



EPSI NÁUTICA, MÁQUINAS Y RADIOELECTRÓNICA NAVAL

**TRABAJO DE FIN DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE GRADUADO EN NÁUTICA Y
TRANSPORTE MARÍTIMO**

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL
MUNDO MARÍTIMO**

Por

Jonay Delgado Yanes

Dirigido por

Ángela Hernández López

Julio de 2019

Yo, Dr. Ángela Hernández López, Profesor Ayudante Doctor del área de conocimiento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna, como tutor de la alumna:

Jonay Delgado Yanes,

autorizo la presentación y defensa del Trabajo Fin de Grado titulado:

“MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MUNDO MARÍTIMO”

A su vez, confirmo que la alumna ha cumplido con los objetivos generales y particulares que lleva consigo la elaboración del mismo y las normas del reglamento del Trabajo Fin de Grado de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.

Para que conste y surta los efectos oportunos, firmo la presente.

En Santa Cruz de Tenerife a 5 de julio de 2019.



Fdo.: Ángela Hernández López.

Director del trabajo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar mi más sincero agradecimiento a la tutora de mi trabajo, la profesora D^a Ángela Hernández López ya que con su ayuda he conseguido culminar la redacción de este trabajo.

También quiero dedicar unas líneas de gratitud a mis familiares y sobre todo a mi pareja, debido a la comprensión de elegir una profesión como esta y al apoyo ofrecido estos cuatro años. También agradezco el empeño puesto por parte de todo el personal de la universidad para que esta etapa fuera más amena, y en especial al profesorado, que nos proporciona las bases tan necesarias para el desarrollo de nuestra profesión.

No quería acabar sin mencionar y agradecer a las amistades que me han acompañado desde el inicio del grado hasta las amistades que me llevo de él.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| I. RESUMEN..... | 1 |
| II. OBJETIVOS | 5 |
| III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES | 9 |
| 1. ORIGEN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL | 11 |
| 2. ¿QUÉ ENTENDEMOS POR MANTENIMIENTO? | 13 |
| 2.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO..... | 13 |
| 2.1.1 PRIMER MODELO DE LA NORMA EN-13306: 2018..... | 14 |
| 2.1.2 SEGUNDO MODELO DE LA NORMA EN-13306: 2018 ... | 15 |
| IV. DESARROLLO..... | 17 |
| 1. PLANES DE MANTENIMIENTO ACTUALES EN LOS BUQUES..... | 19 |
| 2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MUNDO MARÍTIMO | 19 |
| 2.1 CONSIDERACIONES PARA IMPLEMENTAR UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN BUQUES | 20 |
| 2.2 TÉCNICAS DE MEDICIÓN | 21 |
| 2.2.1 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES..... | 21 |
| 2.2.2 TERMOGRAFÍA | 23 |
| 2.2.3 ULTRASONIDOS | 25 |
| 2.2.4 TRIBOLOGÍA..... | 27 |
| 2.2.5 MEDICIONES ELÉCTRICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS | 29 |
| 2.3 PRIORIDAD DE LOS EQUIPOS QUE REQUIEREN MANTENIMIENTO | 30 |
| 2.3.1 EQUIPOS MUY CRÍTICOS..... | 30 |
| 2.3.2 EQUIPOS CRÍTICOS..... | 31 |
| 2.3.3 EQUIPOS CON PRIORIDAD NORMAL..... | 31 |
| 3.VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO | 31 |
| 4. EJEMPLOS DE PLANES DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MUNDO MARÍTIMO | 33 |
| 4.1 ARMADA ESPAÑOLA (PROGRAMA ARGOS21) | 33 |
| 4.2 EMPRESA "MACHINE PROGNOSTICS" | 38 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 4.3 Empresa "STS Defence" | 43 |
| V. CONCLUSIONES | 49 |
| VI. BIBLIOGRAFÍA..... | 53 |

I. RESUMEN

El mantenimiento de las máquinas ha sido durante gran parte del siglo pasado el pilar fundamental para el buen funcionamiento de toda planta industrial y como no podía ser de otra manera el sector marítimo no es la excepción. Desde sus inicios, el mantenimiento industrial ha sufrido desde distintas divisiones hasta la creación de una norma que continua hoy en día y marca las pautas necesarias para que se desarrolle de manera óptima.

Dentro de los distintos tipos de mantenimiento aplicados en buques o plataformas marinas, aparece el mantenimiento predictivo cuyo objetivo incide en la mejora de las capacidades productivas de todo el buque. La tendencia predictiva gana terreno frente a otros tipos como el mantenimiento preventivo o correctivo, aportando a las empresas navieras beneficios operativos y económicos a largo plazo.

Esto no implica que el análisis llevado a cabo con el mantenimiento predictivo se efectivo al 100% pero con la correcta elección de las mediciones que se pueden tomar, priorizar los equipos más críticos y un posterior estudio por parte de profesionales se llega a conseguir grandes mejoras.

La Armada Española y distintas empresas están introduciendo estos métodos en el sector con una buena acogida por parte de la flota, ya que se ha conseguido detectar averías que podrían haber dejado inactivo una parte esencial del buque en su operativa o situaciones de peligro por el desconocimiento de un posible fallo.

The maintenance of machinery is key for an adequate functioning in any industry, and specially for maritime sector. From its beginning, the industrial maintenance has changed in many times, for example with the appearance of different divisions or the creation of rules which continues today and it sets the necessary guidelines for the optimal development.

One type of maintenance applied to ships or marine platforms, is the predictive maintenance that pretends to improve the productive capacities of the ship. This kind of maintenance presents advantages versus other types as preventive or corrective ones, contributing operational and economic benefits to shipping companies in a long term.

The analysis carried out with the predictive maintenance is not effective at 100%, but the correct choice of measurements to prioritize the most critical equipment and a later study by professional, it get it to reach great improvements.

The Spanish Navy and different companies are introducing these methods in the sector with a good reception. The predictive maintenance has been able to detect serious failures that could have caused a dangerous situation or that could have rendered inoperative part of the ship.

II. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado, es realizar un repaso por la actualidad del mantenimiento predictivo en la industria y cómo se está comenzando a implementar en el ámbito marítimo.

Dentro del objetivo general del trabajo, se destaca la importancia que tiene el mantenimiento en los distintos sistemas que conforman una planta, ya sea industrial o marina, teniendo en cuenta el papel fundamental que está comenzando a tener el mantenimiento predictivo.

Cabe destacar también los siguientes objetivos específicos:

1. Conocer los diferentes tipos de mantenimiento que existen, valorando cada uno.
2. Exponer las ventajas y desventajas que supone invertir en el mantenimiento predictivo por parte de las empresas.
3. Explicar las distintas mediciones que se puede realizar en el mantenimiento predictivo y dar a conocer el desarrollo tecnológico de distintas empresas del sector en el mundo marítimo.

III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES

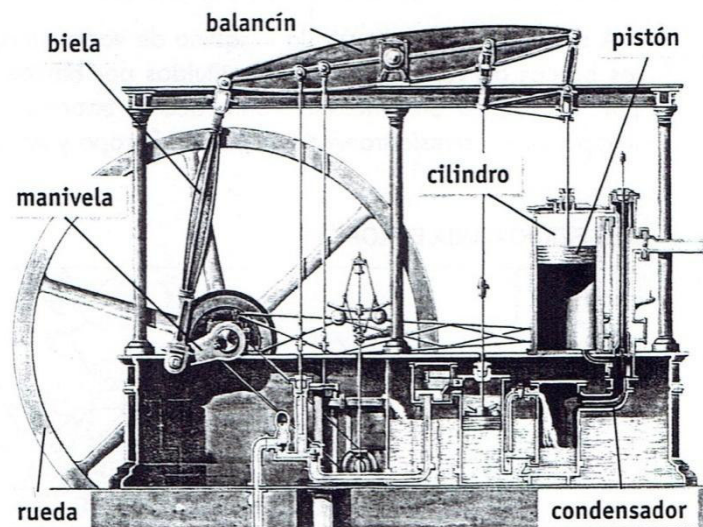
1. ORIGEN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

En el siglo XVIII, la mayoría de la población vivía de la agricultura. La maquinaria, en su mayoría accionada mecánicamente por elementos naturales como agua, viento..., les ayudaba a recolectar la cosecha para consumo propio. La labranza del campo era artesanal y prácticamente no existía el comercio.

A mitad de siglo se produce un gran cambio en las sociedades. En 1782 se inventa la máquina de vapor y se desarrolla el ferrocarril. Esto provoca una notable mejoría en los transportes, pasando de moverse en caballo a desplazarse por tren, además, se introduce la máquina de vapor en el mundo marítimo, naciendo así el barco de vapor. La agricultura y la ganadería también presentan avances gracias a la evolución tecnológica.

Ilustración 1: Máquina de vapor de James Watt

Fuente: <https://www.google.es/search>



De esta manera, la industria comienza a dividirse dando lugar a dos tendencias bien diferenciadas; la industria carbonera y la industria metalúrgica. Por esta razón, las personas que anteriormente dedicaban su vida a la agricultura y la ganadería se trasladan a las grandes ciudades con el fin de trabajar en las nuevas fábricas y mejorar su calidad de vida.

Ya en el siglo XIX, con el desarrollo de las primeras máquinas, se hace necesario repararlas cuando sufren alguna avería con el fin de no parar la producción.

Surge entonces el control de las paradas o fallos de dichas máquinas para evitar o disminuir retrasos en la cadena productiva. Por esto es posible afirmar que el origen que marca el comienzo del mantenimiento en la industria, se remonta al siglo XX donde aparece el concepto de *mantenimiento correctivo*. Dicho mantenimiento se ocupa de reparar la máquina cuando se ha producido un fallo en algún componente de la misma y a raíz de ello se ha parado.

Más adelante, a mediados de siglo con la I Guerra Mundial en auge, es necesario que los aviones estén el menor tiempo posible en tierra, por esta razón, se estudia la vida de las piezas y se sustituyen tras un periodo de tiempo determinado. A partir de ahí nace el concepto *mantenimiento preventivo*. No obstante, este tipo de mantenimiento limita su eficacia, pues es difícil saber con exactitud cuándo revisar o cambiar algún elemento de una máquina.

Ilustración 2: Mantenimiento de maquinaria años 40

Fuente: <http://www.tortosaingenieros.com>



A raíz de este problema, en los años sesenta aparece el concepto *mantenimiento predictivo* cuyo principio se basa en el estado operativo del equipo para luego decidir si es necesario actuar sobre él o no.

Ya en 1969, la empresa japonesa Toyota desarrolla el concepto TPM o *mantenimiento productivo total* cuyo objetivo es no responsabilizar únicamente al departamento de mantenimiento sino a toda la cadena productiva para poder

evitar la parada o fallo de la maquinaria. Este concepto se implementa en los años 80 y continúa hasta la actualidad. (Delgado, 2017)

2. ¿QUÉ ENTENDEMOS POR MANTENIMIENTO?

Como se observa en el capítulo anterior, la importancia a lo largo de los años y en la actualidad de evitar el fallo de maquinaria o conjunto de sistemas industriales a través del mantenimiento de dicha maquinaria es fundamental. Esta idea lleva a la definición de mantenimiento. A grandes rasgos, se entiende el mantenimiento como la combinación de diferentes acciones, ya sean técnicas, administrativas o de supervisión, de un activo con el fin de restaurarlo o mantenerlo en funcionamiento para que siga realizando su cometido.

Con esta definición, queda claro que el mantenimiento es un campo bastante amplio y en el que una sola acción no supone la reparación completa de un activo. Por ello, el mantenimiento se subdivide en distintas categorías con el objetivo de aclarar más el concepto. (S., 2014)

2.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO

En primer lugar, cabe destacar que distintos autores o profesionales del sector pueden realizar distintas clasificaciones respecto a los tipos de mantenimiento, no obstante, la clasificación que predomina es la que nos proporciona la norma europea **EN-13306** en su versión actualizada a 2017.

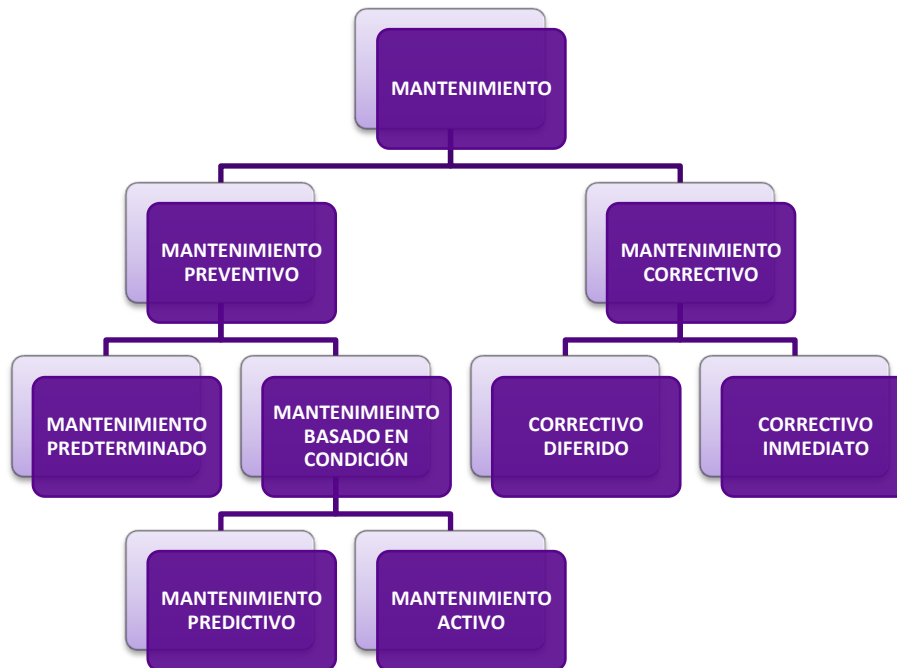
Dicha norma es de adopción obligatoria por los 28 países de la Unión Europea y sirve de referencia para las diferentes organizaciones de normalización, empresas... que se encuentren fuera de Europa.

Respecto a los tipos de mantenimiento, la norma EN-13306 propone dos modelos o escenarios que se presentan a continuación. (Sexto, 2017)

2.1.1 PRIMER MODELO DE LA NORMA EN-13306: 2018

Ilustración 3: Tipos de mantenimiento, primer modelo

Fuente: <http://se-gestiona.radical-management.com>



Como se puede observar en la ilustración 3, el primer modelo se centra en los cambios que pueda sufrir el activo en las características relacionadas con el diseño del mismo. Si no ocurren cambios en dichas características, el mantenimiento se divide en: *mantenimiento preventivo*, es decir, antes de que ocurra el fallo del activo, y *mantenimiento correctivo*, el que se realiza cuando ya ha ocurrido el fallo. En otras palabras, según el momento en el que ocurra el fallo, se determinará si se realiza un mantenimiento preventivo o correctivo.

Dentro del mantenimiento preventivo, las actuaciones se dividen en diferentes ramas distintas; por un lado se encuentra el *mantenimiento predeterminado*, conocido también como mantenimiento preventivo planificado, que corresponde con el mantenimiento que propone el fabricante con sus tiempos y reglajes, siendo también independiente de la condición de dicho activo. Por otro lado, se encuentra el *mantenimiento basado en condición (CBM)* y el

mantenimiento predictivo, que se encargan de actuar antes de que ocurra el fallo estudiando las características y el comportamiento del activo.

Después de realizar las distintas actividades de seguimiento y monitorización para evaluar la condición de un activo, relacionadas con el mantenimiento basado en condición o mantenimiento predictivo, la generación de la orden de trabajo, ya sea preventiva o correctiva, se le denomina *mantenimiento activo*.

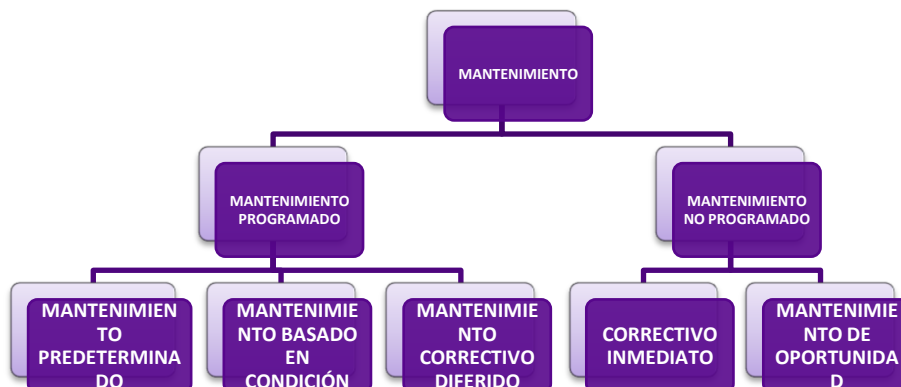
Dentro del mantenimiento correctivo, se encuentra el *mantenimiento correctivo inmediato* cuyo función es solucionar el fallo funcional del activo rápidamente después de verificarlo con el fin de contrarrestar las consecuencias de dicho fallo. Por otro lado aparece el *mantenimiento correctivo diferido* que, a diferencia del inmediato, se puede programar.

En adición, aparece un tipo de mantenimiento que no se encuentra dentro del correctivo ni del preventivo pero que se aplica cuando se intenta crear un cambio positivo en un activo o en alguna de sus características pero sin alterar sus funciones originales. Dicho mantenimiento se denomina *mantenimiento mejorativo*. (Sexto, 2017), (Española, 2018)

2.1.2 SEGUNDO MODELO DE LA NORMA EN-13306: 2018

Ilustración 4: Tipos de mantenimiento, segundo modelo

Fuente: <http://se-gestiona.radical-management.com>



Tal y como se observa en la ilustración 4, el segundo modelo aplica ciertos cambios respecto al primero. Como primera derivación del mantenimiento, se debe tener en cuenta la posibilidad de programar una serie de actividades de mantenimiento. Si fuera posible programarlo aparecería el *mantenimiento programado*, por el contrario, si no fuera posible aparecería el *mantenimiento no programado*.

Si se opta por el mantenimiento programado, existe a su vez distintas desviaciones por las que se puede dirigir el mantenimiento. En primer lugar se encuentra el *mantenimiento predeterminado*, con las mismas atribuciones que en el primer modelo, en segundo lugar aparece el *mantenimiento basado en condición*, el cual corresponde al CBM y al mantenimiento predictivo del primer modelo. En tercer lugar, el *mantenimiento correctivo diferido*, idéntico al del primer modelo pero ahora encaja mejor en este porque es un tipo de mantenimiento programable.

Por otro lado, el mantenimiento no programable también se subdivide con el fin de optimizar las tareas de mantenimiento y la elección del más adecuado. En un primer momento aparece el *mantenimiento correctivo inmediato*, ya que es un tipo de mantenimiento denominado de "intervención rápida" después de un fallo imprevisto. Como la mayoría de tipos en este modelo, también se encuentra en el anterior.

La segunda opción que ofrece el mantenimiento no programable es el *mantenimiento de oportunidad*, cuyo fin es considerar si las tareas de mantenimiento se ejecutan antes del fallo, o no inmediatamente después de un fallo pero sin una fecha predefinida para actuar. No obstante, dentro de este tipo de mantenimiento se puede incluir tareas o actividades programables. Por ejemplo, en una parada de un activo por razones de operativa se permite incluir dentro del mantenimiento de oportunidad, tareas ligadas no programadas de un mantenimiento correctivo diferido o de un mantenimiento preventivo.

Como se ha observado en los dos modelos, los tipos de mantenimiento se encuentra vinculados a una serie de actividades o tareas de mantenimiento. Dichas tareas asociadas serán las adecuadas para cada tipo de mantenimiento como por ejemplo preparación de las actividades, localización del fallo diagnóstico del fallo, reparación parcial, reparación total, rutina de revisión etc. (Sexto, 2017), (Española, 2018)

IV. DESARROLLO

1. PLANES DE MANTENIMIENTO ACTUALES EN LOS BUQUES

Teniendo en cuenta que los tiempos en puerto y la velocidad que requiere el transporte de mercancías hoy en día son frenéticos, es "normal" que el papel que toma el mantenimiento se deje un poco de lado, sobre todo, por el poco apoyo que ofrece la empresa armadora del buque a los tripulantes que cumplen cómo pueden los planes de mantenimiento. (Soutullo, 2015), (Cassola, 2012)

Un plan de mantenimiento puede variar de un tipo de buque a otro pero por norma general suele basarse en una estrategia a través del tiempo, en otras palabras, en un mantenimiento preventivo y en el caso de necesitarlo, en un mantenimiento correctivo.

No es coincidencia que el mantenimiento preventivo sea el más común en los buques puesto que es el más fácil de implementar por el equipo humano que trabaja dentro del mismo. Esto se debe principalmente, bien por falta de medios para realizar las mediciones que exige el mantenimiento predictivo o simplemente por la sencillez en el seguimiento de los tiempos del fabricante para sustituir una pieza.

Este tipo de mantenimiento permite a la tripulación organizarse mejor, pero presenta desventajas en relación a la eficiencia o rendimiento que se puede obtener de un equipo o de sistemas completos. Algunas de dichas desventajas pueden ser:

- Pérdida de tiempo y materiales ya que independientemente de la salud del equipo o pieza se realiza su sustitución.
- Los informes relacionados con el estado de una pieza o equipo solamente se realizan con el fin de que los datos recogidos consten en el registro del buque. Dichos datos pueden no ser una fuente fiable a la hora de determinar si una pieza o máquina necesita mantenimiento o no.

2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MUNDO MARÍTIMO

Como se ha visto anteriormente, el mantenimiento predictivo estudia mediante técnicas de análisis el estado de elementos y equipos y establece a su vez pautas para realizar su mantenimiento en el momento oportuno con el correspondiente ahorro de dinero y tiempo. Estas técnicas se aplican sobretodo

en equipos susceptibles de momentos críticos en su operativa tales como motores, bombas, turbos, cajas reductoras...

El objetivo principal de estudiar las distintas variables es optimizar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos sin que el coste de mantenimiento se exceda de lo estipulado. Su uso en la industria terrestre es cada vez mayor, pero en el sector marítimo su uso es más limitado por la poca implicación por parte de las empresas armadoras en dotar a sus tripulaciones de los equipos necesarios para la implementación de este mantenimiento. No obstante, la industria "offshore" y militar cada vez se introduce más en el uso de estas técnicas para evitar paros ocasionados por averías, alargar los tiempos destinados a mantenimiento y minimizar los tiempos de reparación, lo que conlleva a una mejora notable en toda la planta productiva.

En el mantenimiento predictivo se encuentran distintas técnicas de análisis como la medición de vibraciones, ultrasonidos, termografía y estudio de lubricantes entre otras variables. (Caro, 2017)

2.1 CONSIDERACIONES PARA IMPLEMENTAR UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN BUQUES

Un plan de mantenimiento predictivo requiere de unos conocimientos previos de la tecnología, algo a lo que las tripulaciones están habituadas, pero sobretodo, es necesario tener una amplia experiencia y entendimiento del equipo sobre el que se va a trabajar.

En el momento que un plan de mantenimiento predictivo se ponga en marcha, es necesario acompañarlo de un historial sobre el tiempo y la mano de obra que necesita con el objetivo de mejorarlo mientras se va ejecutando. En el caso de que el buque nunca haya realizado un mantenimiento predictivo de un equipo, se requiere crear un modelo de estudio fiable que sirva en el futuro para mejorar el mantenimiento de dicho equipo. Para ello, se toman lecturas periódicas de las variables que se escojan hasta que el equipo falle, o bien, los fabricantes de los instrumentos de medición y del software o el propio fabricante del buque pueden ofrecer estimaciones de los valores indicadores de fallo inminente para que los operarios encargados dentro del buque realicen la sustitución de la pieza.

Otra opción es realizar un sistema de recogida de datos más autónomo. En dicho sistema, los parámetros analizados de vibraciones, tribología, termografía etc se enviarán a un centro en tierra, donde hayan expertos que elaboren y devuelvan al buque, informes sobre la situación de los equipos que se están monitorizando. Este sistema utiliza la recogida automática de algunos de los parámetros como las vibraciones o los ultrasonidos para detectar a tiempo fallos graves que necesiten una atención inmediata.

En el caso de que los operarios del buque realicen su propio modelo, se tendrá en cuenta las variables a estudiar para poder definir qué instrumentos se necesitan y el software que mejor se adecue al plan de mantenimiento que se quiera introducir. Para ello, se están adentrando en el sector numerosas empresas dedicadas al mantenimiento predictivo que ofrecen excelentes aplicaciones informáticas e instrumentos de recogida de datos.

Como último paso y una vez que el modelo conozca los momentos y puntos críticos de una pieza se introducen alarmas al sistema que den acuse para su posterior reemplazo. (Caro, 2017), (Robles, Profesionales hoy, Rotación, 2016)

2.2 TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Teniendo el equipo necesario para tomar las distintas mediciones y entrenada la tripulación para la familiarización con el equipo se comienzan a estudiar las distintas variables como son las vibraciones, la termografía, el ultrasonido, la tribología y las mediciones eléctricas. Dichas técnicas no proporcionan solución a cómo evitar que un componente o sistema fallen, pero sí el momento aproximado en que la pieza fallará. (Márquez, 2017), (Defensa, 2016), (Caro, 2017)

2.2.1 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Esta técnica es de las más efectivas para detectar problemas mecánicos en máquinas rotatorias. Cualquier máquina activa vibra, sobre todo en las partes móviles debido a la rugosidad de las superficies que se encuentran en contacto constante, pero dichas vibraciones están en los parámetros normales. Si estas aumentan, indican que hay un fallo mecánico en la máquina, pudiendo

desencadenar en impactos entre componentes causados por las holguras y obligando a una revisión del equipo.

Para que este estudio tenga validez es necesario disponer de distintos datos de la máquina tales como el tipo de cojinetes, correas, velocidad de giro, número de palas, álabes... Por otro lado, es necesario conocer los puntos ideales en la máquina para realizar las mediciones y el equipo adecuado. El interés de esta medición radica en identificar las amplitudes predominantes de las vibraciones en el equipo, las causas de la vibración y la corrección del problema.

A la hora de realizar el estudio, se utilizan analizadores de vibraciones que constan de un sensor pinzo-eléctrico que se coloca encima de la superficie del equipo a monitorizar para detectar posibles esfuerzos de compresión. El dispositivo muestra en su pantalla el espectro de vibración que proporciona los datos de frecuencia/amplitud recogidos por el sensor. La frecuencia determina el origen de la vibración y la amplitud se encarga de determinar la gravedad de la misma, por ello, cuando la amplitud sobrepasa los límites o el espectro de vibración cambia en el tiempo se debe revisar el equipo. Por otro lado, el aumento de la frecuencia indica algún cambio en la pieza. En otras palabras, el nivel vibratorio indica la gravedad del fallo y el espectro de vibración el tipo de fallo.

Ilustración 5: Analizador de vibraciones (izquierda) y espectro de vibración (derecha)

Fuente: <http://www.preditec.com>



Normalmente, el intervalo entre mediciones está determinado por la experiencia del operario encargado, pues si el equipo a controlar falla frecuentemente, o el fallo supondrá una situación de gravedad, las mediciones deberán ser más frecuentes en el tiempo. En el supuesto de que los fallos ocurrieran a menudo o los resultados obtenidos por la medición sean inaceptables, pues los datos ofrecidos no concuerdan con la situación que se observa, se podría monitorizar el equipo con instrumentos instalados permanentemente.

Los fallos comunes que proporciona este tipo de mediciones son desequilibrios, desalineamientos, roces, holguras, anormalidades en engranajes o rodamientos dañados entre otros. (Márquez, 2017), (Defensa, 2016), (Caro, 2017)

2.2.2 TERMOGRAFÍA

La termografía se encarga de estudiar la temperatura de las máquinas que se encuentran funcionando, con la ventaja de poder medirla a distancia y sin contacto, para determinar si dicha temperatura en la superficie es correcta o no.

Esta técnica usa rayos infrarrojos para crear imágenes térmicas que ayuden a determinar fuentes de calor inusuales que pueden provocar un problema electromecánico en la máquina. Normalmente su uso está destinado a monitorizar líneas eléctricas, motores, o cuadros eléctricos, ya que en ellos puede llegar a producirse zonas calientes inusuales, ya sea por defectos en el material o por un mal aislamiento, provocando fugas de calor.

En el momento que un mecanismo está desalineado, distintos puntos de la máquina se recalientan y esto provoca que se produzca un desgaste con la consecuente pérdida de eficiencia. En este punto, los componentes defectuosos disipan más calor rápidamente y se produce la avería. Por ello es necesario realizar el seguimiento de la temperatura que sirva para comparar la imagen térmica dada por el fabricante y la que realmente se está dando.

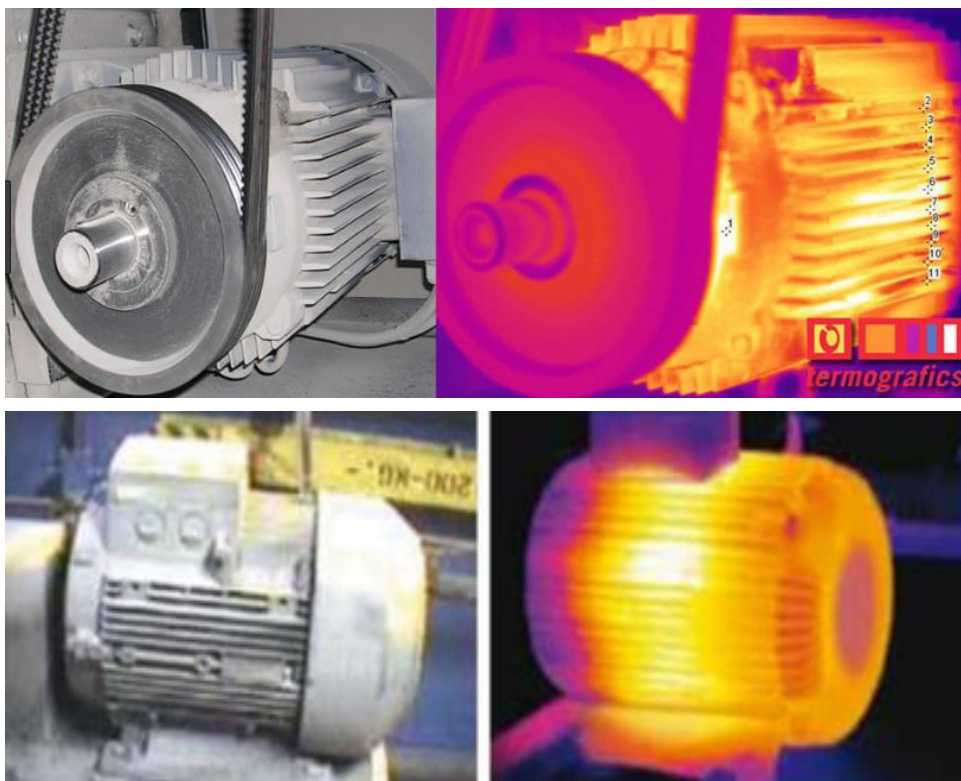
Los posibles fallos que pueden haber en un motor eléctrico por ejemplo, pueden ser el desgaste en las escobillas o cortocircuitos en la estructura externa. Estos suelen subir en exceso la temperatura, por ello esta técnica es

más eficaz que un análisis de vibraciones, pues prácticamente estos fallos no generan ninguna anomalía en cuanto a vibraciones.

La energía que desprende la superficie de una máquina o equipo en forma de calor, viaja en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz. Esta energía es directamente proporcional a la temperatura, por lo tanto a más calor desprendido, más energía emitirá. Ya que la longitud de las ondas no son perceptibles por el ser humano el equipo que se usa para medir la temperatura se denomina cámara termográfica, cuya función es transformar la energía desprendida en un espectro visible de radiación infrarroja y observar los cambios por el operario.

Ilustración 6: Imagen térmica de un motor eléctrico en buen estado (superior) y un motor eléctrico con problema de bobinado (inferior)

Fuente: "Mantenimiento: Técnicas y aplicaciones industriales"



Como se observa en la imagen, la parte superior indica un motor eléctrico con una temperatura estable en todo su conjunto y en la parte inferior se puede detectar una subida anormal de la temperatura por el color amarillo intenso que desprende la parte central del motor. Cerca de esta zona se encuentran los bobinados del motor, por lo tanto, puede haber problemas como cortocircuitos en el bobinado principal o auxiliar, sobrecalentamientos en uno o en ambos bobinados o que el rotor se encuentre bloqueando el sistema entre otros problemas.

Debido a que la cantidad de energía que el cuerpo va a irradiar variará en función de su emisividad, es recomendable ajustar correctamente las cámaras termográficas puesto que de lo contrario las mediciones podrían no ser fiables ya que también depende el tipo de acabado y recubrimiento de la pieza, no solo el material del que están hechas. Obviamente también se debe tener en cuenta la temperatura ambiente, distancia hasta la pieza, condiciones atmosféricas...

Algunos ejemplos de fallos detectados por la técnica termográfica pueden ser: problemas en la lubricación, bombas sobrecargadas, ejes de motor sobrecalentados o errores de alineación entre otros. (Márquez, 2017), (Defensa, 2016), (Caro, 2017)

2.2.3 ULTRASONIDOS

La técnica de ultrasonidos permite encontrar fallos que otras técnicas no permiten, por ejemplo en máquinas rotativas con menos de 300 RPM de velocidad de giro. El estudio se centra en las ondas de sonido de alta frecuencia generadas por los equipos e íntimamente relacionadas con una avería.

Como se ha comentado anteriormente, un análisis de vibraciones o una imagen termográfica de una máquina pueden mostrar indicaciones de que un fallo se encuentra en un horizonte no muy lejano. Sin embargo, una prueba de ultrasonido permite encontrar cambios microscópicos con bastante antelación en las fuerzas de fricción de un equipo antes de que dicho equipo entre en un estado crítico. Esto proporciona tiempo suficiente para tener en cuenta las medidas que se deben poner en marcha respecto al mantenimiento de la máquina.

Esta técnica gana terreno a las demás pues no tiene excesivos gastos de implementación, es versátil y los fabricantes del hardware permiten al operario

adaptarse rápidamente a la interfaz y a su uso, no obstante, el operario debe estar entrenado en comparación con otro método de medición.

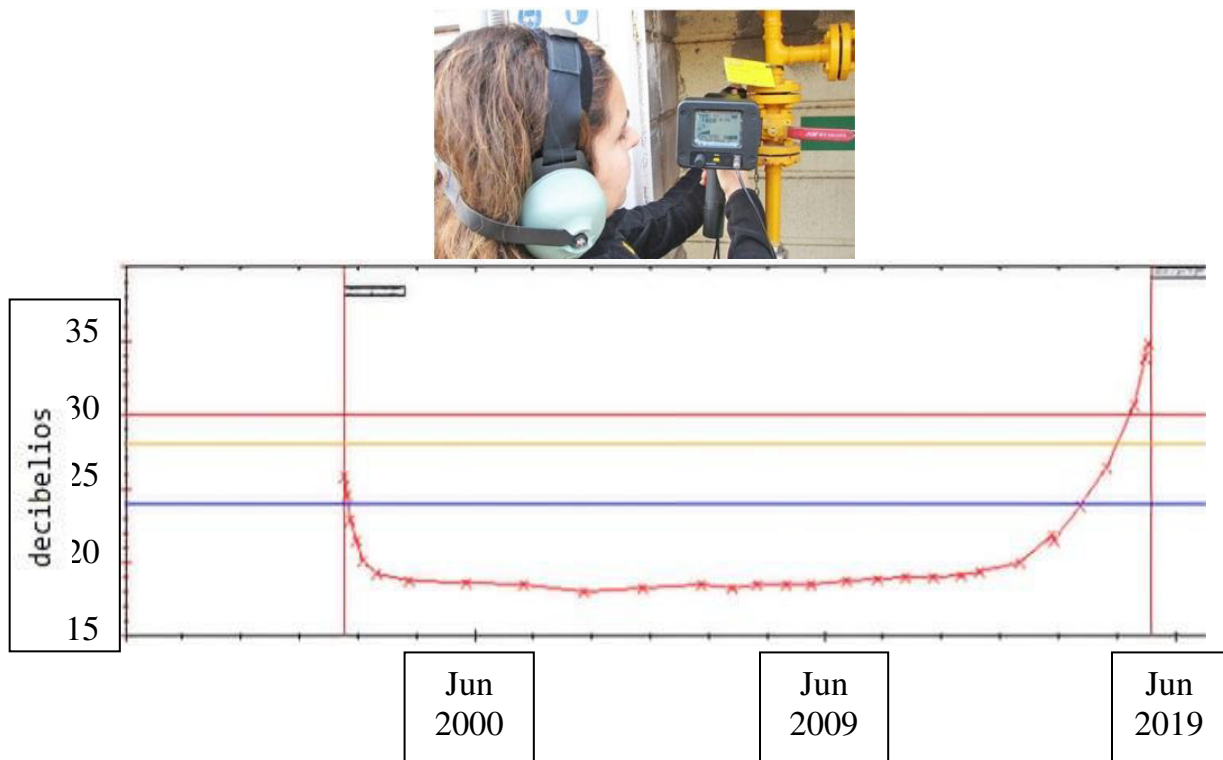
El estudio se basa en captar el tiempo que pasa entre la emisión de la señal y la recepción de su eco pues esto va a determinar la distancia del defecto puesto que la velocidad de propagación del material se conoce previamente, y ya que las ondas se atenúan rápidamente por su corta longitud, es muy fácil detectar de donde provienen aun encontrándose en un ambiente ruidoso.

Los instrumentos que sirven para captar las ondas producidas por el defecto se denominan medidores de ultrasonido. Estos aparatos transforman las ondas ultrasónicas en ondas audibles y el operario a través de audífonos o de una pantalla interpretará las señales. Los sensores que tiene el medidor son también pinzo-eléctricos pero con algunas diferencias respecto al sensor de vibraciones. La amplitud ultrasónica, que es la variable a observar se mide en decibelios.

El uso de los medidores ultrasónicos ha permitido observar defectos tales como fugas en válvulas o conducciones, mala lubricación, inspección de reductoras y alineamientos de ejes, ensayos de estanqueidad en buques, inspecciones eléctricas de transformadores o la comprobación del efecto de cavitación.

Ilustración 7: Medidor ultrasónico y señal recibida

Fuente: <https://www.tbn.es/>



Como se puede ver en la fotografía, el operario está realizando la medición de los ultrasonidos de una válvula. Al introducir los datos en el programa informático, éste proporciona el esquema de la amplitud ultrasónica de las ondas producidas medidas en decibelios y el histórico de las mediciones desde una fecha determinada. Dicho histórico se denomina "gráfica de salud" y en ella se observa que al sobrepasar la línea roja se necesita tomar acciones de mantenimiento en esa pieza porque el fallo es inminente. (Márquez, 2017), (Defensa, 2016), (Caro, 2017)

2.2.4 TRIBOLOGÍA

Este método no se encuentra tan integrado en el sector marítimo, pues se basa en analizar el lubricante que se utiliza en cualquier máquina rotativa y a bordo no es posible realizar ese estudio tan exhaustivo ya que requiere de un laboratorio especializado. No obstante, es un tipo de medición que está ganando fuerza en la industria. (Márquez, 2017), (Defensa, 2016), (Caro, 2017)

Para que una máquina funcione correctamente, su lubricación debe ser controlada en todo momento ya que la película que recubre los distintos elementos mecánicos evita un desgaste prematuro, el aumento de temperatura, aumento de las fuerzas de rozamiento etc lo que provocaría bloqueos de piezas. Aun así, un buen nivel de lubricante no garantiza que no exista desgaste pues conforme pasa el tiempo, este va perdiendo propiedades lubricantes y sufre contaminación externa por el polvo, agua... como contaminación interna por la formación de residuos.

El análisis del lubricante, la comprobación del grado de contaminación que tiene y su grado de degradación es un buen método para comprobar el estado de un equipo, pero para ello, es necesario llevar a cabo una frecuencia de muestreo, la condición en la que se ha tomado esa medida etc antes de enviarla al laboratorio.

En una muestra de aceite, la contaminación se determina por el número de partículas metálicas de desgaste, el agua que pueda contener y materias carbonosas entre otros elementos.

En la industria "offshore", tan ligada a los lubricantes, sí se realizan muestreos más simples que miden distintos parámetros como la constante dieléctrica para

evaluar la contaminación que pueda contener o el contenido de agua en ese lubricante lo que también indicaría su grado de contaminación.

Por otro lado, también se analizan los parámetros relacionados con la calidad del lubricante como el índice de detracción química que indica el desgaste del lubricante, el índice de desgaste férrico para determinar si los engranajes de la máquina están sufriendo, la viscosidad con el fin de comprobar la degradación química y su efectividad y la detergencia de dicho lubricante para conocer la capacidad de limpieza del mismo.

Los equipos para la recogida de los residuos del lubricante son:

- Filtros: el filtro se extrae y se analizan los residuos al microscopio para conocer su tamaño y contorno, y a través de un espectrómetro, se averigua su composición. Gracias a esto, se pueden observar cambios en los elementos que se encuentran bañados por el lubricante.
- Colectores magnéticos de residuos: son buenos aliados para la recogida de elementos ferrosos.

Ilustración 8: Desgaste por una lubricación defectuosa

Fuente: <https://blog.atten2.com>



Tal y como se ve en la imagen, se observa un desgaste del metal de los engranajes por un mal seguimiento del lubricante usado.

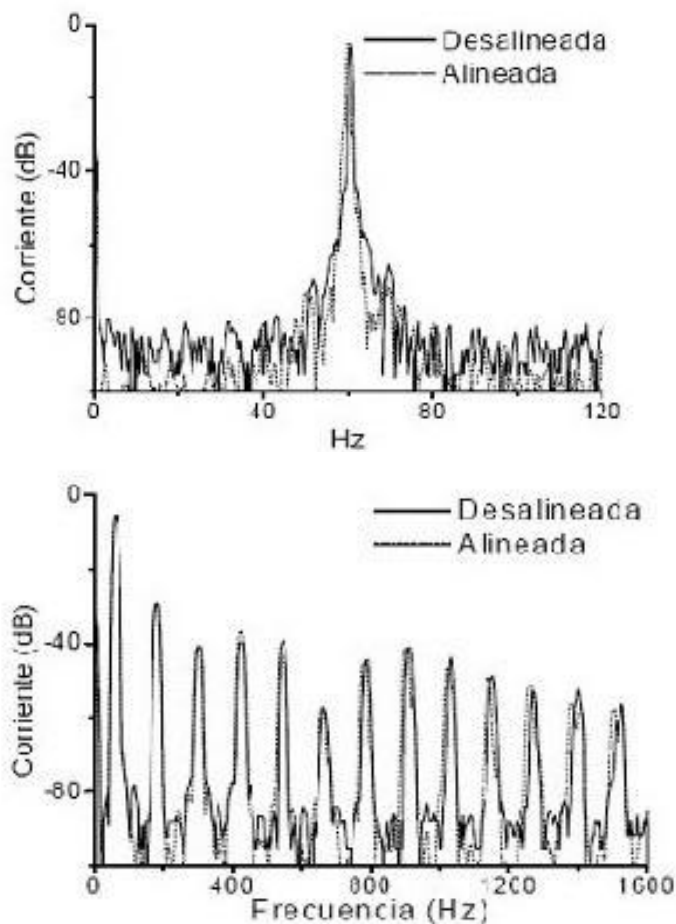
2.2.5 MEDICIONES ELÉCTRICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS

Este tipo de medición sirve de gran ayuda, pues hay ciertos fallos comunes en los motores eléctricos que los análisis de vibraciones no llegan a detectar por sí solos. Por ello, a través de estudiar la corriente y la tensión eléctrica junto a las vibraciones, se pueden observar averías como fallo en el rotor del motor, mal aislamiento, mala calidad de alimentación... entre otros.

Para determinar la existencia de daño en el rotor, estator o el entrehierro del motor, se toma la lectura del consumo del motor y se comprueba que no haya cambios en la frecuencia o amplitud de la onda. La medición se realiza con pinzas conectadas al arrancador del motor en el cuadro de control midiendo la tensión y la intensidad.

Ilustración 9: Análisis de la frecuencia en motores eléctricos

Fuente: <https://scielo.conicyt.cl>



En ambas imágenes, se pueden observar dos gráficas de salud donde las líneas continuas indican el desalineamiento del motor y las líneas discontinuas indican un motor alineado. En dichas pruebas se les aplican distintos barridos de frecuencia. (Márquez, 2017), (Defensa, 2016), (Caro, 2017)

2.3 PRIORIDAD DE LOS EQUIPOS QUE REQUIEREN MANTENIMIENTO

Desde que se inicia un plan de mantenimiento predictivo en el buque, es importante clasificar los equipos que suponen un mayor riesgo para el buen funcionamiento del mismo. Los criterios a tener en cuenta son; el coste del mantenimiento del equipo y su importancia en el buque.

Para realizar la lista de prioridad, se agrupan todos los elementos del buque tales como bombas, motores, equipos de navegación... y se ordenan según la importancia que tienen dentro del sistema. Es importante tener el plano del buque a la hora de realizar el listado para no olvidar ningún equipo. Una vez hecha la lista general, se procede a redactar pequeñas listas donde se dividen los elementos en equipos muy críticos, elementos críticos y equipos con prioridad normal.

Otros criterios para establecer que tan prioritario es ese elemento dentro del sistema del buque son el costo de la reparación, el tiempo que llevará realizar la reparación, la frecuencia de fallo o el índice ambiental entre otros. (Márquez, 2017)

2.3.1 EQUIPOS MUY CRÍTICOS

En esta categoría se incluye todo el equipo necesario para el buen funcionamiento del buque, es decir, el fallo de alguno de estos elementos supondría una parada relativamente prolongada en el tiempo de todo el buque, por ejemplo los motores. También se incluyen los equipos que necesitan piezas enviadas desde tierra y su tiempo de entrega puede ser largo, aunque no produzcan un paro en el sistema.

Por ello, en este grupo se debe tener más en cuenta aún los criterios anteriormente mencionados, pues aunque ciertas piezas o equipos no supongan

un gasto excesivo sí producen un gran inconveniente en toda la operativa del buque, o por el contrario, piezas que no provocan inconvenientes suponen un gran gasto y se deben incluir aquí también. (Márquez, 2017)

2.3.2 EQUIPOS CRÍTICOS

En este grupo se incluyen aquellos equipos que en el caso de una avería afectaría al buen funcionamiento de todo el buque en un 30%. Al igual que en los equipos muy críticos, si una pieza tarda en llegar desde tierra, ese porcentaje gana peso. En esta categoría también entrarían los equipos con un costo de mantenimiento alto y aquellos que presentan muchas intervenciones en su mantenimiento ya sea por diseño o por el trabajo al que se dedican. Elementos que entran en este grupo podrían ser bombas, equipos radioelectrónicos, equipos de navegación... (Márquez, 2017)

2.3.3 EQUIPOS CON PRIORIDAD NORMAL

Aquí se incluyen los equipos que no causarían un alto impacto si dejaran de funcionar tales como bombas de sentinas, depuradoras.... Sobretudo entran en esta categoría los sistemas que cuentan con "unidades de reserva". También se considera que tienen prioridad normal aquellos equipos cuya reparación se puede realizar en una hora o menos aunque el costo sea elevado, o aquellos que incluso puedan ser mantenidos por una empresa externa al buque. (Márquez, 2017)

3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Las técnicas predictivas ofrecen un gran beneficio para la empresa que las use, no obstante, existen ciertos inconvenientes que se deben tener en cuenta y que se también se mostrarán a continuación. (Márquez, 2017), (Valbor Soluciones), (Robles, Preditec Grupo Álava, 2008), (Robles, Profesionales hoy, Rotación, 2016)

- Ventajas

- **Ahorro en piezas de repuesto.** Al llevar a cabo las técnicas de mantenimiento predictivo, se consigue un mayor control sobre los recambios para una máquina. Como se ha observado, el mantenimiento predictivo no está basado en cambiar las piezas en un tiempo determinado como sí lo realizaría el mantenimiento preventivo por ejemplo. Esto implica un ahorro en repuestos a largo plazo.
- **Incremento de la fiabilidad.** Los oficiales de los buques cuentan con una excelente formación para familiarizarse con las nuevas tecnologías que se introducen en los barcos. Esto, unido a los precisos instrumentos que ofrecen las empresas dedicadas al mantenimiento predictivo con una gran cantidad de información acerca del estado de una máquina, permite tomar mejores decisiones a la hora de intervenir en un equipo.
- **Reducción en el tiempo de mantenimiento.** Ya que el mantenimiento predictivo sustituye solamente las piezas que lo necesitan, existe mayor disponibilidad en los equipos y se gana tiempo para realizar otras tareas.
- **Ahorro en mantenimiento.** Como el seguimiento de los equipos es más exhaustivo, los mantenimientos correctivos prácticamente desaparecen. Esto implica una menor realización de trabajos de urgencia con su consiguiente gasto, considerado de los mayores dentro de los gastos que supone la realización del mantenimiento.
- **Disminución de accidentes.** Al monitorizar las distintas máquinas, se consigue reducir los accidentes laborales con el consiguiente aumento de la seguridad operacional.

- Desventajas

- **Gran inversión.** Ya que los equipos para la toma de datos tienen que ser precisos, la inversión inicial por parte de la empresa debe ser alta.
- **Entrenamiento del personal.** Aunque los oficiales del buque tengan capacidad suficiente para llevar a cabo un plan de mantenimiento

predictivo, es necesario introducirlos en el manejo de los instrumentos para la obtención de datos y la interpretación de los resultados obtenidos.

- **Es difícil aplicarlo a todas las empresas.** Muchas navieras por cuestiones de tiempo y de márgenes muy reducidos, optan directamente por un plan de mantenimiento correctivo o preventivo sin observar el beneficio a largo plazo que supone un plan de mantenimiento predictivo. Requiere de una gran cooperación entre los operarios hasta la dirección de la empresa.
- **Embarcar un experto a bordo.** Se considera una desventaja, pues contar con un experto analista a bordo facilitaría las decisiones al inicio de un plan de mantenimiento predictivo. No obstante, esta desventaja se puede revertir entrenando a las tripulaciones desde un primer momento.

4. EJEMPLOS DE PLANES DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MUNDO MARÍTIMO

En este apartado se presentarán distintos proyectos que giran en torno a un plan de mantenimiento predictivo. Dichos planes se están llevando a cabo en el sector como se ha comentado en capítulos anteriores, sobretodo en el militar y el offshore.

4.1 ARMADA ESPAÑOLA (PROGRAMA ARGOS21)

El Ministerio de Defensa ha creado junto al astillero NAVANTIA, de donde sale el grueso de la flota militar española, un programa denominado "ARGOS 21" que recopila los datos de las mediciones realizadas en los buques para su posterior envío a centros en tierra su correspondiente análisis.

La armada española cuenta desde 2010 con el Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR) con su sede principal ubicada en el Arsenal de Cartagena. Sus centros externos se encuentran en el resto de arsenales y en Madrid.

Como se comentó anteriormente, el sistema CESADAR es un programa de mantenimiento que recibe, almacena y procesa los distintos parámetros

analizados de los equipos instalados en el buque para mejorar el plan de mantenimiento y anticiparse a posibles averías.

Ilustración 10: Red CESADAR

Fuente: <https://www.navantia.es>



El programa cuenta con un sistema para reunir datos del Sistema de Control Integrado de la Plataforma (SICP) de los distintos buques de la armada con su correspondiente envío a tierra, un software que analiza los datos recabados y una red informática en tierra que permite almacenar e intercambiar información con los distintos centros. La información tomada por el SICP de los buques, envía en tiempo real al Arsenal de Cartagena todos los parámetros de cada equipo del buque para mejorar el mantenimiento predictivo.

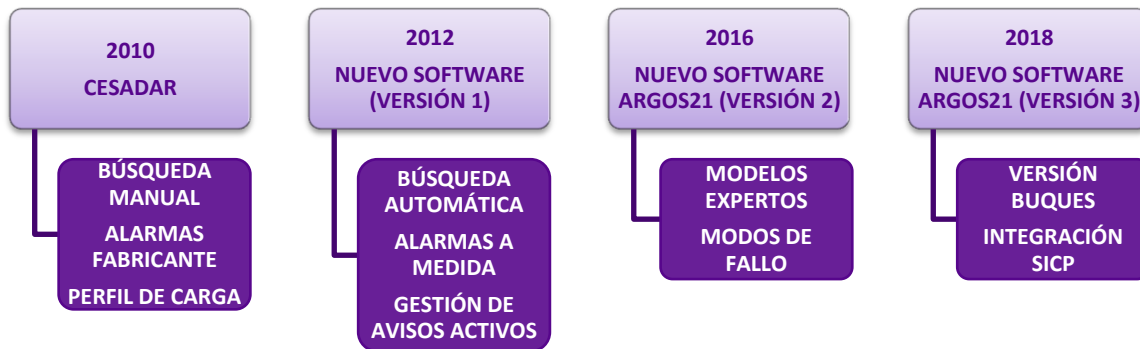
En 2011, NAVANTIA comenzó una nueva línea de investigación en torno al mantenimiento predictivo con el objetivo de mejorar los planes de mantenimiento en los buques introduciendo en mayor medida el análisis de lubricantes y la monitorización de la salud de los distintos equipos.

Entre 2011 y 2012, se desarrolló un sistema que pudiera obtener alarmas hechas a medida para cada equipo dependiendo de sus parámetros normales de trabajo y de su posición dentro del buque. También se diseñó un panel de gestión de avisos activos. Esta mejora fue añadida al sistema CESADAR.

Durante 2013 hasta 2015, se comenzó otro desarrollo con el fin de seguir mejorando el sistema y se crea el programa "ARGOS21 versión 2". La mayor novedad es la implementación de una plataforma predictiva inteligente que reúna todas las señales que puedan transformarse en indicadores de salud de los equipos y puedan predecir y diagnosticar fallos. Esto permite al operario tomar mejores decisiones a la hora de realizar mantenimientos y además puede servir de ayuda en la operativa del buque. El sistema incluye también inteligencia artificial que detecte y gestione todas las anomalías con las señales disponibles. A continuación se explicará con más detalle el software "ARGOS 21".

Ilustración 11: Evolución del software ARGOS 21

Fuente: <https://www.navantia.es>



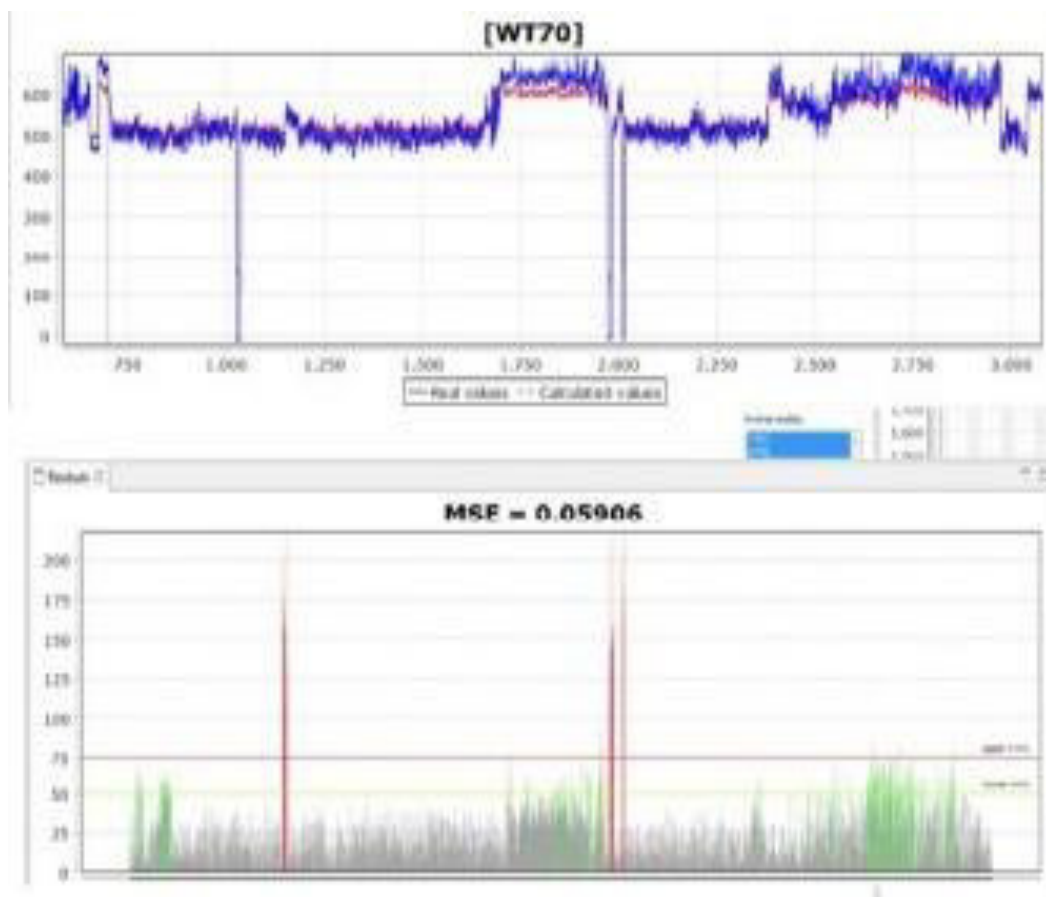
➤ ARGOS21 versión 2

El programa está compuesto por distintos módulos funcionales que actúan en concordancia con el fin de generar modelos que proporcionen un diagnóstico fiable. Dichos modelos se basan en datos reales históricos tomados en el equipo antes de instalarlo a bordo para crear límites y modelos de funcionamiento y reglas para fallos concretos. Cuando el modelo está creado y se comprueba su funcionamiento, se instala el software en el buque para que comience el análisis y predicción de fallos a medida que los equipos están funcionando.

El software se divide en dos partes; una offline para la creación y otra online para la utilización del programa. La parte offline se denomina Herramienta de Ingeniería de Modelos Expertos (HIME) y en él, el operario de NAVANTIA introduce los datos históricos de las mediciones hechas en los equipos y propone unos límites y reglas a seguir por los oficiales del buque cuando éste comience su ciclo de vida o para un buque que ya se encuentre funcionando.

Ilustración 12: Ejemplo de creación de un modelo para un equipo en la herramienta HIME

Fuente: <https://www.navantia.es>



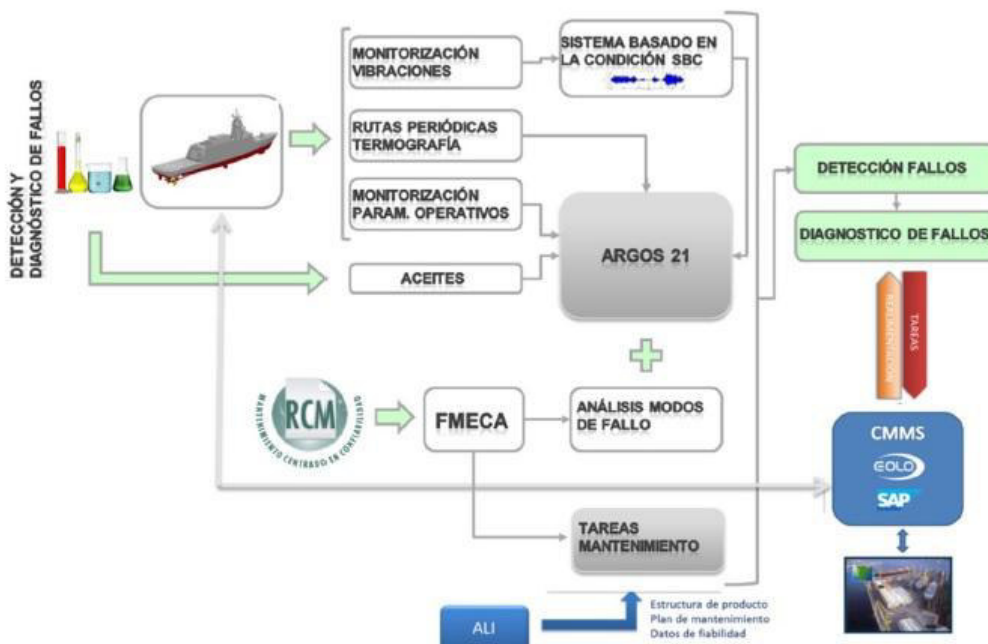
Como se puede observar en la ilustración 12, las gráficas muestran la creación de un modelo predictivo en la herramienta HIME. Dichas gráficas proporcionan una visión clara de los parámetros ideales de funcionamiento introducidos por el operario de NAVANTIA. También se realizan distintas pruebas introduciendo posibles valores reales para comprobar que el modelo funciona correctamente. Un ejemplo de esto son los picos de color rojo en la gráfica inferior que indican un posible fallo. Las gráficas corresponden a los diferentes módulos creados para las distintas técnicas predictivas (termografía, ultrasonidos, análisis eléctricos...)

Cuando el modelo creado en el HIME es aceptado, se envía a la otra parte del software denominada "ARGOS 21 versión 2" que se encuentra instalado en el buque y en un centro de control en tierra. Dentro de "ARGOS 21 versión 2" es donde se produce la ejecución de los modelos creados en HIME para controlar los parámetros de funcionamiento de los equipos monitorizados.

Cuando el programa se está ejecutando, además de poner en marcha los modelos dados por los expertos de NAVANTIA y recibir nuevos datos en tiempo real que se introducen en el HIME, se introducen también modelos de fallo y estrategias de mantenimiento dados previamente por el fabricante del equipo. Si se han introducido estos modelos, resulta más sencillo realizar una diagnosis óptima antes de comenzar con las tareas de mantenimiento.

Ilustración 13: Esquema del sistema implementado en los buques de la armada

Fuente: <https://www.navantia.es>



A partir del año 2018, NAVANTIA sigue desarrollando el programa "ARGOS21" en su tercera versión con mejoras como el entrenamiento de la tripulación, para la comprensión del programa al completo sin la necesidad de expertos en tierra, con el fin de que la flota sea cada vez más autónoma en relación a la estrategia predictiva. (Defensa, 2016)

4.2 EMPRESA "MACHINE PROGNOSTICS"

La empresa noruega Machine Prognostics ha desarrollado un programa denominado "Foresight data" para analizar las mediciones de vibraciones de distintos equipos instalados en buques. Los conocimientos que ha desarrollado esta empresa respecto a vibraciones en el sector aeronáutico, les ha permitido adentrarse en el sector marino y por ello han presentado este nuevo software.

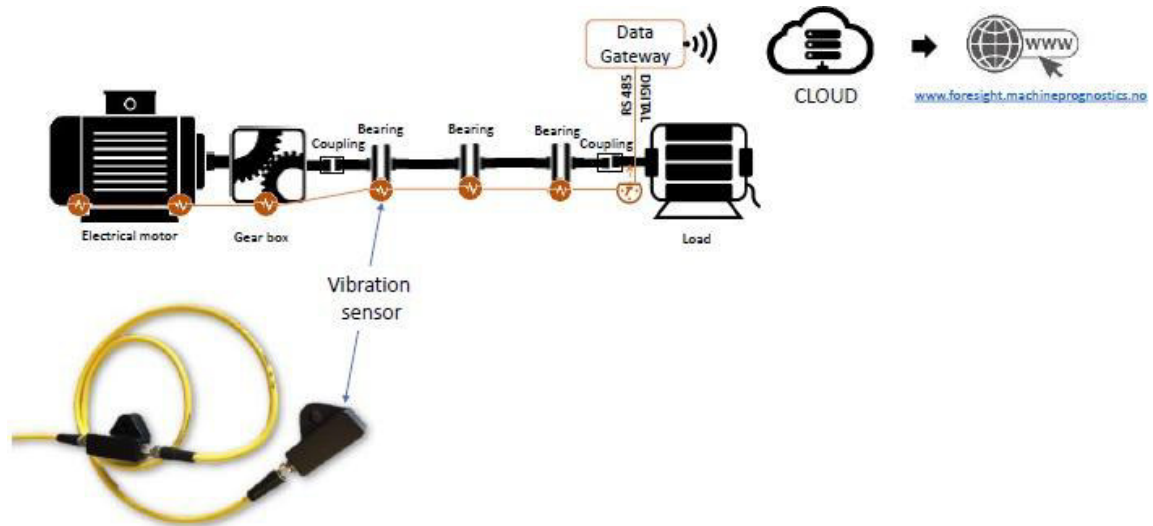
➤ Análisis de vibraciones de la grúa MacGregor en el buque Viking Neptune

Una de las aplicaciones del programa "Foresight data" es la medición de las vibraciones a través de sensores instalados en el cuerpo de los motores eléctricos de las bombas que accionan los brazos hidráulicos de la grúa. Los sensores no solamente se instalan en el motor eléctrico, el cable puede llevar hasta 100 sensores repartidos por los cojinetes y acoples que van hasta el brazo de la grúa, en la caja de cambios...

Estos sensores son en sí una jaula de Faraday que evita interferencias electromagnéticas externas para que las mediciones sean precisas.

Ilustración 14: Esquema de una instalación de sensores para la medición de vibraciones

Fuente: <https://www.machineprognostics.no/>



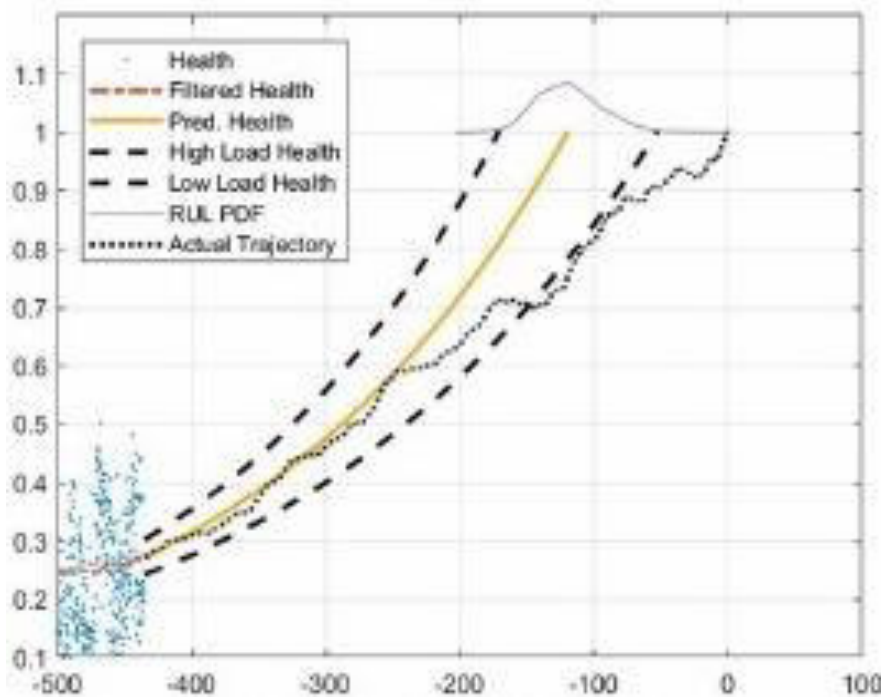
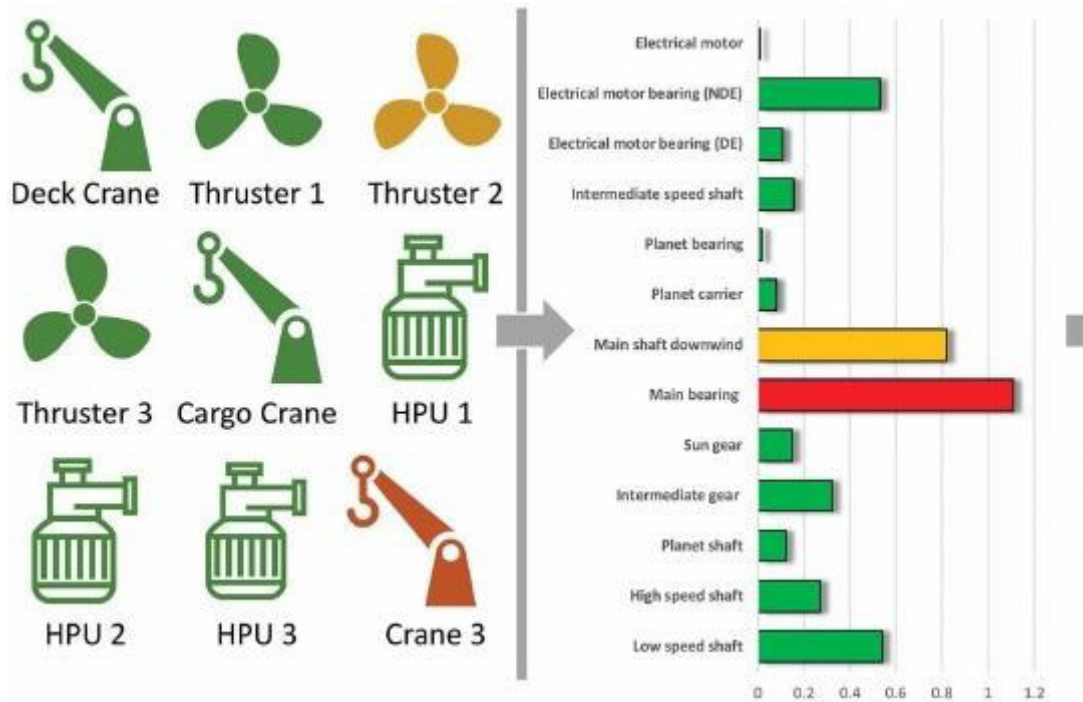
Como se observa en la imagen, los datos recogidos por los sensores que se encuentran ubicados en distintas partes de la máquina se envían a la nube donde se almacenan, para que el operario encargado del mantenimiento dentro del buque pueda visualizar el estado de salud de la grúa a través de la página web de la empresa.

Las señales de vibración recogidas por los sensores se transforman en algoritmos introducidos en el programa por un experto del fabricante de la grúa. Estos algoritmos generan los límites que permiten al operario saber si la grúa necesita mantenimiento o no. Los fallos que puede detectar van desde desequilibrios de los ejes hasta engranajes con fisuras.

Cuando algún componente se encuentra fuera de los valores de trabajo normales, el programa envía un mensaje de texto o un correo electrónico al operario para que revise las gráficas de salud en la página web de la empresa. Las alertas y avisos de mantenimiento las establece directamente el sistema con los datos introducidos por el fabricante de la grúa.

Ilustración 15: Interfaz de "Foresight data"

Fuente: <https://www.machineprognostics.no/>



La ilustración 15 muestra un ejemplo de la interfaz de usuario cuando el operario entra en la página web de "Foresight data". En ella se puede observar un diagrama de todos los equipos que se encuentran monitorizados, con un código de color tipo semáforo que proporciona en primera instancia y de manera intuitiva cómo se encuentra alguno de esos equipos. En segundo lugar, aparece un gráfico de barras de los distintos componentes de uno de los equipos de la primera imagen, pero ahora se organiza con los nombres de los componentes monitorizados como pueden ser motores eléctricos, cojinetes principales... En dicho gráfico también se distingue la salud de cada pieza por un código de colores, pero en la parte inferior de la gráfica aparece una recta con números que indica el índice de salud de dicha pieza con más exactitud. Un valor entre 0 y 0,8 indica que el componente está en buen estado, entre 0,8 y 1, se deben planear acciones de mantenimiento y un valor por encima de 1 indica que la pieza necesita mantenimiento inmediato.

La tercera imagen proporciona una visión detallada de cómo es el comportamiento del componente que está fallando con una gráfica que muestra las horas de funcionamiento de esa pieza frente al índice de salud antes mencionado. En ella, se puede distinguir la línea amarilla que predice cuál debería ser el comportamiento idóneo de esa pieza, las líneas discontinuas negras indican los límites en los que podría trabajar esa pieza y los puntos negros discontinuos indican el camino actual que está llevando esa pieza. En este ejemplo mostrado, se puede afirmar que el componente está fallando y por tanto la grúa podría quedarse inoperativa.

Ilustración 16: Fallos identificados por el programa

Fuente: <https://www.machineprognostics.no/>



Como se ve en la ilustración 16, "Foresight data" ha demostrado ser eficaz mostrando fallos como fisuras en ejes o desgaste prematuro entre otros. (Meyer, 2018), (Introducing health & usage monitoring systems to the shipping industry)

4.3 Empresa "STS Defence"

Otro ejemplo de pruebas predictivas realizadas en el sector marítimo es el de la empresa británica STS Defence, dedicada a la creación de sistemas inteligentes para el control de equipos. La tecnología que desarrolla se emplea en la armada británica y en tierra, en la seguridad nacional del país.

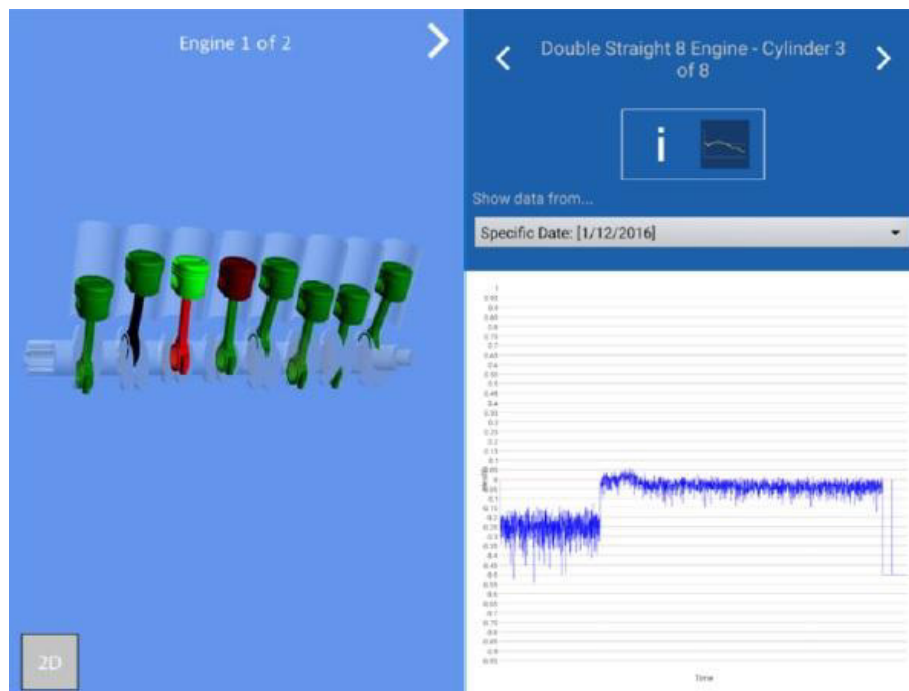
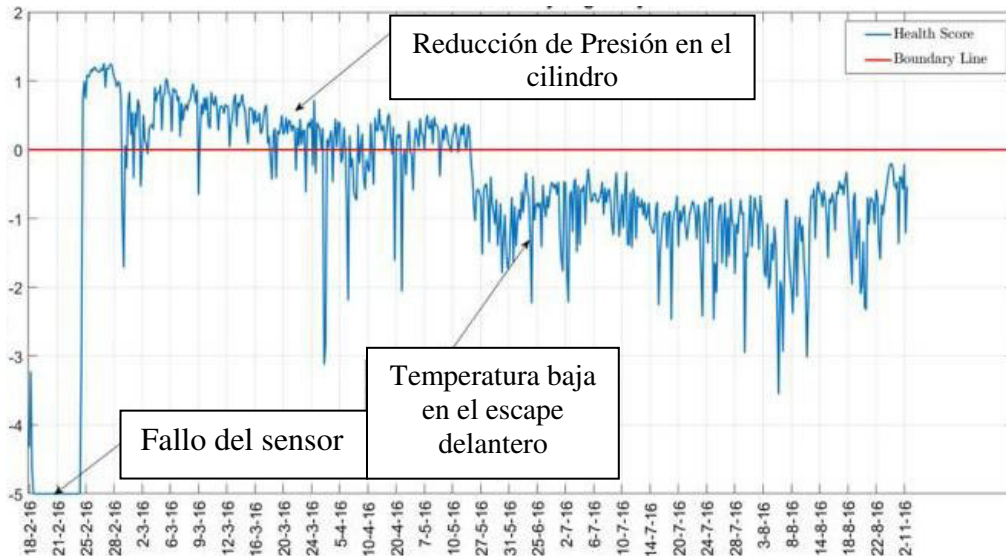
STS Defence en colaboración con la universidad de Portsmouth y Southampton y las empresas Satellite Applications Catapult, NGnuit Ltd y LW Partners Ltd comenzó un proyecto en 2016 denominado "IConIC" con el que quería introducirse a la marina civil en el campo del mantenimiento predictivo.

El programa centra su estudio en los motores marinos con el fin de aumentar la eficiencia de toda la planta propulsora, la reducción del consumo de combustible y en consecuencia, una reducción de los costes de mantenimiento.

El estudio comienza con la colocación de sensores que se adhieren magnéticamente en distintas partes del motor y miden distintos parámetros como temperatura, vibraciones, ultrasonidos etc. Estos datos se procesan en un módulo instalado en el buque a través de algoritmos, se envía a un servidor instalado en tierra que los almacena y compara las tendencias con los datos dados por el resto de buques de la flota (siempre que el motor de un buque u otro sea el mismo). Una vez analizados dichos datos comparándolos con los datos de fábrica introducidos en el sistema, el programa diseña las gráficas de salud y las devuelve al buque para que el oficial pueda realizar el diagnóstico adecuado y programar un calendario de mantenimiento para ese motor. Cabe destacar también que las gráficas de salud se realizan para cada cilindro del motor, por lo tanto se tendrán tantas gráficas como cilindros tenga el motor.

Ilustración 17: Ejemplo del software IConIC visualizado en un smartphone

Fuente: <https://www.sts-defence.com/>



Como se observa en la ilustración 17, la imagen superior muestra un ejemplo de una gráfica de salud de un cilindro dónde se puede distinguir una línea roja que delimita la diferencia entre un cilindro "sano" y otro que no se encuentra en un buen estado. El eje de coordenadas sitúa unos valores denominados "puntos de salud" que van desde -5 hasta 2 y dicha línea roja está en el valor 0. El eje de abscisas sitúa diferentes fechas, desde el 18/02/16 hasta el 02/11/16. A mitad de

gráfica que corresponde al 24/05/16 aproximadamente en adelante, se puede ver que todos los valores se encuentran por debajo de la línea roja. Esto no indica que el cilindro no esté operando, significa que la "salud" de dicho cilindro no es la óptima y se debe revisar. La imagen inferior muestra un esquema visual muy intuitivo de todos los cilindros con la diferencia de colores en los puntos donde puede haber un problema y la gráfica de salud de uno de los cilindros del motor. Estas imágenes corresponden a las gráficas que se han enviado desde tierra al oficial del buque y que se están visualizando a través de un smartphone.

Cómo se ha comentado en el párrafo anterior, el oficial del buque visualiza las gráficas de salud o los mapas de color del motor a través de smartphones o tablets que le permite más libertad de movimiento dentro del propio buque sin la necesidad de estar en la sala de control del motor.

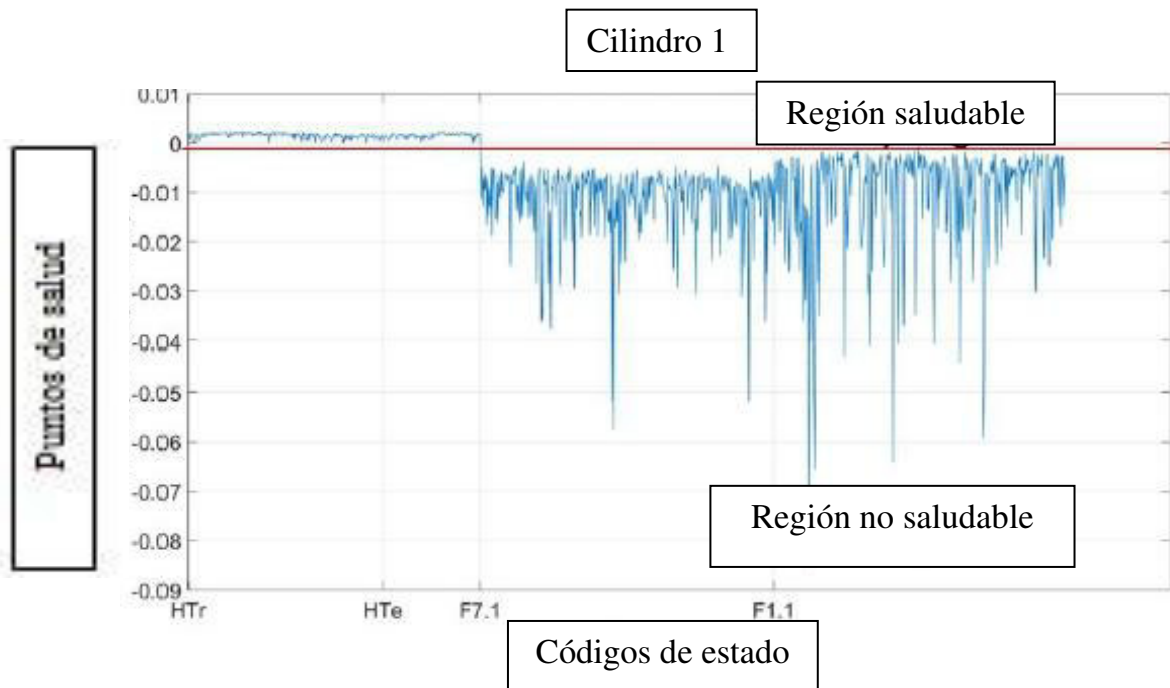
El programa ha sido probado desde motores de botes salvavidas hasta un motor de buque tanque con buenos resultados que se muestran a continuación.

➤ **Motor V10 de bote salvavidas**

Ilustración 18: Ejemplo de prueba en motor de bote salvavidas

Fuente: <https://www.sts-defence.com/>





La ilustración 18, muestra el cilindro 1 del motor que se está estudiando, en este caso un motor con disposición en V y 10 cilindros de un bote salvavidas. Por otro lado la gráfica de salud indica los momentos en los que el cilindro se encuentra en la región saludable y en los momentos en los que está en la región no saludable. Los fallos que se pudieron observar fueron: soportes de motor sueltos y obstrucción en el filtro del aire con el consecuente fallo de falta de combustible en el cilindro número 2.

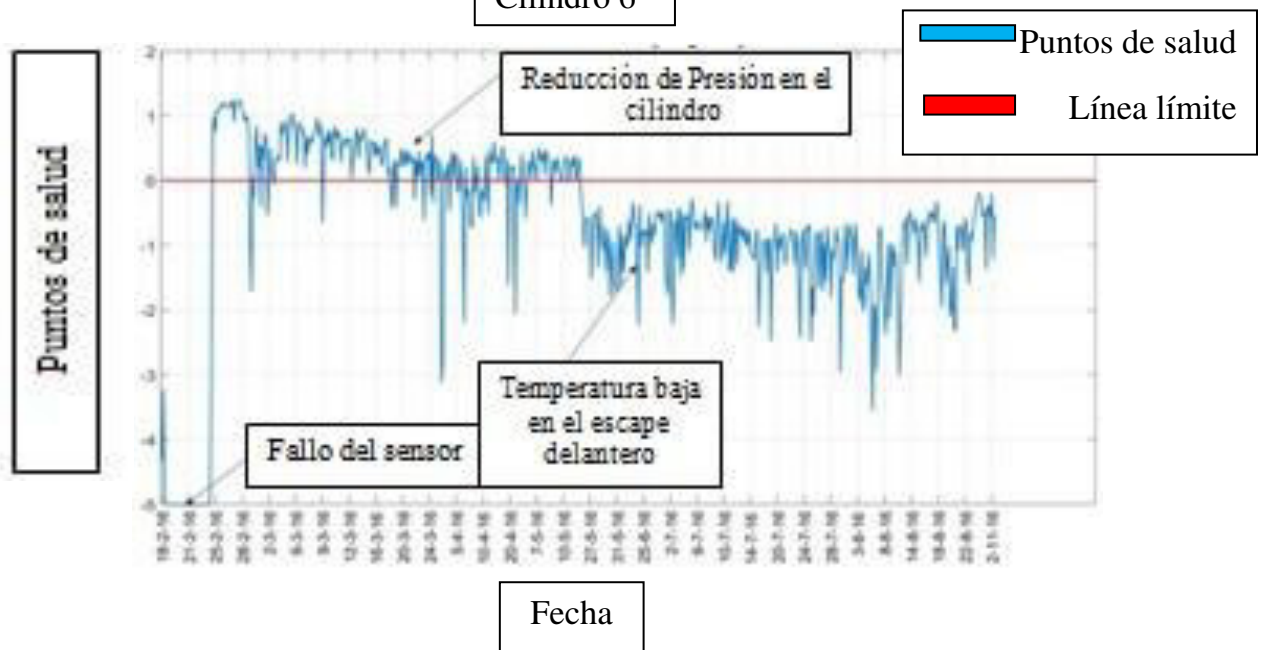
➤ **Motor Wärtsilä 8FHD240 a bordo de un ferry**

Ilustración 19: Ejemplo de prueba en motor de ferry

Fuente: <https://www.sts-defence.com/>



Cilindro 6

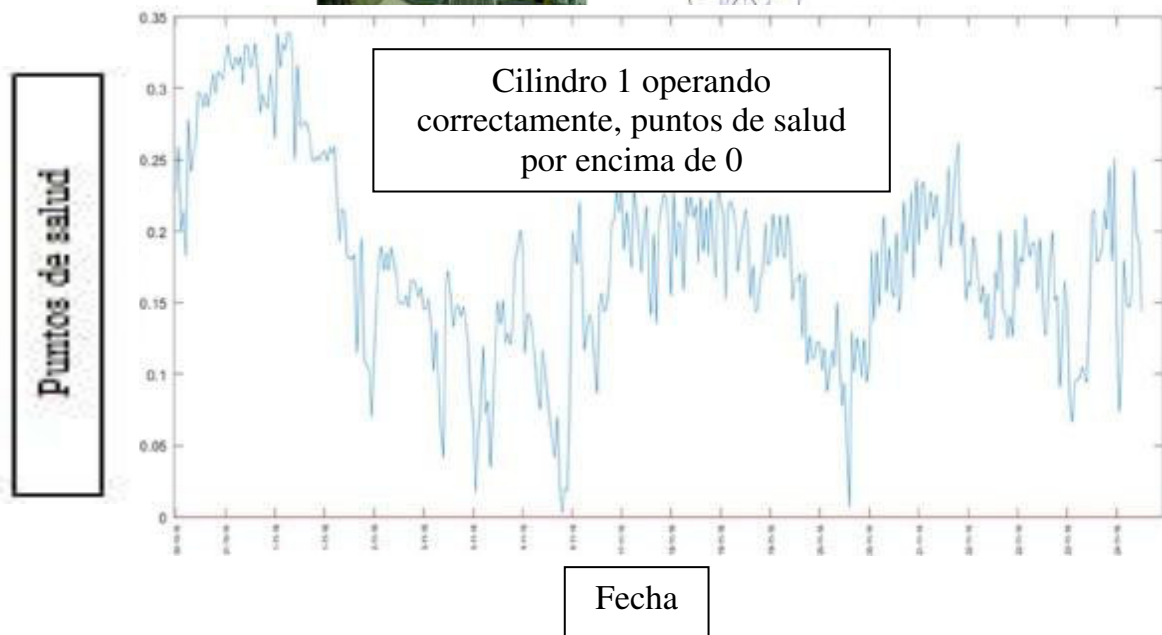
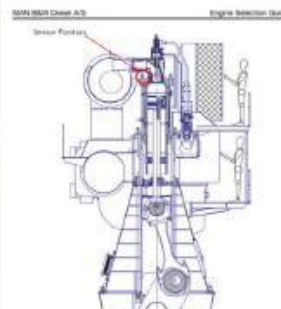


La ilustración 19 corresponde a las pruebas realizadas en el cilindro 6 de un motor de 8 cilindros y 4 tiempos Wärtsilä 8FHD240 de 1,2 megavatios diesel de un ferry con propulsión Voith-Schneider. Como se observa en la gráfica de salud, las mediciones se toman en un amplio rango de fechas visualizando una reducción de presión en el cilindro o una reducción de la temperatura de escape. Incluso la gráfica marca el fallo de algún sensor. Los fallos detectados en este motor fueron: daño en la junta tórica de la culata y ligero descenso en la temperatura de escape. No obstante, el cilindro se encuentra en muy buen estado en relación a los continuos desplazamientos de este tipo de buques.

➤ **Motor Doosan-Man B&W 6S50MC-C Mk7**

Ilustración 20: Ejemplo de prueba en motor de buque tanque

Fuente: <https://www.sts-defence.com/>



La ilustración 20 corresponde a las pruebas realizadas en el cilindro 1 de un motor de 6 cilindros y 2 tiempos Doosan-Man B&W 6S50MC-C Mk7 de 9,8 megavatios de un buque tanque. Como se puede ver en la gráfica de salud, el cilindro 1 se encuentra constantemente en la región saludable después de un mes de pruebas en travesías entre China e Indonesia sin mostrar ningún daño.

Esta última prueba a gran escala en el buque tanque, ha confirmado los buenos resultados cosechados en las pruebas realizadas desde motores mucho más pequeños hasta este motor, por lo que también este sistema demuestra las posibilidades que ofrece la tecnología predictiva al sector. (Garrity, 2018)

V. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo, se ha profundizado en el campo del mantenimiento predictivo industrial aplicado al sector marítimo y gracias a ello se puede recalcar la importancia de poner en marcha estrategias de mantenimiento predictivo en los buques por los múltiples beneficios que aporta.

La aplicación de las técnicas predictivas en el ciclo de mantenimiento de un buque permite a la empresa armadora una mayor disponibilidad de toda la flota, un entorno operativo más eficaz o una reducción en los costes de mantenimiento a largo plazo. No obstante, en la actualidad no existe una tecnología fiable al 100% que indique el estado de salud de un conjunto de equipos o de un solo equipo, y queda claro que la vigilancia continua en todos los sistemas que conforman un buque no sería viable para nadie.

La solución a estas desventajas radica en monitorizar los componentes críticos que permiten el buen funcionamiento de toda la operativa del buque y superar una serie de retos tecnológicos como:

- Conseguir el control y monitorización de manera continua durante el funcionamiento del buque.
- Mejorar la capacidad de predecir la vida útil restante de un equipo.
- Creación de sistemas inteligentes con capacidad de aprendizaje para que los sistemas predictivos identifiquen los fallos con mayor precisión.

Una vez solventados estos retos, el paso decisivo lo debe dar las empresas navieras. Si no existe compromiso por parte de ellas, el mantenimiento predictivo se queda en una simple propuesta. Queda claro que la inversión inicial es elevada entre otras desventajas que se han mostrado, pero la única manera de competir con la mano de obra barata es seguir este tipo de métodos.

The industrial predictive maintenance applied to maritime sector is presented in this work. Moreover, the importance to start up predictive maintenance strategies on ships due to its multiple benefits is also exposed.

The application of predictive techniques in the maintenance cycle of a ship allows to shipping company a greater availability of all their fleet, more effective operating environment or a reduction of the maintenance costs in a long-term. However, nowadays it does not exist a reliable technology able to indicate the health condition of a set of equipment or of only one equipment, and obviously the continuous monitoring of all systems aboard, is very complicated.

The solution of these disadvantages lies in monitor critical components that allows a good performance of all operative of the ships and overcome a series of technological challenges as:

- To get the control and monitoring continuously during the operation of the ship.
- To improve the capacity of predict the remaining useful life of an equipment.
- Creation of intelligent systems with learning ability for predictive systems identify failures with more accuracy.

Once these challenges have been solved, the decisive step must be given by the shipping companies. If it does not exist engagement by them, the predictive maintenance stays in a simple proposal. It is clear that the initial investment is high, but the only way to compete with cheap labor is following this kind of method.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Caro, R. V. (24 de Febrero de 2017). *Exponav Fundación*. Obtenido de <https://www.exponav.org>

Cassola, C. P. (2012). *Análisis y mejora del plan de mantenimiento del buque CON/RO OPDR Andalucía*. Barcelona.

Defensa, M. d. (Noviembre de 2016). *Subdirección General de Publicaciones y Patrimonio Cultural, Ministerio de Defensa*. Obtenido de <http://publicaciones.defensa.gob.es/>

Delgado, C. V. (11 de Julio de 2017). *Ditecsa, Industry and Environmental Solutions*. Obtenido de <http://www.grupoditecsa.com>

Española, U. N. (11 de Julio de 2018). *UNE Normalización Española*. Obtenido de <https://www.une.org>

Garrity, D. (27 de Junio de 2018). *STS Defence*. Obtenido de <https://www.sts-defence.com/>

Márquez, J. Á. (2017). Teoría del mantenimiento predictivo. En J. Á. Márquez, *Mantenimiento: técnicas y aplicaciones industriales* (pág. 290). Grupo Editorial Patria.

Meyer, T. J. (2018). *Introducing health & usage monitoring systems to the shipping industry*. Grimstad, Aust-Agder, Noruega.

Meyer, T. J. (2018). *Machine Prognostics*. Obtenido de www.machineprognostics.no

Robles, F. B. (2008). *Preditec Grupo Álava*. Obtenido de <http://www.preditec.com>

Robles, F. B. (28 de Julio de 2016). *Profesionales hoy, Rotación*. Obtenido de <https://profesionaleshoy.es>

S., A. C. (2014). *Monografías.com*. Obtenido de <https://www.monografias.com>

Sexto, L. F. (22 de Agosto de 2017). *Planet RAMS*. Obtenido de <http://planetrams.iusiani.ulpgc.es>

Soutullo, R. G. (Abril de 2015). *Ingeniero Marino*. Obtenido de <https://ingenieromarino.com>

Valbor Soluciones. (s.f.). Obtenido de <https://www.valborsoluciones.com>

