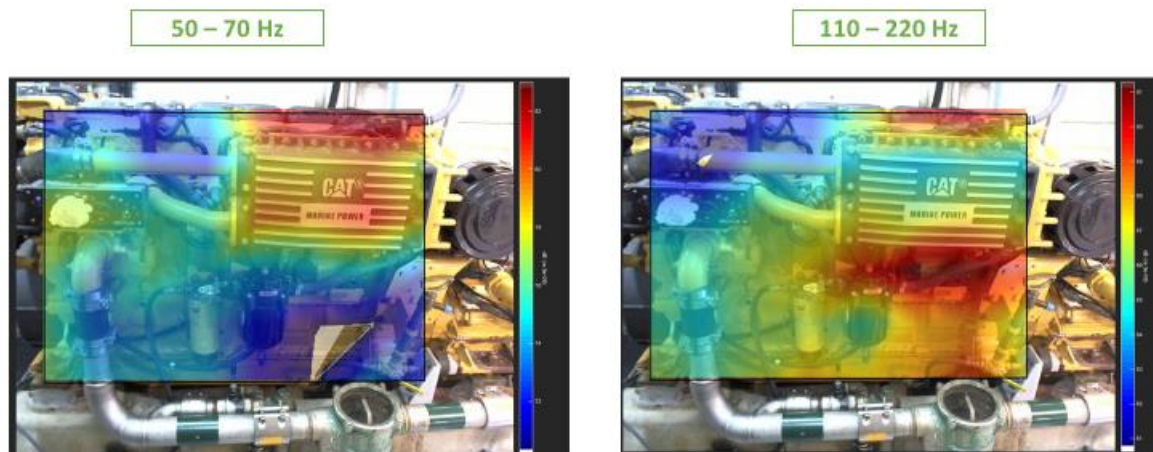


Figura 4-19 Gráfica velocidad partículas 50 – 70 y 110 - 220 Hz A-124 (vista posterior)

La imagen no difiere mucho de las representaciones del primer motor, por lo que, se concluye que este motor se encuentra en un estado muy similar al primer motor. En el caso de que, este primer motor o el segundo motor se supongan en un buen estado, se puede concluir que ambos motores se encuentran en un estado óptimo de utilización. Este es el principio en el que rige se la extracción de la huella acústica, en el que la similitud entre un motor de estado de funcionamiento desconocido, con otro motor de estado conocido óptimo, se supone en el mismo estado óptimo de funcionamiento.

4.2 Huella emisiones motor

Mediante la elaboración de la tabla como se ha explicado en Análisis de los gases de exhaustación, se ha podido relacionar distintos patrones de comportamiento de los motores en cuanto a eficiencia de combustión.

Revoluciones	Carga	Presión turbo	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura del gas (°C)	Temperatura refrigerante motor	Temperatura aceite transmisión	Presión aceite motor	Presión aceite transmisión	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NOx (ppm)
600	20	0	19,6	50,4	50	22	380	2380	2.38	456	923	969
600	20	0	19,6	52,5	48	20	348	2380	2.29	361	994	1044
600	18	0	19,7	49,9	47	18	392	2380	2.24	325	1069	1122
800	30	0	23,6	96,4	56	21	323	2380	3.3	257	1090	1045
800	33	0	23,7	52,6	58	25	440	2380	3.16	244	1124	1180
800	32	0	23,3	57,8	57	25	430	2380	3.08	207	996	1046
1000	40	0	23,5	65,8	60	25	435	2380	3.85	108	1218	1279
1000	41	0	23,6	127	62	25	435	2380	3.89	108	1185	1244
1000	40	0	23,6	120	64	25	435	2380	4.01	22	1201	1261
1200	50	12	23,9	237	75	26	421	2400	5.9	21	1240	1302
1200	52	12	23,8	265,7	75	27	424	2400	5.59	12	1269	1332
1200	50	11	23,9	144	75	27	425	2400	5.62	13	1274	1338
1400	62	28	24,1	299,6	80	27	480	2410	6.97	20	1241	1303
1400	62	28	24,2	265,7	82	28	460	2432	6.94	17	1240	1302
1400	63	28	24,3	294,9	81	28	470	2410	6.87	19	1228	1289
1600	62	59	25,4	365,1	83	30	430	2432	8.02	35	1235	1301
1600	61	58	24,9	349,8	83	29	460	2432	7.92	31	1241	1303
1600	60	58	24,8	347,9	83	29	440	2432	7.99	33	1238	1300
1800	77	102	24,6	107,6	84	32	460	2432	8.23	37	1235	1297
1800	76	101	24,7	104,6	84	32	450	2460	8.23	40	1030	1082
1800	75	102	24,4	124,3	83	32	470	2432	8.26	42	1028	1079
2000	91	150			85	34	435	2460	7.96	42	1035	1087
2000	90	154			84	33	480	2460	7.98	43	1035	1087
2000	92	154			84	33	460	2460	7.98	45	1035	1087

Tabla 4-1 Tabla emisiones motor babor A-123

Para poder hacer una comparativa del estado real de los motores, se decidió la elaboración de unas gráficas en función de las partes por millón (ppm) y de la potencia del motor, pues no existe otra manera de relacionar revoluciones fijas y variaciones de carga con variaciones de carga aleatorias y revoluciones variables. Para obtener la potencia real se ha decidido utilizar las siguientes ecuaciones:

$$Potencia (W) = RPM \times \frac{2\pi}{60} \times Par\ motor_{real}$$

$$Par\ motor = Par\ motor_{m\acute{a}x} \times Carga_{motor}$$

Se comprobó visualmente que, durante las mediciones, el motor estaba en correcto funcionamiento, y también se comprobó la ausencia de humos negros y hollín en los gases, (pues serían un claro síntoma de mal rendimiento del motor).

Sin embargo, si es de importancia destacar que la temperatura normal del circuito de agua salada esté en torno a 91°C, mientras que el circuito de agua salada del motor de la lancha se encuentra a una temperatura máxima de 84°C, estando varios grados por debajo. Este hecho podría ser síntoma de una mala combustión o del sobredimensionamiento del sistema de refrigeración del motor.

4.2.1 Interpretación gráficas

Para el análisis de las gráficas se recurre a la información extraída en la documentación [23] y [24]

Monóxido de carbono: se observa que los niveles de CO están en el rango especificado por el fabricante. Se consideran normales entorno a los 200 ppm. Los niveles bajos pueden asociarse a:

- Anomalías de funcionamiento en sistema de arranque en frío.
- Anomalías en bomba de combustible.
- Exceso de combustible.
- Filtro de aire sucio o dañado.
- Conductos de aire obstruidos.
- Fallos en el colector de admisión.
- Empaque de culata dañado.
- Aceite contaminado.
- Mal funcionamiento de sensores MAF, MAP o caudalímetro.

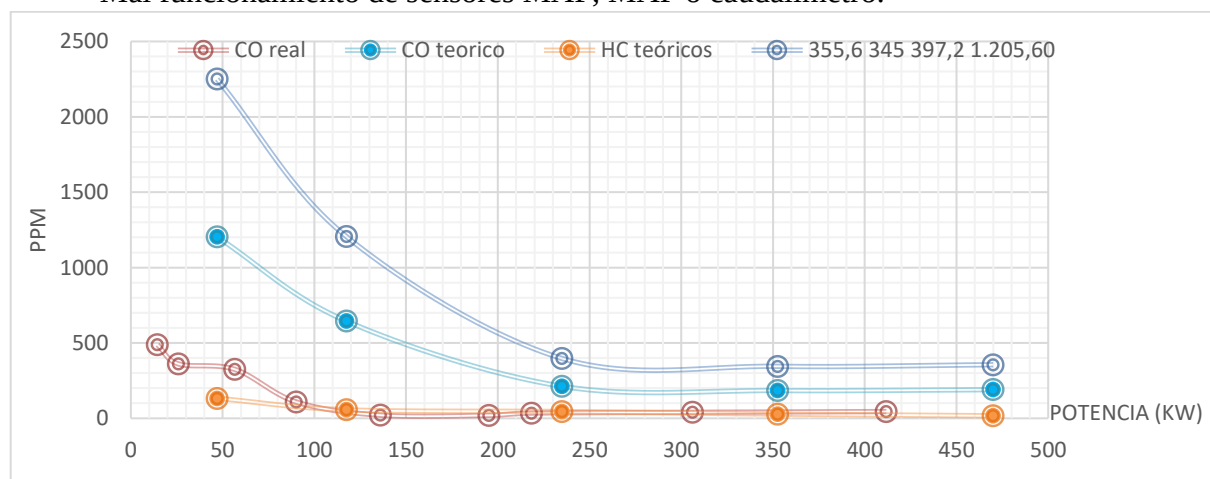


Tabla 4-2 Comparación gases de emisión

Dióxido de carbono: es un excelente indicador de la eficiencia de un motor. Se considera un nivel óptimo cuando el porcentaje se ubica entre el 12% y el 16%. Cuando la combustión resulta perfecta es todo CO₂ y a medida que va siendo incompleta la combustión va disminuyendo el CO₂ y aumentando el CO y HC. Los niveles de la gráfica se consideran anormales, excepto para los de 1600 rpm en adelante (que son bajos e indicarían un mal rendimiento de combustión).

Oxígeno: se trata del oxígeno que sobró del proceso de combustión. Unos valores altos pueden significar una mezcla pobre o un fallo en la combustión (que significaría un aumento de hidrocarburos y monóxido de carbono). Niveles bajos significan que se ha agotado todo el oxígeno u otras causas como:

- Tomas de aire a través del sistema de escape o tubos de escape rotos.
- Insuficiente introducción de la sonda por tubo de escape.
- Tomas de aire en el sistema de admisión que originan mezclas muy pobres.

En este caso, el oxígeno no es tan alto como debería, por lo que significa que se quema todo el combustible.

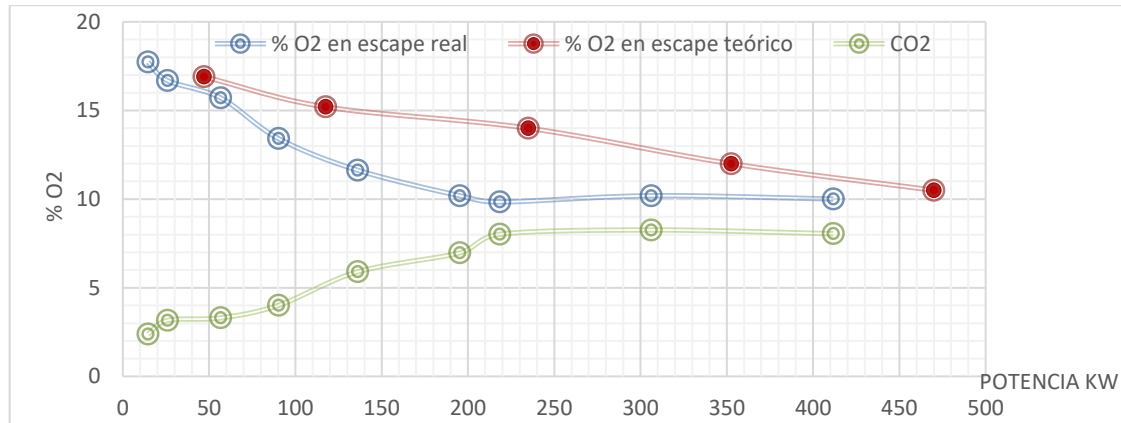


Tabla 4-3 Comparación gases de emisión

Óxidos de nitrógeno: son la combinación del oxígeno y el nitrógeno de aire. Se forman a altas temperaturas y baja presión, en mezclas preferentemente pobres, cuando el motor está bajo carga. Se debe a fallos en la válvula de circulación de gases o fallos en el sistema de refrigeración, que eleva la temperatura. En la gráfica se observa que los niveles de NOx están muy por encima del esperado. Pueden ser causadas por tiempos de ignición incorrectos, presiones bajas de combustible o fugas del sistema de admisión del aire. La reducción que se observa en la gráfica se debe que el turbocompresor trabaja en la presión de un kilo y medio, y que el porcentaje de carga se encuentra en el 85%, que es el rendimiento teórico y óptimo del motor; sin embargo, aunque se muestra lejos de los requerimiento de fábrica, pero puede que se deba a la dependencia de la carga, más que de las revoluciones, y, en este caso, con la potencia puede no ser tan preciso.

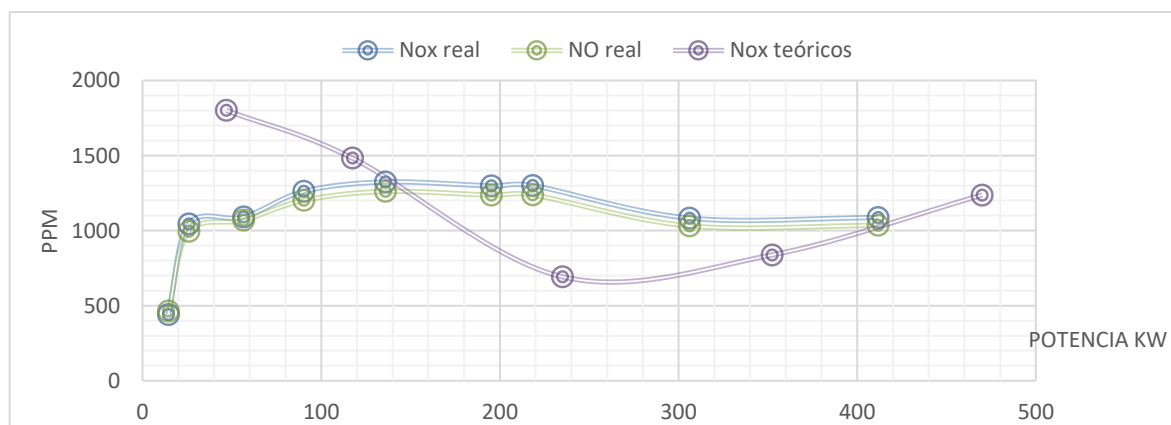


Tabla 4-4 Comparación gases de emisión

5 PLAN DE MANTENIMIENTO

La elaboración del plan de mantenimiento que se ha propuesto se ha basado en el plan de mantenimiento aportado por el fabricante. Este mantenimiento contempla el recambio y sustitución de gran cantidad de piezas y la revisión periódica de elementos mecánicos. Por ello es de gran interés el Anexo 1, donde se describen las piezas más importantes del motor [17].

Igualmente, se valora el plan de mantenimiento dispuesto por el departamento de mantenimiento de la Escuela, en el que se encuentran las capacidades que tiene la Escuela Naval como “segundo escalón de mantenimiento”. Se ha resumido en la Tabla 5-1 Plan mantenimiento original cámaras de máquinas de las lanchas de instrucción.

Por último, se ha decidido complementar la propuesta con los métodos predictivos explicados a lo largo del TFG, en el que figuran tanto el Análisis de radiación sonora con el equipo de acústica avanzada *Scan & Paint*, como el Análisis de los gases de exhaustación. La incorporación de estos métodos no es otro que la adquisición de la filosofía RCM, que se había propuesto como alcance del proyecto. Además, se ha decidido darle la periodicidad de un año y cuando se crea necesario, para que se pueda llevar a la práctica por parte de los alumnos de la Escuela o para que apoye funciones de mantenimiento urgentes, correspondientemente.

Para la elaboración del plan, se ha decidido clasificar cada tipo de acción a realizar según el sistema al que sirven, de manera que se pueda llevar un control intuitivo. Estos son:

- Sistema general.
- Batería y motor de arranque.
- Sistema de refrigeración.
- Mecánica.
- Montaje del motor.
- Sistema de almacenamiento de combustible.
- Sistema de lubricación.
- Verificación alarmas.
- Sistema de gobierno.
- Sistema de admisión y de escape.

También se ha decidido incorporar una breve descripción del equipo y las medidas para realizar esta acción de mantenimiento. La nomenclatura para cada acción consiste en: LI 00x-0y, en el que ‘x’ corresponde a un número según el sistema al que pertenezca, y la ‘y’, la numeración de esa acción de mantenimiento en el sistema.

A continuación, se presentan tanto el plan de mantenimiento original (Tabla 5-1) como el plan de mantenimiento propuesto (Tabla 5-2).

CONCEPTO	1 / SEMANA	1 / MESES	3 / MESES	1 / AÑO	OBSERVACIONES
Sentinas y groeras	●				Comprobar limpieza general y niveles
Tomas de mar, filtros		●			Limpieza filtros (si afecta)
Válvulas tomas de mar		●			Comprobar estado, abrir y cerrar.
Prefiltros combustible motores principales		●			Purgar agua
Tuberías		●			Revisar, manguitos, abrazaderas
Niveles tanques de almacenamiento de gasoil	●				Local y remoto
Revisión niveles aceite embragues, motores principales y auxiliares	●				Comprobar
Bombas de achique, eléctricas y manuales		●			Revisión rejillas, limpiar, y probar en la mar
Revisión niveles agua de refrigeración motores principales y auxiliares.	●				Comprobación
Bomba contraincendios		●			Comprobar funcionamiento, boquiles, válvulas, estibar mangueras
Motores fueraborda			●		Arrancar, comprobar estado general
Servo		●			Posibles pérdidas de aceite y funcionamiento correcto
Revisión de electrógenos motores principales, auxiliares, reductores y calentador agua			●		Según uso motores
Comprobación funcionamiento bombas circulación del aire acondicionado	●				Presión, descarga y limpieza canastas si afecta
Comprobación equipos aire acondicionado en frío y calor		●			
Comprobación funcionamiento bomba agua dulce	●				
Comprobación funcionamiento bomba aguas grises y negras	●				
Cambio de aceite y filtros motores principales/auxiliares				●	Cambio electrógenos y comprobación cambio correas
Bomba de trasiego de combustible				●	
Limpieza de tanques				●	
Varada				●	
Revisión extintores		●			
Alarma contraincendios		●			Comprobar alarma sistema fijo, cierre charnelas, y cierre remoto v/vs. combustible
Comprobar el funcionamiento del telemando del puente para control de los motores principales	●				cuando se arranquen motores
Arranchado pañol de tierra		●			
Análisis líquidos					
Prueba hidráulica mangueras				●	

Tabla 5-1 Plan mantenimiento original cámaras de máquinas de las lanchas de instrucción

Plan de mantenimiento del motor C18														
Código	Elemento motor	Acción a realizar	Descripción	Medidas a tomar	Cuando sea necesario	24 horas	Cada semana o 50 hora	Cada mes	Cada 250h de servicio	Cada año	500 horas de servicio	Cada 1000h de servicio	Cada 3000h de servicio	Otros
LI 000-01	Sistema general	Limpiar Motor	Detectar fugas de fluidos, características de transferencia de calor, mejor mantenimiento,	Según tipo 1 o tipo 2. Revisar manual de operación	X				X	X				
LI 000-02	Sistema general	Inspección máquina	En busca de fugas y conexiones flojas. Debe tomar pocos minutos	Realizar todas las recomendaciones especificadas en la guía de mantenimiento		X								
LI 000-03	Sistema general	Inspeccionar / ajustar Luz válvulas del motor	Y realizar el diagnosis pertinente	Diagnosis indicado en la guía de mantenimiento					X	X				
LI 000-04	Sistema general	Reacondiciona miento general del extremo superior del motor	Consiste en desmontar, inspeccionar, y modificar la culata o incorporar nuevos servicios	Caterpillar provee servicios de inspección, reconstrucción y reemplazo para alargar la vida útil del motor										5000 horas
LI 000-05	Sistema general	Consideracion es de reacondiciona miento general	Se considera cuando existe mayor consumo de combustible y reducción de potencia y consumo de aceite	Según manual de mantenimiento, se puede hacer el reacondicionamiento antes y después de la falla. Se recomienda llamar a Caterpillar										
LI 000-06	Sistema general	Sentinas	Comprobar limpieza general y niveles	----- -----			X							
LI 000-07	Sistema general	Motores fueraborda	Arrancar. Comprado general	----- -----				X						
LI 000-08	Sistema general	Varada	----- -----	----- -----						X				
LI 001-01	Batería y motor de arranque	Desconectar Batería o cable de la batería	----- -----	Desconectar TODO y retirar los cables cubriéndolos con cinta adhesiva para evitar arranques no intencionados	X									
LI 001-02	Batería y motor de arranque	Reemplazar batería	Puede despedir gases combustibles	Desconectar TODO e instalar nueva batería conectando el cable negativo al plano del suelo, y el cable positivo al motor de arranque.	X									
LI 001-03	Batería y motor de arranque	Comprobar Nivel de electrolito de la batería	Cuando el motor no opera durante tiempos prolongados, pueden no cargar bien	Si las baterías están cargadas, amperaje es cero					X	X				

Ll 001-04	Batería y motor de arranque	Inspeccionar Motor de arranque	Comprobar que funciona correctamente, por si se necesita en caso de emergencia	Avisar a Caterpillar								X	
Ll 001-05	Batería y motor de arranque	Inspeccionar Alternador	Carga las baterías	Comprobar las baterías, las conexiones por si están flojas y el amperímetro durante la operación. Consultar manual de servicio									5000 horas
Ll 001-06	Batería y motor de arranque	Inspeccionar, limpiar y apretar prisionero a tierra de la culata	----- -----	Seguir la guía de mantenimiento del motor									1000 horas
Ll 002-01	Sistema de refrigeración	Limpieza / inspección / reemplazar Colador de agua de mar	Debe de estar limpio para un correcto enfriamiento del motor. Revisar si esta obturado y con frecuencia si opera en aguas sucias.	Quitar el colador de agua y limpiar la rejilla, reponer y llenar el sistema con agua de mar	X	X							
Ll 002-02	Sistema de refrigeración	Inspeccionar Intercambiador de calor	Puede aumentar la T del refrigerante, recalentamiento del motor y la caída de presión entre admisión y salida del agua	Se limpian las placas para mejorar la eficiencia, Revisar guía de armado y desarmado								X	
Ll 002-03	Sistema de refrigeración	Inspeccionar sistema intercambiador de calor	En términos generales para proveer de un buen funcionamiento el motor	Inspección visual del sistema	X								
Ll 002-04	Sistema de refrigeración	Limpiar / probar Núcleo posenfriador	reemplazarse periódicamente, debido: acumulación de residuos y corrosión por el agua de mar.	Procedimiento en el Manual de desarmado y armado	X						X	Reemplazar	
Ll 002-05	Sistema de refrigeración	Cambiar Refrigerante del sistema de enfriamiento	Si el motor se recalienta con frecuencia o entran contaminados	Seguir la guía de mantenimiento del motor		Comprobar						X	6000h
Ll 002-06	Sistema de refrigeración	Obtener (nivel 1) Muestra refrigerante del sistema de enfriamiento	----- -----	Visitar manual de mantenimiento del motor							X		
Ll 002-07	Sistema de refrigeración	Obtener (nivel 2) Muestra refrigerante del sistema de enfriamiento	----- -----	Puede ser necesario si lo demanda la muestra de refrigerante nivel 1.						X	500h iniciales		
Ll 002-08	Sistema de refrigeración	Añadir Prolongador de refrigerante de larga duración (ELC) para sistemas de enfriamiento	Refrigerante de larga duración (ELC) no requiere aditivos de refrigerante suplementario (SCA) y solo se hará una vez.	Solo hacerlo con el motor en frio y parado.								X	

LI 002-09	Sistema de refrigeración	Comprobar y añadir Aditivo de refrigerante suplementario (CSA) del sistema de Enfriamiento	Como resultado del análisis de las muestras del refrigerante	Revisar "Aditivo suplementario de refrigerante SCA y Agua"					X	X					
LI 002-10	Sistema de refrigeración	Inspeccionar rodete de la bomba agua	Es necesario inspeccionar rodetes y sellos. También cojinetes y planchas de desgaste	La bomba debe trabajar a una presión de 103 Kpa					Caucho	Caucho				Bronce	
LI 002-11	Sistema de refrigeración	Inspeccionar Bomba agua	Puede provocar recalentamientos, rajaduras de la culata, atascamiento de pistones u otros riesgos del motor	Comprobar si tiene fugas. En caso de que sea así, reemplazar los sellos.											5000 horas
LI 002-12	Sistema de refrigeración	Inspeccionar / reemplazar Varillas de cinc	Los circuitos de mar pueden corroerse. Las varillas se utilizan para evitar esta corrosión	Quitar las varillas de cinc, golpearla con un martillo y si esta desgastada reemplazarla.	X		X								
LI 002-13	Sistema de refrigeración	Reemplazar Termostato de agua del sistema de enfriamiento	Practica mantenimiento preventivo	Puede averiar la máquina si no se hace.										X	
LI 002-14	Sistema de refrigeración	Inspeccionar / limpieza Válvula drenaje de condensador del posenfriador	La presión del refuerzo del motor hace que la válvula se cierre. Cuando se para, se abre debido a la falta de presión y de drena automáticamente.	Quitar la válvula de del adaptador y comprobar si el embolo se mueve libremente. Si no, usar disolvente y volver a montar la válvula de drenaje.			X		X	X					
LI 003-01	Mecánica	Inspeccionar, ajuste o reemplazar Correa alternador	Para aumentar el rendimiento del motor, inspeccionar correa. Comprobar la tensión	Aplicar una fuerza de 110 N en el punto medio de las correas. Tendrá una flecha de 13 a 19 mm. Para dudas manual de servicio					X	X					
LI 003-02	Mecánica	Inspeccionar Amortiguador vibraciones cigüeñal	Si esta averiado, puede aumentar las vibraciones torsionales, y producir daños en el cigüeñal	Se ubica detrás del protector de la correa.										X	
LI 003-03	Mecánica	Inspeccionar Rotaválvulas del motor	Debe de tener buenas conexiones con el mazo de cable y un cable conectado a tierra	Usar un trapo limpio y quitar las corrosiones con una disolución de bicarbonato y agua.										X	
LI 003-04	Mecánica	Inspeccionar Soportes motor	----- -----	Comprobar si el montaje del motor es indebido o existe deterioro en soportes.										X	
LI 003-05	Mecánica	Análisis radiación sonora	Consiste en seguir el método explicado durante el TFG	Análisis e interpretación de espectro de frecuencias	X					X					
LI 003-06	Mecánica	Tuberías	Revisar manguitos y abrazaderas	----- -----	X					X					

LI 004-01	Montaje del motor	Comprobar almacenamiento motor	Para asegurar máxima protección y un buen procedimiento arranque	Revisar "Procedimiento de almacenamiento para productos Caterpillar"	X												
LI 005-01	Sistema de almacenamiento de combustible	Cebado Del sistema de combustible	Al cebar el sistema de combustible se llenan los filtros de combustible y se saca el aire del sistema combustible	Cebado hasta sentir una presión fuerte, y después arrancar motor después de presurizar el sistema. Si no arranca, repetir	X												
LI 005-02	Sistema de almacenamiento de combustible	Drenar Filtro primario del sistema de combustible o separador de agua	----- -----	Abir el drenaje, y automáticamente se ventila automáticamente		X											
LI 005-03	Sistema de almacenamiento de combustible	Drenar Agua y sedimentos del tanque de combustible	Fundamental para un buen funcionamiento del motor.	Revisar guía "Guía de herramientas y productos de taller Caterpillar"						X	X						
LI 005-04	Sistema de almacenamiento de combustible	Reemplazar Filtro primario del sistema de combustible o separador de agua	El agua mezclada con el combustible puede hacer que el motor funcione irregularmente, o que no funcione	Debe cambiarse con regularidad. Se debe cambiar si la presión del filtro se encuentra entre 50 y 70 Kpa						X	X						
LI 005-05	Sistema de almacenamiento de combustible	Reemplazar Filtro secundario del sistema de combustible	El agua mezclada con el combustible puede hacer que el motor funcione irregularmente, o que no funcione	Seguir manual de mantenimiento para su correcto reemplazo						X	X						
LI 005-06	Sistema de almacenamiento de combustible	Comprobar niveles de almacenamiento de combustible gasoil	Comprobar que existen más de 1500 litros en los tanques	----- -----			X										
LI 005-07	Sistema de almacenamiento de combustible	Bomba trasiego combustible	----- -----	----- -----							X						
LI 006-01	Sistema de lubricación	Calibrar el indicador aceite	Cada motor tiene una calibración debido a el ángulo de instalación y el lado para servicio	Seguir indicaciones del manual de servicio	X												
LI 006-02	Sistema de lubricación	Comprobar Nivel de aceite del motor	----- -----	----- -----		X											
LI 006-03	Sistema de lubricación	Obtener Muestra aceite del motor	Se recomienda para análisis de aceite de motor en intervalos programados	Se recomienda el uso de la válvula de muestreo, si no la bomba de vacío y la botella de muestreo.						X	X						

LI 006-04	Sistema de lubricación	Limpiar Respiradero del cárter	Se taponar si no se limpia, causando presión alta en el cárter, y fugas en el sello del cigüeñal	Seguir indicaciones del manual de servicio					X	X				
LI 006-05	Sistema de lubricación	Cambiar Aceite y filtro motor	Se debe a la relación aire - combustible, condiciones ambiente, aplicación motor y tipo de combustible y aceite	Drenar el depósito, cambiar los filtros de aceite según manual de servicios y llenado del cárter.					X	X	X			
LI 006-06	Sistema de lubricación	Inspeccionar Indicador servicio filtro de ventilación del cárter cerrado	Muestra cuando es necesario reemplazar el filtro de eliminación de vapores	Verificar estando el motor trabajando en vacío a bajas revoluciones.		X								
LI 006-07	Sistema de lubricación	Reemplazar Filtro de eliminación de vapores del cárter (CCV)	Filtra los vapores generados por los aceites de lubricación	Seguir indicaciones del manual de servicio								X		
LI 007-01	Verificación alarmas	Alarmas de contra incendio	Comprobar alarma sistema fijo, cierre charnelas, y cierre remoto v/vs. combustible	----- -----				X						
LI 007-02	Verificación alarmas	Inspeccionar y ajustar Luz válvulas del motor	----- -----	----- -----					250h				X	
LI 008-01	Sistema de gobierno	Comprobar Nivel de aceite de transmisión marina	Verificar el nivel de aceite en acuerdo con el fabricante	Manual del propietario de la transmisión		X								
LI 008-02	Sistema de gobierno	Servo	posibles pérdidas de aceite y funcionamiento correcto.					X						
LI 008-03	Sistema de gobierno	Comprobar, limpiar y calibrar sensores velocidad / sincronización del motor	Descripción detallada en Figura 62 del libro de mantenimiento del equipo	Quitar los sensores de la caja delantera, comprobar el estado de los plásticos y limpiar virutas de metal:									X	
LI 009-01	Sistema de admisión y de escape	Inspeccionar Indicador servicio filtro de aire del motor	Se puede vigilar mediante el manómetro de antes y después del filtro de aire.	Reemplazar si diafragma amarillo si entra en la zona roja, si el indicador muestra el color rojo o el pistón rojo se trava		X								
LI 009-02	Sistema de admisión y de escape	Limpiar y reemplazar filtro del aire del motor	Se puede vigilar mediante el manómetro de antes y después del filtro de aire.						X	X				
LI 009-03	Sistema de admisión y de escape	Inspeccionar Turbocompresor	Se recomienda hacer una limpieza periódica del compresor, e inspeccionar visualmente ya que si rompe puede estropear los pistones y válvulas Seguir la guía de mantenimiento del motor									X		
LI 009-04	Sistema de admisión y de escape	Análisis gases exhaustación	Se recomienda con el fin de comparar con la huella de emisiones obtenida en marzo 2019		X					X				

Tabla 5-2 Plan de mantenimiento propuesto para el motor C18 de las lanchas de instrucción

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Interpretación de los resultados

En vista de los resultados obtenidos en los análisis de radiación sonora y de gases de exhaustación desarrollados en las lanchas de instrucción permitieron concluir con éxito la implementación de la filosofía de mantenimiento RCM en los motores de éstos. Con este plan se persigue la optimización de todos sus procesos de mantenimiento, con el fin de prolongar el máximo tiempo posible su ciclo operativo. Esto se ha conseguido con la adquisición de la huella acústica y de emisiones, con el objetivo de utilizarse como referencia en comparaciones de análisis posteriores. Igualmente se ha conseguido diagnosticar el estado de mantenimiento de los motores, que permiten indicar lo siguiente:

- i. Por parte del análisis de radiación sonora: se ha podido concluir que la única irregularidad que puede desencadenar futuras averías es el desequilibrio que se aprecia en la aparición del primer armónico de los espectrogramas del parámetro acústico *velocidad de partículas*. No obstante, este síntoma es frecuente en todo tipo de motores, y el pico de amplitud no resulta excesivamente grande como para que sea de relevancia a corto plazo. Igualmente se han desechado los armónicos de segundo y tercer grado debido a la poca amplitud de pico que presentan, y, además, debido a que es totalmente explicable su aparición en el espectro. Por último, cabe destacar el pico perteneciente al rango de los 750 – 850 Hz que aparece en la vista frontal del motor, el cual, a pesar de ser explicable desde otros puntos de vista, merece una mínima atención en los próximos análisis de comparación.
- ii. En cuanto a los resultados extraídos por parte el análisis de gases de exhaustación, destaca la dificultad de comparación respecto a los datos aportados por el fabricante. En principio, no se puede atribuir a un fallo del sensor, pues ambas mediciones tomadas a lo largo de diferentes jornadas arrojaron datos muy similares. Por ello se recomienda la búsqueda de posibles fugas de los gases a lo largo del tubo de escape. En caso de que permanezca la diferencia respecto a los datos del fabricante, se ha de disminuir la presencia de agua de refrigeración del tubo de escape, colocando otro punto de medida por encima de la entrada de agua de refrigeración. Hasta que esto ocurra, estos datos recogidos in situ permanecerán como huella de emisiones del motor con los que referenciar posibles comparaciones en mantenimientos a posteriori.

Cabe destacar la facilidad de implementación que tienen estos equipos de medidas acústica y de gases avanzados en un barco, pues no se persigue otra cosa que la consecución de la Armada 4.0, de la que tanto se espera. La implementación de estos equipos en un buque puede proporcionar la información necesaria para poder diagnosticar fiablemente, y a largo plazo, el tiempo de vida de sus

equipos, aumentando en gran medida la funcionalidad y el ciclo operativo del barco, en el que se invierten grandes cantidades económicas.

El trabajo desarrollado ha permitido la elaboración de un plan de mantenimiento basado en las medidas realizadas, el mantenimiento original del motor, las especificaciones del fabricante y la metodología RCM del que se ha querido impregnar este TFG.

6.2 Líneas futuras

Se puede considerar este trabajo como el inicio de la implementación RCM en la Escuela Naval Militar, con el que seguir aplicando las metodologías descritas con el fin de conseguir una mayor aplicación de los recursos utilizados.

Una línea futura puede residir en la obtención de una huella de emisiones que se corresponda con la proporcionada por el fabricante, con el fin de poder comparar todos los motores de la lancha con datos de fábrica.

Otra línea general que se puede seguir es la comprobación de la implementación del plan de mantenimiento propuesto y la mejora del mismo. La incorporación de métodos predictivos como el análisis de lubricantes y termografía, mediante la obtención de las huellas correspondientes.

Por último, se sugiere aplicar los conceptos definidos en el presente trabajo en un buque de la Armada, haciendo hincapié en el análisis de radiación sonora, pues es una tecnología muy innovadora de la que no se dispone información en los buques, y que puede ser de gran utilidad en el área de mantenimiento.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pergamon, «Computer-aided RCM-based plant maintenance management system,» *Robotics and Computer Integrated Maintenance*, nº 19, pp. 449-458, 2003.
- [2] Pesquimat, «aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en motores de combustion interna de las embarcaciones pesqueras de la serie intrépido de una empresa pesquera,» *Revista de la F.C.M. de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, vol. XVIII, nº 2, pp. 5-18, 2015.
- [3] J. Moubray, «Soporteicia,» [En línea]. Available: <http://www.soproteicia.com/>. [Último acceso: 17 Enero 2019].
- [4] F. J. G. Carazas, Tesis doctoral "Aplicación de RCM como estrategia de implementación del mantenimiento predictivo para la metodología TPM", Medellín, Colombia, 2018.
- [5] R. V. Cano, Estudio de mantenimiento predictivo en un buque de guerra, Ferrol, 2014.
- [6] D. Charle, «Slide Share,» 6 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/DieterCharle/vibration-analysis-emerson-makes-it-easy-for-you>. [Último acceso: 31 Enero 2019].
- [7] NTI, «NTI,» NTI, [En línea]. Available: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>. [Último acceso: 20 Febrero 2019].
- [8] ISRN Mechanical Engineering, «Scan and Paint: Theory and Practice of a Sound Field Visualization Method,» *Hindawi*, vol. 2013, nº 241958, p. 11, 2013.
- [9] Centro Universitario de la Defensa. Escuela Naval Militar, Práctica 3: Iniciación a técnicas termográficas. Termodinámica y transmisión del calor, Marín, 2014.
- [10] Aficionados a la mecánica, «Aficionados a la mecánica,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sonda-lambda.htm>. [Último acceso: 21 02 2019].
- [11] V. C. Gamboa, «La maqueta digital,» *Revista General de la Marina*, p. 18, 2018.
- [12] Autotaller S.A., «Lubricantes,» de *Anexo V: Lubricantes: especificaciones y normativa*, Autotaller S.A., p. 30.
- [13] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, «BOE,» 4 Septiembre 2010. [En línea].

Available: <https://www.boe.es>. [Último acceso: 12 Febrero 2019].

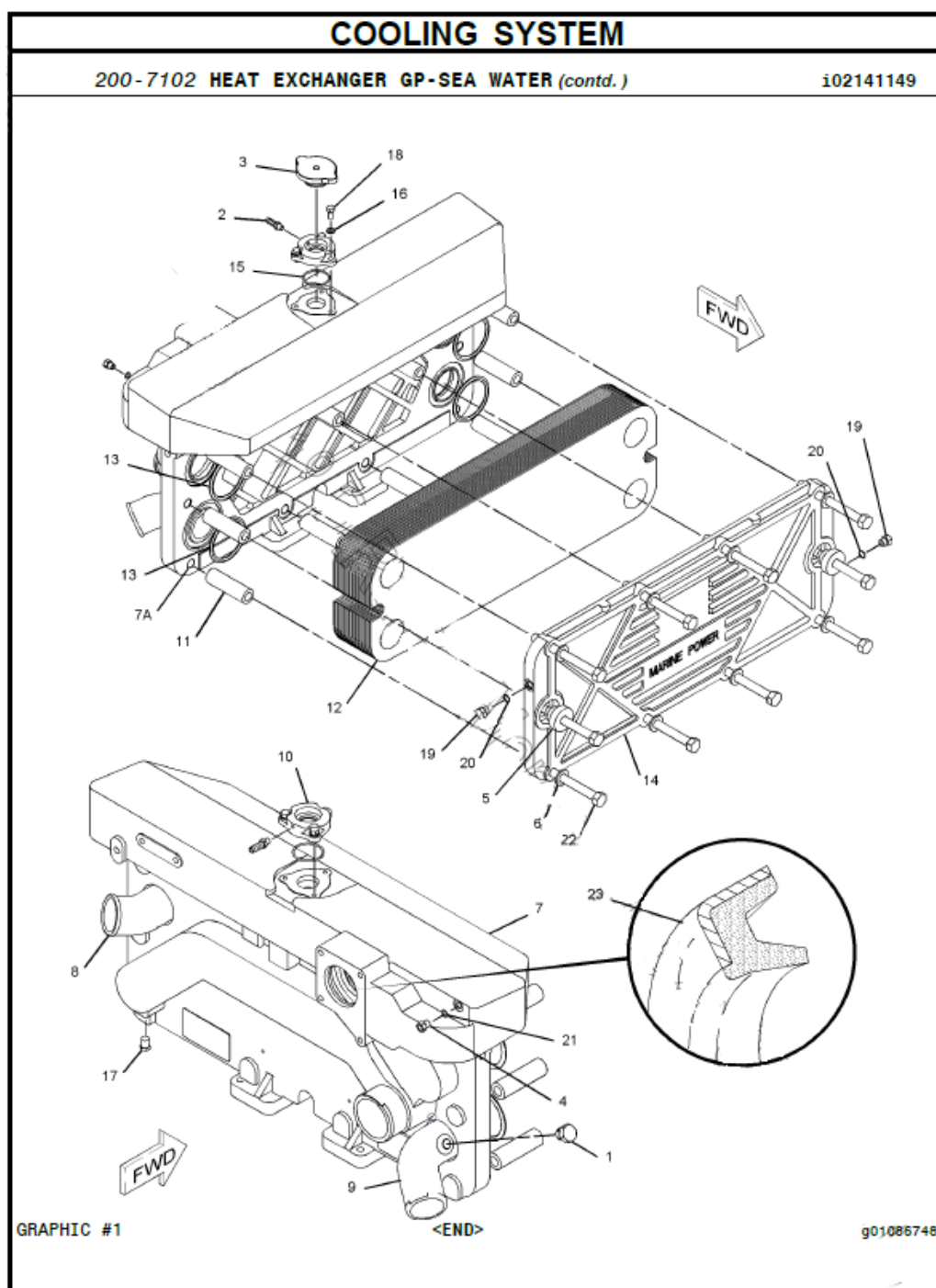
- [14] R. G. Soutullo, «Ingeniero marino. Normativa, Tecnologías y Modificaciones para reducir las emisiones de SOx y NOx a la atmósfera.,» [En línea]. Available: <https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>. [Último acceso: 26 Febrero 2019].
- [15] *Caterpillar*, Motor *Caterpillar* C18 INMD Acert Rafting C.
- [16] Cartepillar, Manual de operación y mantenimiento de motores marinos C18, Vigo : Cartepillar, 2003.
- [17] *Caterpillar*, Parts Manual. C18 Marine Engine, SIS, 2014.
- [18] Escuela Naval Militar, Bloque 2. Motores diesel. Sistema de inyección de combustible, Marín, 2015.
- [19] Maquinas y motores Navales. Escuela Naval Militar, Presentación B2-1. Componentes principales de motores diésel., Marín.
- [20] R. Solorzano, «Hydraulics pneumatics,» 15 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.hydraulicspneumatics.com/blog/principios-ingenieriles-b-sicos-intercambiadores-de-calor>. [Último acceso: 7 Febrero 2019].
- [21] Microflown Technologies, The Netherlands, «Uso de medidas directas de velocidad de partícula para la optimización de potencia acústica de electrodomésticos y maquinaria,» SPA, VIII Congreso Ibero-americano de Acústica. Evora - Portugal, 2012.
- [22] 48º Congreso español de acústica encuentro ibérico de acústica, «acoustic assessment of a steering wheel sensor using particle velocity method,» *Techniacustica*, p. 11, 2017.
- [23] Microflown Technologies, «Microflown Technologies,» Microflown, 20. [En línea]. Available: <https://www.microflown.com/>. [Último acceso: 24 Febrero 2019].
- [24] A.E.W.A.B. y. E.C.G.T. Priede, «Effect of engine structure on noise of diesel engines,» *Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.*, vol. 179, nº 4, 1964.
- [25] Descarbonizadoras, «Descarbonizadoras.com,» [En línea]. Available: <http://descarbonizadoras.com/wp-content/uploads/2015/06/INTERPRETACI%C3%93NAN%C3%81LISISGASES1.pdf>. [Último acceso: 01 Marzo Descarbonizadoras].
- [26] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [27] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.
- [28] P. Martínez y A. García, Cómo escribir una buena memoria de TFG, Publicaciones del 2000, 2013.
- [29] A. Pérez, Cómo escribir una bibliografía, Nuevas publicaciones.
- [30] S. B. Beltrán, Proyecto "Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (R.C.M) en la EDAR de Nules-Vilavella", Castellon : Universidad Jaime I, 2015.
- [31] S. Contreras, «<https://www.lifeder.com/mantenimiento-preventivo/>,» Lifeder, [En línea].

Available: <https://www.lifeder.com>. [Último acceso: 26 Enero 2019].

- [32] Escuela Naval Militar, Publicacion Manual de las Lanchas de Instruccion A-121, Marin, 2008.
- [33] Ministerio de Industria, turismo y comercio, «BOE-A-2010-13704 requerimientos DFM,» 04 Septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.boe.es> › BOE › Calendario › 04/09/2010. [Último acceso: 24 Febrero 2019].

8 ANEXO 1. PLANOS ELEMENTOS BLOQUE MOTOR

34 BASIC ENGINE 1 of 1 SEBP4018-03

INTERCAMBIADOR DE CALOR

SEBP4018-03

2 of 2

COOLING SYSTEM 183

BASE DE LA TAPA DE VÁLVULAS Y MAZO DE

BASIC ENGINE

122-1248 BASE GP-VALVE COVER & INJ HARN

SMCS-1120, 1408

i02087727

NOTE	REF NO	GRAPHIC REF	PART NUMBER	QTY	PART NAME	1	2	3	4	5	6	(PRODUCT LEVEL)	SEE PAGE
	1	1	8H-3127	6	BOLT (1/4-20X3/4-IN)								
	2	1	4F-7957	2	BOLT (1/4-20X0.875-IN)								
	3	1	5P-0537	8	WASHER-HARD (7.2X14.5X2-MM THK)								
	4	1	7E-6508	6	CAP AS (UNIT INJECTOR)								
	5	1	122-1486	1	HARNES AS-WIRING (ELECTRONIC UNIT INJECTOR)								
		1	103-8134	1	KIT-RECEPTACLE (12-PIN)								
					(INCLUDES RECEPTACLE AS AND WEDGE)								
	6	1	100-5218	3	CLIP								
	7	1	100-5219	3	CLIP								
	8	1	177-4152	1	BASE-VALVE COVER								
	9	1	9L-8925	14	BOLT (5/16-18X1.25-IN)								
D	10	1	5P-5678		SEAL (2.9-M)								
	11	1	122-1472	1	BOLT								
	12	1	6V-0128	1	SEAL-CONNECTOR								
	13	1	123-3202	2	STRAP-CABLE								

D-ORDER BY THE METER

SECTION B-B

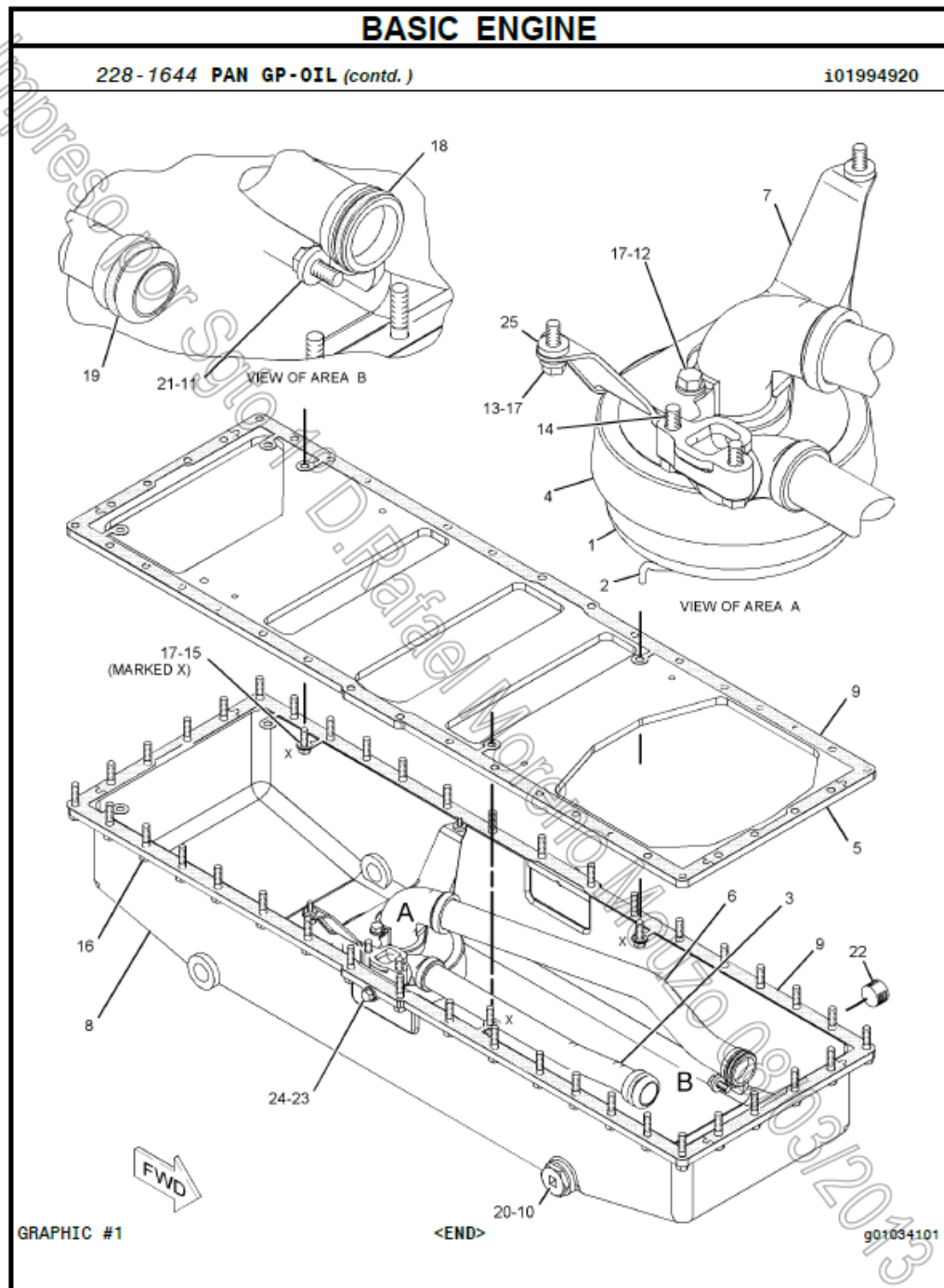
VIEW A-A

GRAPHIC #1

<END>

g00267337

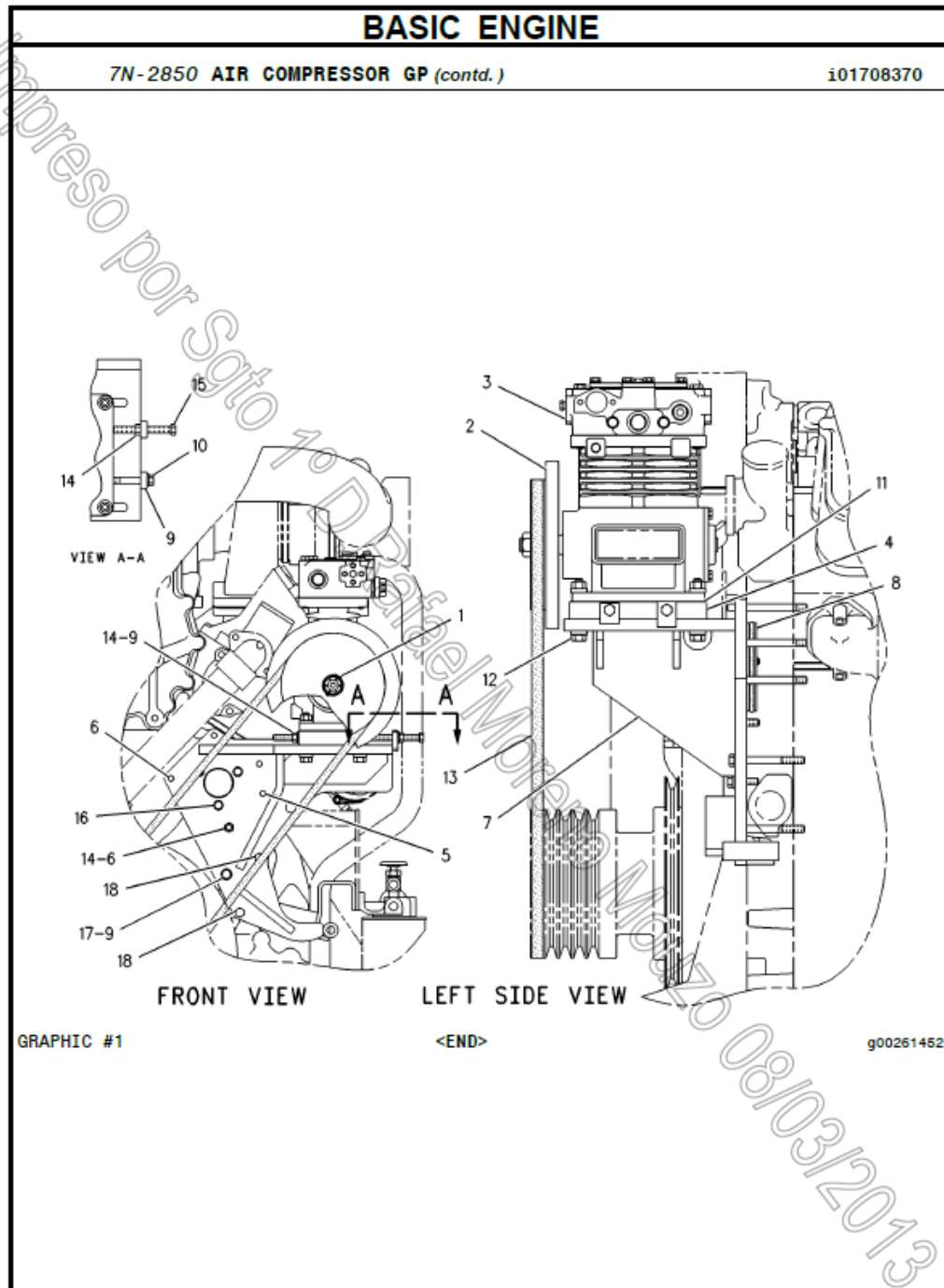
CÁRTER DE ACEITE.



SEBP4018-03

2 of 2

BASIC ENGINE 89

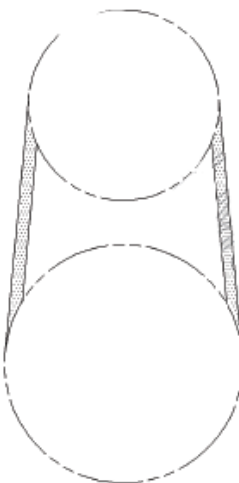
COMPRESOR DE AIRE

SEBP4018-03

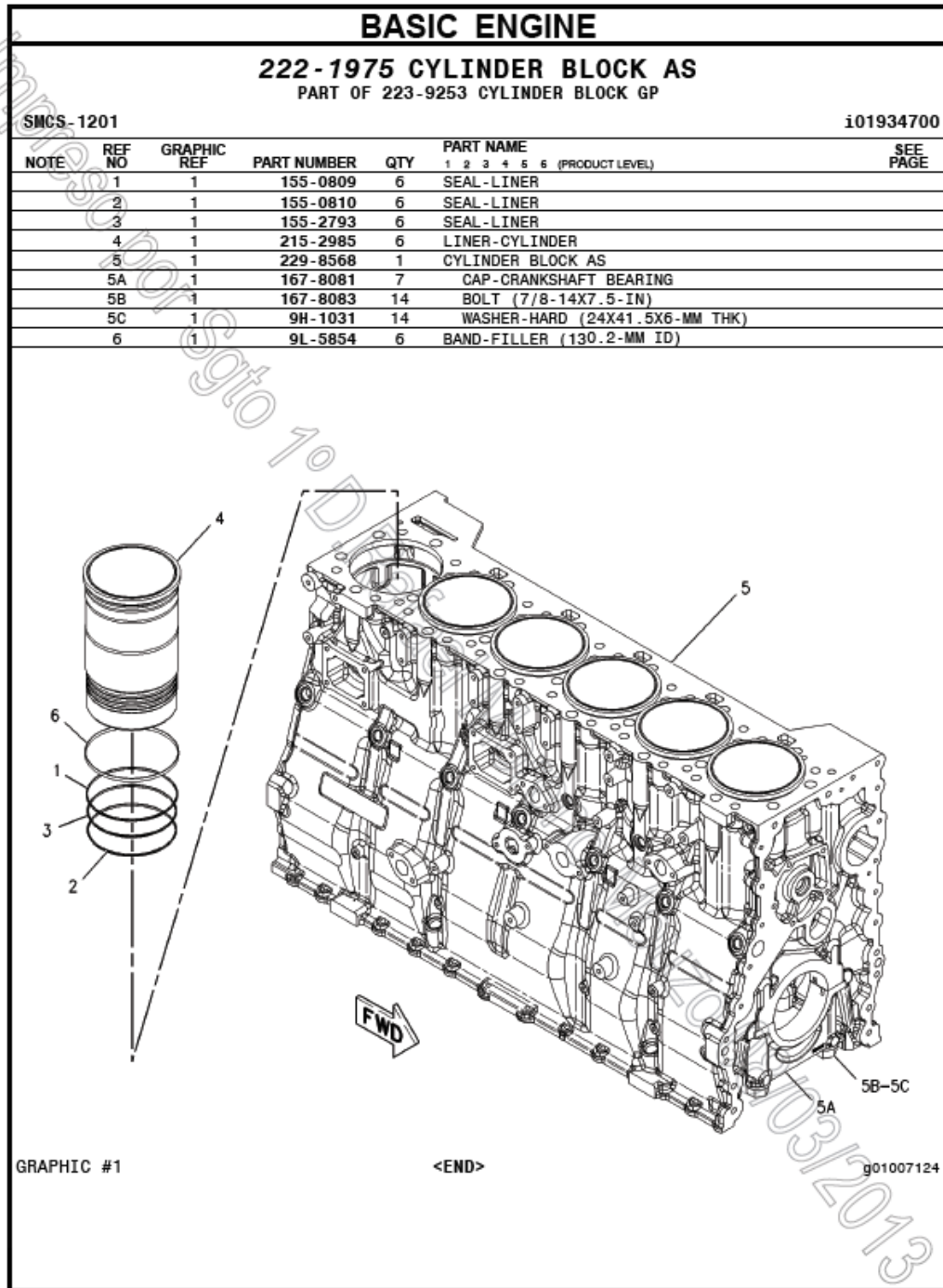
2 of 2

BASIC ENGINE 17

CORREA TRAPEZOIDAL

BASIC ENGINE										
5F-3581 V-BELT										
AN ATTACHMENT										
SMCS-1357					i01351414					
NOTE	REF NO	GRAPHIC REF	PART NUMBER	QTY	PART NAME					SEE PAGE
					1 2 3 4 5 6 (PRODUCT LEVEL)					
(NO SERVICED PARTS)										
										
GRAPHIC #1			<END>			g00714751				

CULATA DE CILINDROS

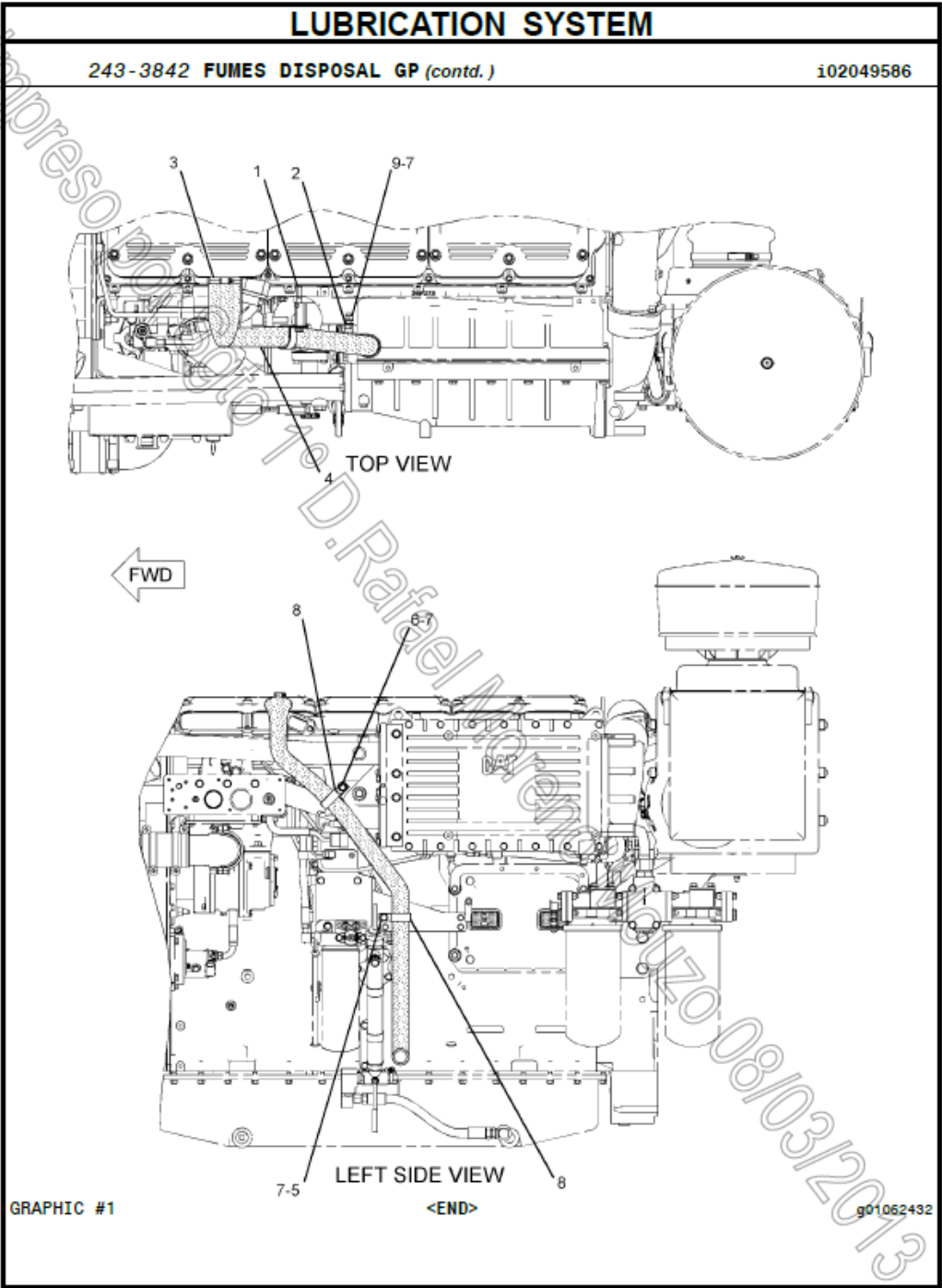


SEBP4018-03

1 of 1

BASIC ENGINE 35

ESCAPE DE GASES



INYECTOR DE COMBUSTIBLE

FUEL SYSTEM											
235-1403 PUMP GP-FUEL INJECTION											
S/N: C1J1-274											
SMCS-1251, 1290				i02199956							
NOTE	REF NO	GRAPHIC REF	PART NUMBER	QTY	PART NAME			SEE PAGE			
					1	2	3	4	5	6	(PRODUCT LEVEL)
	1	1	6I-0213	1	CLAMP						
	2	1	100-5072	1	SPACER (9.8X15.85X37.6-MM THK)						
	3	1	244-7718	1	INJECTOR GP-FUEL						
	3A	1	9X-7317	1	SEAL-O-RING						
	3B	1	230-3728	1	SEAL-O-RING						
	3C	1	230-3775	1	SEAL-O-RING						
	4	1	8S-9191	1	BOLT (3/8-16X4-IN)						

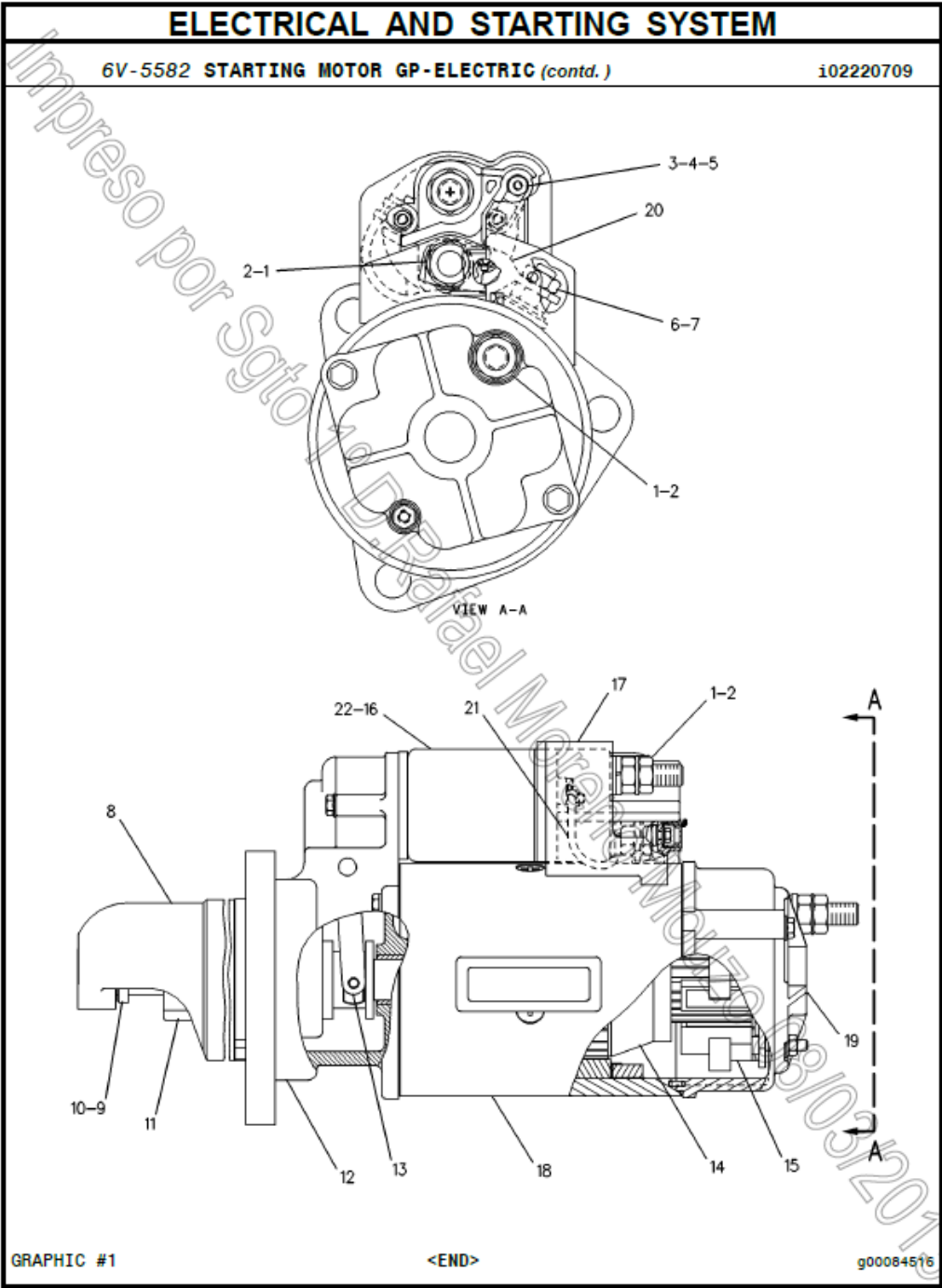
GRAPHIC #1

TOP VIEW

<END>

901033421

MOTOR ARRANQUE ELÉCTRICO



TURBOCOMPRESOR

AIR INLET AND EXHAUST SYSTEM						
241-9421 TURBOCHARGER GP						
ALSO AN ATTACHMENT						
SMCS-1052, 1053					i01975304	
NOTE	REF NO	GRAPHIC REF	PART NUMBER	QTY	PART NAME	SEE PAGE
						1 2 3 4 5 6 (PRODUCT LEVEL)
Y	1	1	242-0267	1	TURBOCHARGER GP	247
	2	1	2N-2766	4	LOCKNUT (3/8X16X2 THD)	
	3	1	7M-7273	1	GASKET	
Y-SEPARATE ILLUSTRATION						

The diagram shows two views of the turbocharger assembly. The 'ISOMETRIC VIEW' on the left shows the turbocharger (1) mounted on the engine block (2) with a locknut (3) and a gasket (4). A 'FWD' arrow points towards the front of the assembly. The 'RIGHT SIDE VIEW' on the right shows the turbocharger from the side, highlighting its connection to the engine's exhaust manifold.

GRAPHIC #1

<END>

g01034087

