

GRADO EN MARINA
TRABAJO FIN DE GRADO

***MEJORA DEL MANTENIMIENTO
MEDIANTE EL USO DE GRAFICOS
MULTIVARIABLES***

Alumno: Godino López, Rubén

Director: Boullosa Falces, David

Curso: 2017/2018

Fecha: <lunes, 18, Junio, 2018>

RESUMEN

En el presente trabajo se ha tratado de mejorar y facilitar el mantenimiento predictivo del buque gasero Sestao Knutsen. Para ello se han implementado gráficos de control multivariante, siguiendo la técnica de T^2 de Hotelling, la cual nos permitía correlacionar y monitorizar todas las variables de un proceso en un mismo gráfico.

Se tomaron muestras diarias de 2 viajes del proceso de turbina-caldera definido por 6 variables, para la posterior comparación mediante la técnica de control multivariante, ayudándonos del software QualStat. Esto dio como resultado un gráfico de control en el que se observó la desviación del proceso correspondiente al 2º viaje, respecto a las condiciones ideales del proceso establecidas por el 1º viaje.

De los resultados obtenidos se sacó la conclusión de que la técnica empleada para la monitorización y análisis del proceso estudiado de la sala de maquinas, resultó de gran ayuda para la detección de desviaciones con la simple visualización de un gráfico, lo que facilitaba la predicción y prevención de fallos y averías.

Palabras clave: mantenimiento, mantenimiento predictivo, gráficos de control multivariantes, T^2 de Hotelling.

The scope of this job is to improve and facilitate the predictive maintenance of the Sestao Knutsen LNG ship. In order to accomplish this objective, multivariate control charts have been implemented, following the Hotelling T² technique, which allows to monitorate and correlate each variable of a process in just one chart.

Daily samples were taken of 2 trips of the boiler-turbine process definite by six variables, for the later comparison using the multivariate control technique, using the QualStat software. This resulted in a control chart in which was observed the deviation of the second trip process in comparison with the ideal process established by the first trip.

From the obtained results, it was concluded that the used technique for the monitoring and the analysis of the studied process of the engine room, was of great help for the detection of deviations with the simple visualization of a chart, which facilitated the prediction and prevention of possible failures and breakdowns.

Keywords: maintenance, predictive maintenance, multivariate control charts, Hotelling T².

Lan honen bidez Sestao Knutsen izeneko gas-ontziaren aurrean mantenua errazten eta hobetzen saiatu da. Horretarako kontrol bariante anitzak dituzten grafikoak erabili dira "Hotelling T^2 " teknika jarraituz; izan ere teknika horrek prozesu baten aldagai guztiak grafiko bakar batean erlazionatzea eta monitorizatzea ahalbideratzen du.

Egunero, sei aldagaiengatik definitutako lurrin-turbinaren prozesuaren bi bidaien laginak hartu ziren; zeintzuk QualStat software-ren laguntzaz, kontrol bariante anitzaren teknikaren bidez alderatu ziren. Emaitza gisa, kontroleko grafiko bat lortu zen zeinetan bigarren bidaiari zegokion prozesuaren desbiderapena behatu zen; lehenengo bidaian ezarritako prozesuaren baldintza idealekin aldarrikatuz.

Lortutako emaitzei erreparatuz, makina-gelan ikertutako prozesuaren monitorizaziorako eta analisirako erabilitako teknika, desbiderapenak hautemateko lagungarria dela ondorioztatu zen. Izan ere desbiderapenak begi bistaz grafikoan antzemateak, sortu ahal diren akatsak aurreikustea eta saihestea errazten baitu.

Hitz gakoak: mantenua, aurrean mantenua, kontrol bariante anitz grafikoak, Hotelling T^2

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Mantenimiento	7
2.1.1. Historia del mantenimiento	7
2.1.2. Definición de mantenimiento	9
2.1.3. Objetivos del mantenimiento	10
2.1.4. Ciclo de vida de un equipo.	11
2.1.5. Tipos de mantenimiento	13
2.1.5.1. Mantenimiento Correctivo.....	14
2.1.5.2. Mantenimiento Preventivo	15
2.1.5.3. Mantenimiento según condición o estado	17
2.1.6. Mantenimiento de la sala de maquinas.	19
2.1.6.1. Tipos de mantenimientos	19
2.1.6.1.1.Mantenimiento modificado.....	19
2.1.6.1.2.Mantenimiento planificado	20
2.1.6.2. Niveles de mantenimiento	22
2.1.6.3. Procesos de mantenimiento	24
2.1.6.4. Planificación del trabajo de mantenimiento	25
2.1.6.5. Asignación de tareas	26
2.1.6.6. Implementación de técnicas para la mejora del mantenimiento	27
2.1.6.6.1.Sistema de información para la gestión del mantenimiento. Sistema GMAO	28
2.1.6.6.1.1. Objetivos del sistema GMAO	28
2.1.6.6.1.2. Funciones básicas del sistema	29
2.1.6.6.2.Mantenimiento total de producción (TPM)	30

2.1.6.6.2.1. Elementos que constituyen el sistema de gestión TPM.....	31
2.2. Gráficos de control.....	35
2.2.1. Gráficos univariantes	35
2.2.2. Gráficos multivariantes	36
2.2.2.1. Gráfico T^2 de Hotelling	36
3. OBJETIVOS.....	43
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA	47
4.1. Descripción del buque Sestao Knutsen	47
4.1.1. Características particulares	48
4.1.1.1. Sistema propulsor	49
4.1.1.2. Sistema generador	50
4.1.1.2.1. Turbogeneradores	50
4.1.1.2.2. Motor diesel-generador.....	51
4.1.1.2.3. Motor diesel-generador de emergencia	51
4.1.1.3. Planta energética	52
4.1.1.4. Ciclo Rankine	54
4.2. Obtención de datos.....	55
4.3. Cálculos	61
4.3.1. Fase I.....	61
4.3.2. Fase II.....	63
5. RESULTADOS	67
6. DISCUSIÓN	71
7. CONCLUSIONES	75
8. BIBLIOGRAFÍA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de vida de un equipo como fuente de flujos de información para el mantenimiento.....	11
Figura 2: Hiperelipsoide	37
Figura 3: Buque Sestao Knutsen.....	47
Figura 4: Turbina de alta y baja presión, turbina de ciar y reductora.....	49
Figura 5: Turbogenerador de estribor. Fuente: propia.....	50
Figura 6: Motor diesel-generador. Fuente: propia	51
Figura 8: Diagrama de flujo del proceso caldera-turbina.....	57
Figura 9: Gráfico del cálculo del HDS	62
Figura 10: Gráfico del HDS	63
Figura 11: Gráfico de control.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características particulares.....	48
Tabla 2: Características de la caldera.....	52
Tabla 3: Correlaciones de Pearson.....	59
Tabla 4: Condiciones de los viajes.....	60

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de una sala de maquinas de un buque mercante es un tema complejo para ser analizado y estudiado, debido al gran numero de variables que entran en juego.

En la actualidad, la gran mayoría de buques, trabajan con sistemas informáticos de monitorización para mejorar y facilitar el mantenimiento y la detección de fallos en la maquina, como es el caso del buque gasero Sestao Knutsen.

Estos sistemas trabajan simplificando los diferentes procesos que competen al funcionamiento de la maquina, utilizando los gráficos de control univariante para asegurar que cualquier deriva de las variables es detectada cuanto antes para evitar efectos negativos en el rendimiento de la planta.

Estos sistemas analíticos tienen la desventaja de analizar las variables de forma independiente y sin ningún tipo de correlación entre ellas, lo que da como resultado un gran número de gráficos de control que generan una mayor dificultad en la detección de cambios en las variables y una mayor dificultad en la detección de fallos, es decir, dificulta la realización de un mantenimiento predictivo óptimo.

En este estudio se tratara de mejorar el mantenimiento de la sala de maquinas del buque Sestao knutsen mediante el uso de gráficos de control multivariante, ya que cuando las variables de un proceso están mutuamente correlacionadas, algunas veces, los gráficos de control univariante no son tan sensibles como los métodos multivariantes que aprovechan la correlación entre las variables y permiten monitorizar varios parámetros juntos en un único grafico.

En dicho tipo de mantenimiento, los datos de proceso se controlan y las causas especiales de variación son identificadas, con el fin de establecer el control y obtener una muestra de referencia "ideal", para usar como base en la determinación de los límites de control para el análisis de futuras observaciones.

Un método ampliamente validado de gráficos de control multivariante se basa en el estadístico T^2 de Hottelling.

2. ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Mantenimiento

La función del mantenimiento ha sido históricamente considerada como un costo necesario en las empresas e instituciones. Sin embargo, con el paso del tiempo, las nuevas tecnologías y prácticas innovadoras de la actualidad, han colocado a la función del mantenimiento como una parte integral de la productividad y operatividad total en muchas de estas empresas e instituciones.

2.1.1. Historia del mantenimiento

La palabra mantenimiento siempre se ha empleado para designar las técnicas utilizadas para asegurar el correcto y continuo funcionamiento de equipos, maquinaria, instalaciones y servicios. Con esta descripción, se puede entender la evolución del área de mantenimiento al atravesar las distintas épocas, acorde con las necesidades de sus usuarios.

La historia del mantenimiento, como parte estructural de las empresas, data desde el momento en el que aparecieron las máquinas para la producción de bienes y servicios [1].

De hecho, desde el momento que el hombre primitivo inició una actividad artesana como la de tallar sus primitivas armas de sílex, preparar refugios, construcción de canoas, etc., aparece ya la inevitable tarea de mantenimiento: afilar herramientas y armas, cuidar la estanqueidad de las canoas, etc. [2].

Durante la revolución industrial el mantenimiento era correctivo, donde todas las soluciones a fallos o paradas imprevistas se solucionaban de urgencia, es decir, cuando la avería estaba a punto de producirse o ya había tenido lugar,

esto provoco la aparición de talleres mecánicos, que aportaron un cierto grado de especialización en las reparaciones.

Intervenían a petición de los operadores o propietarios de las maquinas, responsables de la producción de las mismas pero sin establecer una intención preventiva en sus actuaciones.

Con el tiempo estos talleres comenzaron a formar parte de las empresas como un departamento más de la misma.

Pero no es hasta a partir del año 1925 en la industria Americana cuando se reconoce la aparición de los primeros sistemas organizacionales de mantenimiento con una base científica [3].

A raíz de esto, se comienza a pensar en la conveniencia de reparar antes de que se produzca la rotura o el desgaste, con el fin de evitar interrupciones en el proceso productivo. Se planifican las reparaciones, previéndolas para un tiempo fijado de antemano, lo que da lugar al concepto de mantenimiento preventivo.

A partir de los años 60 con el desarrollo de las industrias electrónica, espacial y aeronáuticas, que requerían instrumentos y técnicas más sofisticadas, comienza a aparecer el mantenimiento preventivo, por lo que el mantenimiento ya no solo depende del tiempo de funcionamiento de un equipo, sino de su estado o condición efectiva.

Actualmente el mantenimiento se encuentra en lo que se podría denominar como la tercera generación, es decir, se dispone de equipos electrónicos de inspección y control de equipos, que son muy fiables, para conocer el estado real del equipo mediante la monitorización y medición de determinados parámetros de forma periódica o continua, como podrían ser temperaturas, ruidos, vibraciones, análisis físicos, etc.

Y sistemas informáticos aplicados al mantenimiento que permiten la acumulación de datos técnicos y el tratamiento de estos [2].

El progreso de este desarrollo concluye en la utilización de sistemas expertos y a la inteligencia artificial, que proporciona un gran campo de actuación en el

diagnostico de averías y en facilitar las actuaciones del mantenimiento en condiciones difíciles.

Hoy en día, el enfoque moderno del mantenimiento industrial no solo está destinado a evitar los fallos y averías, sino que también significa un aporte dentro de las empresas para el desarrollo de programas de eliminación de paradas, reducción del consumo de recursos, aumento de la fiabilidad de los equipos, y en general, el mejoramiento de la productividad de la planta [4].

2.1.2. Definición de mantenimiento

Existen numerosas definiciones del mantenimiento, pero según lo acordado en el congreso internacional de la O.C.D.E (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico) celebrado en el año 1.963, el mantenimiento se puede definir como el control constante de las instalaciones así como al conjunto de trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de las instalaciones productivas, servicios e instrumentación de los establecimientos.

Según AFNOR (Asociación Francesa de Normalización) “conjunto de acciones que permiten mantener o restablecer un bien en un estado específico o en la medida de asegurar un servicio determinado”

Según (UNE-EN 13306-2011) se define el mantenimiento “una combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida”.

En resumen: “es el conjunto de trabajos necesarios para asegurar el buen funcionamiento de las instalaciones para la cual fueron diseñadas.”

2.1.3. Objetivos del mantenimiento

Como se ha indicado en las definiciones del mantenimiento, uno de los objetivos principales del mantenimiento es lograr que la vida útil de un equipo o sistema sea lo más prolongado posible.

Pero por otra parte un objetivo importante sería el de procurar que durante esta vida útil los costes de mantenimiento fuesen mínimos, realizando una buena aplicación de las técnicas y métodos de mantenimiento en cada caso, para garantizar a un coste razonable, el continuo y óptimo funcionamiento de equipos e instalaciones. También ha de hacer posible que este continuo y óptimo funcionamiento de los equipos se realice en condiciones de máxima seguridad para las personas, equipos o instalaciones, capital invertido y medio ambiente [2].

El objetivo final del mantenimiento industrial se puede sintetizar en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, los fallos sobre los bienes.
- Disminuir la gravedad de los fallos que no se lleguen a evitar.
- Evitar detenciones inútiles o paradas de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Reducir costes.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

En resumen, un mantenimiento adecuado, tiende a prolongar la vida útil de los bienes, a obtener un rendimiento aceptable de los mismos durante más tiempo y a reducir el número de fallos [5].

2.1.4. Ciclo de vida de un equipo.

Como se menciona anteriormente la vida útil del ciclo de vida de un equipo es importante que sea lo más larga posible, y para ello se estudia el propio ciclo de vida de los equipos como origen de la información para ser aplicada al mantenimiento.

La información utilizada en el mantenimiento de una instalación o equipo, procede de las distintas fases y etapas de la vida de dicha instalación o equipo, es decir, desde la concepción de la primera idea hasta su puesta fuera de servicio definitiva que finaliza en su desmontaje [6].

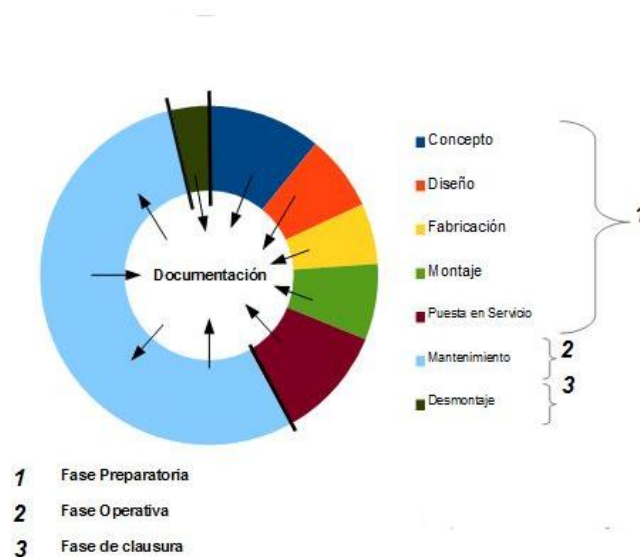


Figura 1: Ciclo de vida de un equipo como fuente de flujos de información para el mantenimiento. Fuente: [7]

En la figura 1 se recoge el ciclo de vida de una instalación o equipo genérico. Como se observa en la figura, este ciclo de vida se puede dividir en tres principales fases.

- Fase preparatoria

Esta fase en la vida de un equipo o instalación se extiende desde el mismo momento en que surge la idea originaria de la misma hasta su puesta en servicio, dispuesta para ser empleada en el fin para el cual fue concebida.

En esta fase se encuentra las siguientes etapas:

- Concepción.
- Diseño.
- Construcción.
- Montaje.
- Puesta a punto.

Estos conceptos se refieren a una instalación, maquinaria o equipo genérico.

En el caso de la instalación de un buque, la información procedente de esta fase es la más importante para las actividades de la explotación del buque, incluido su mantenimiento. Ya que la inmensa cantidad de instalaciones, equipos y elementos que lo constituyen deben ser ensamblados, la falta de una información completa de las características de montaje y funcionamiento de cada uno de los equipos o sistemas podría provocar una secuencia de errores y retrasos que a su vez provocarían un aumento de costes y una gran dificultad en las labores de mantenimiento y conservación de los equipos o sistemas.

Por lo tanto, en el caso de un buque la información de las características de los elementos individuales y la de sus especificaciones de su diseño constructivo, cobran una gran importancia en la fase operativa donde se realiza el uso de la planta [6].

- Fase operativa

Esta fase es la parte de la vida de un equipo o sistema en el que es empleado para el fin que fue diseñado y fabricado. Es la fase “productiva” del equipo o sistema y comienza desde la puesta a punto hasta su puesta fuera de servicio definitiva.

Es en esta fase en la que tienen lugar los trabajos de mantenimiento de todo tipo, desde mantenimientos diarios, como engrases, limpiezas, ajustes, etc., hasta las grandes intervenciones, como paradas y desmontajes programados para realizar un mantenimiento preventivo, inspecciones periódicas y monitorización para la realización de un mantenimiento predictivo, etc.

De esta fase procede gran parte de la información utilizada para la organización y mejora de un plan de mantenimiento [6].

- Fase de clausura definitiva (desmontaje)

Una vez que se decide la puesta fuera de servicio de un equipo o instalación, comienza la fase de clausura definitiva, donde el equipo o instalación es desmantelado para su venta en el mercado de segunda mano o como chatarra o para el reaprovechamiento de piezas o elementos reutilizables del equipo o instalación.

La información adquirida de esta fase no origina más que unos apuntes contables y algún registro en la base de datos [6].

2.1.5. Tipos de mantenimiento

Actualmente existen diferentes tipos de mantenimiento de equipos o sistemas en operación. Algunos de estos mantenimientos no se limitan al objetivo de corregir fallos, sino que tratan de prevenir la aparición de los mismos desde la misma etapa inicial de diseño.

Entre estos tipos destacan:

- Mantenimiento Correctivo.
- Mantenimiento Preventivo Programado.
- Mantenimiento según estado o condición.

2.1.5.1. Mantenimiento Correctivo

Como se ha mencionado en el apartado 1.1. este tipo de mantenimiento, también llamado de “urgencia” se puede considerar el origen del mantenimiento.

La filosofía del Mantenimiento Correctivo es la de reparar la maquina cuando la avería ya se ha producido, restaurando en la misma las condiciones normales de funcionamiento. Se considera un mantenimiento no planificado [8].

Si las averías son generadas por desgaste o envejecimiento, este tipo de mantenimiento puede ser el más económico, ya que alarga los periodos de revisión de las maquinas, pero no resulta un mantenimiento rentable, para fallos ocasionados por roturas en equipos que perjudica su parada.

El mantenimiento correctivo podemos dividirlo en dos grupos según el objeto de las acciones que se llevan a cabo ante un fallo:

- Mantenimiento correctivo Paliativo: se trata de la reparación de una avería para salir del paso, es decir, tomar medidas de contención que permitan seguir funcionando al equipo aunque no se consiga el 100% de su rendimiento hasta un momento más propicio para su completa reparación. Este tipo de mantenimiento correctivo es denominado “Reparación de Fortuna” y es el mantenimiento correctivo mas utilizado en los buques después de una avería hasta llegar a puerto o astillero donde poder completar la reparación del fallo.
- Mantenimiento Correctivo Curativo: Todas las acciones de reparación del equipo se realizan con el objetivo de restablecer el buen funcionamiento del equipo con todas sus prestaciones.

En la actualidad la técnica de mantenimiento correctivo no es apenas utilizado excepto en ciertos tipos de industrias donde [9]:

- Los equipos empleados están duplicados y no son muy caros.
- La parada de una maquina no suponga un fallo o retraso de producción o servicio.
- La obtención de respetos sea de gran facilidad.

Las ventajas que se pueden obtener de este tipo de mantenimiento son las siguientes [9]:

- Aprovechamiento máximo de la pieza rota.
- Empleo de poco personal para llevar a cabo el mantenimiento.

Desventajas del mantenimiento correctivo:

- La falta de control del funcionamiento del equipo supone que el origen del fallo o avería es imprevisible, se puede producir en cualquier momento.
- El fallo de un equipo o pieza de un equipo puede generar el fallo en cadena de otro equipo generando una elevada carga de trabajo.
- La carga de trabajo generada por fallos en cadena supone la necesidad de realizar horas extra por parte del personal de mantenimiento, lo que encarece dicho mantenimiento.

2.1.5.2. Mantenimiento Preventivo

Es uno de los mantenimientos más utilizados actualmente. Todo equipo, después de un periodo específico de tiempo en funcionamiento, es sometido a un desmontaje total o parcial para su inspección, con el fin de detectar posibles desperfectos existentes en el equipo y repararlos. Los intervalos entre inspecciones son calculados estadísticamente con la información obtenida del ciclo de vida de un equipo, como se explica en el apartado 1.4. [10].

El objetivo de este tipo de mantenimiento es anticiparse a la avería antes de que esta se produzca.

En el mantenimiento de un buque de carga, la Metodología del Mantenimiento Preventivo es de gran importancia, ya que este método es una herramienta imprescindible para garantizar la seguridad, disponibilidad y explotación del buque, ante el escenario actual que busca una reducción en la tripulación debido al coste del mantenimiento y aumento del precio de los combustibles. Esta metodología llevada de manera correcta, permite evitar pérdidas de tiempo por averías sufridas en alta mar que tienen un costo muy alto [11].

En forma de resumen se puede decir que el mantenimiento preventivo se caracteriza por las siguientes ventajas y desventajas [12]:

Ventajas:

- La realización de las operaciones de mantenimiento a intervalos fijos de tiempo predeterminados por estudios estadísticos del ciclo de vida útil de un equipo con la misma naturaleza, como se ha explicado anteriormente. Estos intervalos pueden ser modificados en función de la experiencia adquirida por el personal encargado de este mantenimiento.
- La realización de los trabajos de mantenimiento con tiempo, no son reparaciones de urgencia, por lo que son trabajos de calidad.
- Reducción y prevención de averías y emergencias.
- Capacidad de poder planificar el personal dedicado al mantenimiento, logrando una mejora en la organización del trabajo.
- Las maquinas diseñadas para recibir un mantenimiento preventivo tienen un diseño con formas sencillas, con lo que el desmontaje para su inspección y mantenimiento resulta fácil y reduce el tiempo de parada del equipo.

Desventajas:

- Se realizan reparaciones o sustituciones de elementos que no sería totalmente necesario.
- Se requiere de un pañol de respetos completo, ya que no se sabe cuál puede ser la pieza que se necesita sustituir.
- En ocasiones las inspecciones no valen de nada, ya que cabe la posibilidad que el equipo se encuentre en perfecto estado.
- Un equipo sin anomalías, tras su revisión puede causar problemas debido a un mal trabajo de montaje.

Dentro del mantenimiento preventivo podríamos diferenciar dos modalidades:

- El mantenimiento Preventivo Sistemático, efectuado a intervalos regulares de tiempo, de modo que no se produzcan averías en ese intervalo y teniendo en cuenta la criticidad de cada equipo y la existencia o no de respetos.
- El mantenimiento Preventivo Condicional o según condición, sometido a un acontecimiento predeterminado.

2.1.5.3. Mantenimiento según condición o estado

El mantenimiento según condición o estado, también llamado mantenimiento predictivo, trata de predecir el fallo, colocando una serie de sensores sofisticados de medición de ciertos parámetros en determinados componentes del equipo con el objetivo de monitorizar la progresión de dichos parámetros en un centro de control de datos, donde se estudian para predecir cuando las piezas pueden dejar de funcionar y así, evitar el fallo [13].

La teoría de este mantenimiento, es la de realizar el mantenimiento si los detectores indican anomalías o fallos y así, no se interfiere en el funcionamiento de la maquina, que en ocasiones es imprudente si este es correcto.

En resumen, el mantenimiento predictivo es una metodología que consiste en un seguimiento sistemático del funcionamiento de un equipo o sistema mediante el uso de sensores de medición que permiten conocer el funcionamiento del equipo, y así, su tendencia al fallo, facilitando la planificación de los procesos de mantenimiento sin los inconvenientes de el mantenimiento correctivo y preventivo.

El mantenimiento predictivo se caracteriza principalmente por [14]:

- Reducción de los costes y detección de errores y fallos sin la necesidad del desmontaje.
- Capacidad de una buena planificación de las acciones de mantenimiento.

- Eliminación de averías graves y costosas.
- El seguimiento sistemático de los equipos te permite disponer de un historial del funcionamiento de la maquina.
- Reducción del personal de mantenimiento pero necesidad de personal altamente cualificado.
- Mejora de la seguridad humana y de las instalaciones.

Las compañías navieras, con el fin de mantener su competitividad, tratan de disminuir los costes de explotación de los buques con ciertas medidas como reducir el personal de mantenimiento, emplear tecnologías punta en la construcción de nuevos buques con maquinaria totalmente automatizada y reduciendo los tiempos de parada del buque, cargas y descargas. Siempre y cuando este mantenimiento sea aplicable, es el más adecuado para reducir gastos.

Pero existen dos razones para, en ciertas circunstancias, no aplicar este mantenimiento:

- No todas las causas de fallo de un equipo pueden ser detectadas con antelación.
- El control de parámetros y su monitorización es costoso en equipos y mano de obra.

Solo si el coste de monitorización es inferior al ahorro generado por la implantación de este mantenimiento, es rentable la aplicación del mantenimiento según condición.

Dentro de este mantenimiento se pueden diferenciar dos tipos o clases de control de condición o estado:

- Control con el equipo en marcha
- Control con el equipo parado o no trabajando en sus condiciones normales

Existen diversas técnicas para la aplicación de este mantenimiento, como podrían ser análisis de aceites, vibraciones, temperaturas, ultrasonidos, etc., pero la más interesante que está estrechamente relacionada con la aplicación

de este trabajo es la monitorización a través de los gráficos de control, que establece una vigilancia ininterrumpida en maquinas especialmente importantes.

2.1.6. Mantenimiento de la sala de maquinas.

El mantenimiento en un buque es la razón de la existencia de los oficiales y subalternos de máquinas, que junto a la correcta operación de los sistemas de abordaje dan lugar a un buen funcionamiento de la maquina.

Para la realización del mantenimiento de la sala de maquinas tanto el fabricante de los componentes de equipos e instalaciones, como el personal de la naviera responsable del mantenimiento saben de antemano que tienen los conocimientos necesarios para llevar a cabo todo lo correspondiente al mantenimiento de las maquinas [6].

2.1.6.1. Tipos de mantenimientos

El mantenimiento empleado en los buques es el SAM (Sistema Alternativo de Mantenimiento), el cual está formado por todos los mantenimientos anteriormente descritos, correctivo, preventivo y predictivo.

Pero podemos añadir 2 tipos diferentes:

- Mantenimiento modificado
- Mantenimiento planificado

2.1.6.1.1. Mantenimiento modificado

El desarrollo de la actividad del mantenimiento repercute a todos los niveles, tanto a las técnicas como al personal que las desarrolla.

En los buques es común que se realicen modificaciones en la organización y realización de trabajos de mantenimiento.

En ocasiones el responsable del mantenimiento, el jefe de maquinas en este caso, o los propios oficiales de maquinas pueden contribuir a la modificación de un trabajo con el fin de realizarlo de manera más eficiente y con un menor esfuerzo. Es por ello que a este mantenimiento también se lo conoce como mantenimiento mejorativo [15].

Para la realización de un plan de mantenimiento modificado hay aspectos a tener en cuenta:

- Definir bien los objetivos a los que van dirigidas las modificaciones.
- Definir los puntos de intervención donde se justifique la modificación.
- Una vez definidos los puntos anteriores profundizar en el estudio de la aplicación para sacarle el máximo rendimiento posible.

2.1.6.1.2. Mantenimiento planificado

Con lo estudiado hasta el momento podríamos decir que el caso ideal del mantenimiento sería la máxima reducción posible de los trabajos de mantenimiento correctivo mediante la aplicación de técnicas de mantenimiento preventivas y predictivas aplicadas a distintos niveles. Esta idea es la que constituye la base del mantenimiento planificado.

Con esta idea, el mantenimiento correctivo, el cual es imposible su absoluta desaparición, se vería reducido a acciones esporádicas ante averías imprevistas en equipos que bajo un mal funcionamiento perjudiquen al buen rendimiento de la planta. Mientras que equipos que no afecten al buen rendimiento de la maquina, su mantenimiento se limitaría al correctivo [16].

Resumiendo, se podría decir de los componentes del mantenimiento planificado:

- Mantenimiento correctivo. La acción de este tipo de mantenimiento, no ha de ser siempre inmediata tras el fallo, son diversos los aspectos que habría que tener en cuenta, como las posibles consecuencias de la parada del equipo y de el riesgo de su indisponibilidad. Es por esto que antes de

realizar la acción correctiva inmediatamente tras el fallo, se ha de evaluar la situación y la necesidad de la inmediata intervención o aplazar dicho trabajo de forma que el trabajo sería planificado y organizado, así como los recursos necesarios.

- Mantenimiento predictivo. La importancia de una buena gestión de este mantenimiento, ya explicado anteriormente, reside en una buena elección de tiempos de inspecciones, la selección de los parámetros controlados, una buena instrucción del personal de mantenimiento y el correcto estudio de parámetros y procesos monitorizados [17].
- Mantenimiento preventivo. En este mantenimiento también descrito anteriormente, se destaca la importancia de una buena planificación y estudio de las acciones e inspecciones que se realizan, ya que con esta técnica de mantenimiento es posible detectar fallos que con la técnica del mantenimiento predictivo sería imposible, como desgaste, corrosión, etc. Pero se insiste en la planificación y estudio de tiempos entre inspecciones basados en la experiencia para las paradas innecesarias de equipos.
- Mantenimiento preventivo en varadas. Se trata del mantenimiento realizado en equipos que no es posible su parada para la realización del trabajo de mantenimiento en los que mediante técnicas predictivas se ha detectado un deterioro que requiere una futura intervención. Estos casos suelen venir programados y planeados de tal forma que la necesidad de la realización de estos trabajos coincidan con las varadas estipuladas del buque.

En conclusión, podemos entender como mantenimiento planificado: todo sistema de organización donde se planifican las acciones de mantenimiento previamente definidas, con el objetivo de mejorar el aprovechamiento del tiempo útil y una menor carga de trabajo para el personal de mantenimiento del buque.

2.1.6.2. Niveles de mantenimiento

Debido a la necesidad de estructurar y organizar los trabajos de mantenimiento, se dispone de una escala de niveles que hay que considerar dependiendo de la intensidad, lugar o personal necesario para el trabajo de mantenimiento [8].

Nivel 1

El nivel 1 está integrado dentro de las técnicas del mantenimiento autónomo. El mantenimiento correspondiente a este nivel se trata del mantenimiento cotidiano, realizado por los operarios de producción.

- Aseguran los cambios de útiles y herramientas de los equipos.
- En caso de un fallo se informa a los operarios de mantenimiento y se ayuda al diagnóstico y reparación del equipo.
- Vigilancia del funcionamiento de equipos con el fin de prever el fallo.
- Este primer nivel consiste en limpieza, engrase, controles de parámetros de funcionamiento, etc.

Nivel 2

Este nivel se puede considerar integrado dentro de la parte de producción. Pertenecen a este nivel los especialistas hidroneumáticos y electromecánicos que intervienen a petición del nivel 1 según la incidencia o naturaleza de la incidencia. Para asegurar el correcto funcionamiento de la maquinaria o equipo. Si no pueden resolver la incidencia, establecen un diagnóstico lo más ajustado posible y avisan al servicio de mantenimiento. Así mismo este personal asegura el mantenimiento preventivo programado de nivel 2.

Nivel 3

Está constituido por grandes profesionales del mantenimiento en los que recaer las siguientes funciones:

- El mantenimiento condicional.
- El mantenimiento programado y preventivo (nivel 3).
- Mejora de la mantenibilidad y la propuesta de mejoras y modificaciones de equipos y máquinas.
- La reparación de averías complejas.

Para realizar bien sus funciones deben estar bien informados por los operadores de 1º y 2º nivel, por esta razón es importante la comunicación y el trabajo en equipo.

Nivel 4

Lo podemos considerar como la ingeniería del mantenimiento, es decir, lo conforman los técnicos del mantenimiento, que como especialistas en la función global del mantenimiento, participan en las distintas fases del ciclo de la vida de un sistema de producción. Es decir, desde el diseño, la elección de materiales, equipos y tecnologías, etc., hasta la puesta en marcha de la producción en serie. Los técnicos de este nivel se encargan de asegurar una fiabilidad, mantenibilidad, y por tanto, el funcionamiento continuo.

Nivel 5

Este nivel se está empezando extender y comprende el denominado mantenimiento contratado. Para el arranque y seguimiento de autómatas, robots, automatismos, informática industrial aplicada y sus programas es importante las llamadas a los fabricantes de los equipos.

En el interior del área de producción/operación ha de extenderse la voluntad de formación y preparación para asumir tareas de los primeros tipos de intervención del mantenimiento a nivel de operarios conductores de líneas de producción y especialistas integrados en ellas y de una elevación de conocimientos técnicos constantes en los niveles 3 y 4 para poder resolver incidencias y situaciones que se den en los equipos de la línea de producción y en las automatizaciones de los enlaces.

2.1.6.3. Procesos de mantenimiento

A la hora de realizar el trabajo de mantenimiento de un equipo o instalación, las etapas o acciones a seguir, se podría decir que están establecidas por un proceso común para los distintos trabajos. Las etapas son las siguientes [18]:

- Estudio de la información obtenida a través de datos históricos y libros de instrucciones, tanto los datos técnicos, como la información suministrada por el fabricante, ya que este conjunto de información indica cuando y como se deben realizar las inspecciones o reconocimientos.
- Con la información recogida en el anterior punto, se elaboran unos elementos de consulta para la ayuda de la planificación del trabajo:
 - Instrucciones de mantenimiento.
 - Lista de componentes de equipos.
 - Lista de respetos de los equipos.
- Con los datos recogidos se establecen las fechas de los trabajos de mantenimiento a realizar y los periodos entre revisiones. Este sistema organizativo suele venir dado por un programa informático de mantenimiento.
- Asignación de los trabajos que se van a realizar en el mantenimiento.
- Preparación y comprobación de la existencia del material necesario para el trabajo de mantenimiento, tanto herramienta como respetos.

- Esta información recogida hasta ahora es analizada por el armador con el fin de extraer los siguientes datos:
 - Parte de mantenimiento realizado o avería reparada.
 - Defecto o avería pendiente de reparación.
 - Respetos recibidos.

Y por parte del armador, con la información obtenida, realiza un seguimiento del proceso de mantenimiento, anotaciones en los libros de control del mantenimiento y en el archivo histórico de cada equipo.

2.1.6.4. Planificación del trabajo de mantenimiento

Una buena planeación del trabajo de mantenimiento consiste en estimar las fechas y equipos de trabajo necesarios para la ejecución del mantenimiento, para ello habrá que tener en cuenta varios condicionantes: [19]

- Es conveniente que el plan organizativo de mantenimiento sea del máximo tiempo posible, con el fin de estructurar de forma correcta y coherente futuras revisiones exigidas por el armador o por las sociedades de clasificación.
- Hay que tener en cuenta que ciertas acciones de mantenimiento por su singularidad solo pueden realizarse en astillero, en dique seco.
- Determinadas acciones de mantenimiento deben ser organizadas de tal forma que permita realizar un mantenimiento en cadena, es decir, que la realización del mantenimiento en un equipo permita realizarlo en otro estrechamente relacionados.
- Los trabajos realizados en un mismo equipo deben estar muy bien planificados para poder organizar la entrega de respetos y talleres exteriores. Para esta planificación se deben separar los trabajos mecánicos de los eléctricos o electrónicos.

Para llevar al día todo este conjunto de tareas de mantenimiento, gestión de recursos disponibles, etc., actualmente se utilizan programas informáticos.

2.1.6.5. Asignación de tareas

Para una buena organización de la asignación de tareas, lo primero que se debe tener en cuenta es la clase de trabajo que se debe realizar en un mismo equipo. Como se indica en el anterior punto se deben estructurar y organizar los trabajos mecánicos, eléctricos o electrónicos, así como si el trabajo se realizara con el buque en seco o a flote.

La asignación de tareas en el buque está organizada por una escala de trabajo de los oficiales de mantenimiento, teniendo cada uno de estos asignadas unas tareas.

Lo siguiente que se debe tener en cuenta en la asignación de tareas es la fecha de realización del trabajo de mantenimiento, de tal forma que teniendo trabajos con fecha fija de realización establecida deberán ser ejecutados antes que trabajos sin fecha fija, de modo que no se cree una sobrecarga de trabajo en una misma fecha sino que se reparta la carga de trabajo a lo largo del tiempo [20].

Para la asignación de los trabajos de mantenimiento a los trabajadores, se emplea el siguiente razonamiento.

- Trabajos mecánicos.

Dependiendo del tipo y dificultad del trabajo, este será realizado, o bien por los oficiales de maquinas, si el trabajo es de dificultad, o bien por los subalternos.

También se debe tener en cuenta si el trabajo se puede realizar durante la navegación o en puerto, como se ha mencionado anteriormente, ya que muchos de los trabajos mecánicos que se deben realizar, resultan imposibles durante la navegación. Por lo que en ocasiones resulta inevitable un aumento de la carga de trabajo en las situaciones optimas para la realización de los trabajos.

- Trabajos eléctricos.

Estos trabajos, dependiendo del buque, son realizados por un electricista, cuyo trabajo se limita a los trabajos eléctricos, como era el caso del buque de estudio de este trabajo el buque gasero Sestao Knutsen.

Pero en otros, los trabajos eléctricos, son tarea de los oficiales de maquinas, quienes, dependiendo de la gravedad de la avería o la necesidad del trabajo eléctrico de mantenimiento, establecerá una prioridad y actuación del trabajo.

- Trabajos electrónicos.

Estos trabajos, al igual que el anterior, suelen ser desempeñados por el electricista del buque, también formado en electrónica. Este tipo de trabajos han ido aumentando con los años, con la implantación de equipos electrónicos para el control de la maquina. Como en el caso anterior, si no existe el puesto de electricista en el buque, el trabajo será desempeñado por un oficial de la maquina.

2.1.6.6. Implementación de técnicas para la mejora del mantenimiento

Al comienzo de la navegación propulsada por energía mecánica, la función del mantenimiento residía en 3 parámetros.

1. Disponer de bastante personal a bordo
2. La simplicidad del manejo de las maquinas
3. Las prolongadas estancias en puerto

Esto propiciaba que los trabajos de mantenimiento estuvieran principalmente encomendados a los miembros de la tripulación.

Con el paso del tiempo, las compañías navieras, con el fin de mantener su competitividad, trataron de reducir costes de la explotación de los buques mediante la reducción del personal y empleando tecnologías punta y nuevas técnicas de mantenimiento.

Entre estas técnicas, destacaremos:

- TPM
- Sistema GMAO

2.1.6.6.1. Sistema de información para la gestión del mantenimiento. Sistema GMAO

El sistema GMAO (gestión del mantenimiento asistido por ordenador) consiste básicamente en paquetes informáticos que abordan un conjunto de principios que se consideran de importancia para el diseño, desarrollo y posterior implantación de los sistemas de información para la gestión del mantenimiento [21].

Esta técnica para la gestión de un plan de mantenimiento era utilizado en el buque Sestao Knutsen, buque de estudio de este trabajo.

2.1.6.6.1.1. Objetivos del sistema GMAO

El objetivo general del GMAO es gestionar las actividades de mantenimiento de una planta industrial, en este caso las instalaciones y equipos de un buque, a fin de que se logre optimizar la disponibilidad de estas instalaciones y estos equipos, a un coste total adecuado, permitiéndose el logro de los objetivos de producción y utilización, alcanzándose la rentabilidad deseada.

Entre los objetivos particulares se puede destacar [21]:

- Facilita la programación de las tareas de mantenimiento.
- Ayuda a planificar los recursos necesarios para el mantenimiento (mano de obra, respetos, herramienta, etc.)
- Mejora de la utilización de los recursos.
- Generar una base histórica de datos de los equipos y de los mantenimientos realizados en ellos con el fin de tener un registro de todo el mantenimiento.

2.1.6.6.1.2. Funciones básicas del sistema

Las funciones principales de un software de gestión del mantenimiento son [22]:

1. Cubrir las tareas relativas a la captura y tratamiento de información:

La entrada, salvaguarda y gestión de toda la información que se pueda tratar informáticamente relacionada con el mantenimiento de forma que pueda ser accesible en cualquier momento.

- Codificación y tratamiento de las causas de intervención y tipos de trabajo.
- Codificación de equipos, sistemas y elementos.
- Codificación de los recursos para el mantenimiento.

2. Proporcionar ayuda al nivel operativo. Base de los conocimientos:

- Gestión de archivo histórico del mantenimiento de la maquinaria.
- Elaboración de una base de conocimientos adquiridos en anteriores mantenimientos desde el síntoma y la causa hasta la solución del problema.
- Proveer de herramientas para la gestión o planificación del trabajo y proporcionar una herramienta para la planificación estratégica del departamento de mantenimiento.

3. Dotar de procedimientos para autocontrol y mejora continua del mantenimiento:

- Procedimientos de autoevaluación del mantenimiento mediante verificación de medidores que determinen el funcionamiento del sistema.
- Implementación de un ciclo de mejora continua

4. Integración con los restantes subsistemas de información, sistemas informáticos, equipos y aplicaciones:

Otra tendencia muy importante en estos momentos es la posibilidad de conectar estas aplicaciones con los sistemas de gestión de la empresa o bien

integrarlos completamente en estos, para facilitar el intercambio de información entre los diversos sectores implicados.

- Elaboración de una base de datos para el mantenimiento preventivo y su planificación conectada con la gestión de compras, personal, contabilidad de costos y producción.
- Completa integración en la organización general de la planta.

2.1.6.6.2. Mantenimiento total de producción (TPM)

El TPM es una filosofía de mantenimiento, cuyo objetivo principal es el de reducir los costes de producción mediante la creación de una estrecha relación entre empleado y proceso. Esta técnica está basada en la importancia de la preparación del personal hacia un terreno de autodisciplina que motiva una nueva cultura de responsabilidad, originada en 1971 por el instituto japonés de ingenieros de plantas. Y en 1997, este instituto japonés introdujo la definición de los componentes estratégicos del TPM [23]:

- Crear una organización corporativa que maximice la eficacia de los sistemas de producción.
- Gestionar la planta con una organización que evite todo tipo de pérdidas en la vida entera del sistema de producción.
- Involucrar a todos los departamentos en la implantación del TPM, incluyendo desarrollo, ventas y administración.
- Involucrar a todos, desde los operarios de la planta hasta la alta dirección, en un mismo proyecto.
- Orientar decididamente las acciones hacia las “cero pérdidas”, apoyándose en las actividades de los pequeños grupos.

2.1.6.6.2.1. Elementos que constituyen el sistema de gestión TPM

El TPM tiene 5 elementos fundamentales [24]

1. Mantenimiento autónomo
2. Mejora del rendimiento del equipo
3. Calidad en el mantenimiento
4. Prevención del mantenimiento
5. Formación y entrenamiento

1. Mantenimiento autónomo

El mantenimiento autónomo es una parte fundamental del TPM, es realizado por el departamento de producción y su misión es la de mejorar los resultados empresariales produciendo productos de buena calidad, rápidos y baratos, creando lugares de trabajo limpios y agradables. Entre sus funciones más importantes, destacan, la detección de un posible fallo y actuar con prontitud sobre la anomalía para que no suceda éste.

Los objetivos del programa de mantenimiento autónomo son:

- Evitar el desgaste y deterioro del equipo mediante revisiones diarias y la correcta aplicación del mantenimiento.
- Mantener el equipo, en el lugar de lo posible, en su estado ideal con mantenimientos y gestiones apropiadas.
- Establecer las funciones básicas para tener el equipo en buenas condiciones de funcionamiento.

Para lograr los objetivos descritos, se sigue una lista de acciones:

- Realizar limpieza inicial: ayuda a detectar anomalías del proceso y fuentes de contaminación.
- Eliminar fuente de contaminación: reparar pérdidas de fluidos, como aceites, agua, etc. Para facilitar el trabajo de limpieza.

- Creación de métodos de limpieza y lubricación: una buena organización de los trabajos de lubricación y limpieza de equipos.
- Inspección general del equipo: formación de personal cualificado para la detección de averías o anomalías en los procesos.
- Inspección general del resultado: comprobar y analizar que las acciones llevadas a cabo anteriormente, dan como resultado una mejora de producción.
- Destino y orden del lugar de trabajo: la empresa tiene como deber, proporcionar lugares de trabajo seguros y confortables, mientras que los trabajadores deben crear un buen ambiente de trabajo.
- Realización del mantenimiento autónomo implantado: analizar y estudiar formas de mejora en la vida útil, seguridad, fiabilidad y mantenibilidad de los equipos.

2. Mejora del rendimiento del equipo

Este mantenimiento, involucra a todas y cada una de las personas del proceso de mantenimiento y producción, desde los operarios de los equipos hasta la dirección de las mismas. La mejora del rendimiento del equipo significa la utilización óptima del mismo. Para ello es necesario eliminar todo tipo de pérdidas que puedan tener lugar en un equipo, entre las que se destacan 6 [25]:

- Pérdidas por avería.
- Pérdidas por cambio de herramientas y puesta a punto.
- Pérdidas por microparadas y esperas.
- Pérdidas por arranques y paradas.
- Pérdidas por baja velocidad o capacidad reducida.
- Pérdidas por defectos en la calidad y reproceso.

Si se logra eliminar cada una de estas pérdidas del equipo, se conseguirá lo denominado máxima eficacia global del equipo (overall equipment effectiveness, OEE) [25].

3. La calidad en el mantenimiento

Para asegurar la calidad en el mantenimiento se deben establecer programas que persigan la eliminación de cada una de las pérdidas anteriormente mencionadas, para lo cual se utilizan todo tipo de herramientas para la gestión de la calidad y de resolución de problemas, como podría ser los gráficos T² de hotelling.

4. La prevención del mantenimiento

Se entiende por prevención del mantenimiento en el TPM como un aspecto significativo de la ingeniería de proyecto, que sirve como interfase entre ingeniería de mantenimiento y proyecto. El objetivo de estas actividades es reducir el periodo entre el diseño y la operación estable del equipo, asegurando un progreso eficiente a través de este periodo con un mínimo de tarea y sin desequilibrios en la carga de trabajo [23].

En la actualidad este concepto se extiende a la fase de operación de los equipos. Existen técnicas que permiten analizar los equipos en su fase operacional, sus puntos débiles, para disminuir los trabajos de mantenimiento que necesitan [24].

5. La formación y el entrenamiento

Teniendo en cuenta que en el TPM los operarios asumen una gran responsabilidad y participación en la toma de decisiones en la organización, estos, deben estar preparados para realizar los análisis oportunos y llevar a cabo estas tareas. Para ello, es imprescindible la formación y entrenamiento de los operarios sobre cada uno de estos aspectos:

- Introducción al TPM.
- Técnicas generales y específicas de inspección.
- Técnicas generales y específicas de diagnóstico.

- Técnicas de resolución de problemas.
- Técnicas específicas en función entorno productivo, equipos, etc.

Es importante subrayar la necesidad de una actualización continua en la formación y en el entrenamiento de las distintas personas de la organización, del buque en este caso.

2.2. Gráficos de control

Los Gráficos de control son utilizados para poder analizar el comportamiento de diferentes procesos y poder prever posibles fallos en equipos o procesos mediante métodos estadísticos [26].

Este control estadístico distingue entre dos causas de posible variación o fallo dentro de un proceso; las que no pueden ser identificadas y corregidas que son denominadas “causas fortuitas o aleatorias”, y otras que pueden ser identificadas, denominadas “causas asignables”.

Cuando un proceso opera bajo la acción de causas fortuitas o aleatorias, se dice que el proceso se encuentra bajo control.

Se podría decir que el objetivo de los gráficos de control es identificar y eliminar las causas asignables, para asegurar que el proceso se encuentra bajo control [27].

Existe una gran variedad de gráficos de control que se pueden aplicar a todo tipo de características medibles o contables de un proceso, un producto o cualquier salida.

Dentro de esta variedad podemos distinguir dos grandes grupos, los gráficos de control univariantes y los gráficos de control multivariantes.

2.2.1. Gráficos univariantes

Los gráficos de control univariantes, como su propio nombre indica, se caracteriza por el número de variables monitorizadas de un proceso. En este caso las variables monitorizadas es una, donde se establecen unos límites de control del proceso y se analiza su comportamiento.

Bajo el pensamiento de Shewhart fueron desarrollados los primeros gráficos de control, con el propósito de descubrir causas asignables.

Estos gráficos fueron diseñados para el control de calidad de procesos de fabricación, pero hoy en día son técnicas de monitorización utilizadas en muchos ámbitos, incluidos los buques, donde su aplicación ayuda a la

monitorización de los procesos de la sala de maquinas para la detección, predicción y prevención de fallos y averías [27].

2.2.2. Gráficos multivariantes

En la mayoría de casos prácticos, en nuestro caso equipos y procesos de la sala de maquinas, son definidos por varias variables al mismo tiempo, de forma que si alguna de estas variables no se encuentra en su valor optimo, el equipo o proceso no trabaja a la totalidad de su rendimiento.

Los gráficos de control multivariantes se comenzaron a desarrollar por primera vez en 1947 con el propósito de controlar varias variables de forma simultánea, y hoy en día tienen una gran importancia en el control moderno de procesos, ya que los procedimientos de inspección automáticos permiten fácilmente medir un gran número de variables dentro de un mismo proceso [28].

2.2.2.1. Gráfico T^2 de Hotelling

Este grafico de control multivariante, propuesto por Harold Hotelling (1947), permite monitorear la distancia estadística entre un vector de observaciones y el vector de medias, o entre el vector de medias y el vector de medias globales, para los casos en que se utilizan subgrupos racionales.

Suponiendo que los datos se distribuyen de acuerdo a una distribución normal p variante con vector de medidas μ y matriz de varianza-covarianza Σ conocidos, la distancia T^2 viene expresada de la forma siguiente [28]:

En el caso de una sola observación, que es el caso de estudio ($i = 1, 2, \dots, n$):

$$T_i^2 = (x_i - \mu)' \Sigma^{-1} (x_i - \mu) \quad (1)$$

Si se desconocen los parámetros de la normal p variante, se utilizan sus estimaciones \bar{x} y S obtenidas a partir de datos históricos, quedando la expresión anterior de la siguiente manera:

En el caso de una sola observación, que es el caso de estudio ($i = 1, 2, \dots, n$):

$$T_i^2 = (x_i - \bar{x})' S^{-1} (x_i - \bar{x}) \quad (2)$$

Cuando se fija un nivel de significación α , se construye una hiperelipsoide que incluye con una probabilidad $1-\alpha$ las observaciones que definen el proceso como bajo control. En términos gráficos esto significa que una observación fuera de la región de control constituye una señal de alerta.

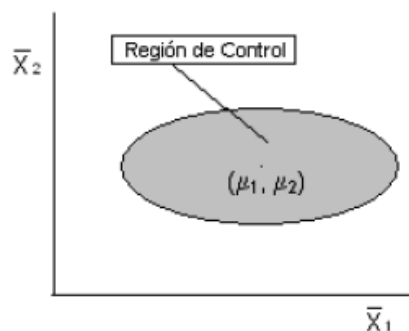


Figura 2: Hiperelipsoide

Los gráficos de control multivariante se aplican en dos etapas conocidas como fase I y fase II.

En la primera fase se toma el proceso inicial (datos históricos) y se construyen los gráficos de control preliminares y en la segunda fase se toman muestras para monitorear el comportamiento estadístico del proceso y detectar variaciones en el proceso.

- Fase I

La fase 1 también se denomina etapa de inicio, ya que su propósito es desarrollar el conjunto de datos históricos (Historical Data Set), el HDS que define los límites de control o las condiciones operativas de referencia a las cuales se compararán las nuevas observaciones durante la fase 2.

Para establecer el HDS, se utiliza un conjunto preliminar de datos, ya que se considera que los datos de este proceso representaban el perfil del proceso bajo las mejores condiciones operativas monitoreadas. Los datos de este proceso se evalúan para la presencia de valores atípicos antes de considerarlos como el HDS [29].

En esta fase, para el cálculo del LSC (Límite Superior de Control), se utilizó la distribución β de $\alpha = 0.05$, valor utilizado en la mayoría de procesos industriales [29].

Límites de control para el vector de medias:

- Límite superior de control (LSC):

$$LSC = \frac{(n-1)^2}{n} \beta \left(\alpha, \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right) \quad (3)$$

Si el valor de T^2 , el cual fue monitorizado para cada observación, excedía el LSC, esta observación era eliminada de la base de datos preliminar.

Con las restantes observaciones, calculamos nuevas estimaciones del vector de medias y de la matriz de varianzas y covarianzas.

De nuevo se eliminan los outliers detectados y así repetimos el proceso hasta que obtuvimos un set de observaciones homogéneo.

Finalmente el set final de datos obtenidos será el HDS, que define el modo de operación normal del proceso monitorizado.

- Fase II

Una vez desarrollada una línea base de un proceso representativo y condiciones operacionales del HDS, la fase 2 en la construcción de gráficos de control multivariantes consiste en comprobar si una nueva entrada de datos permanece bajo control respecto al HDS.

En esta fase, el vector de medias y la matriz de covarianzas son obtenidas desde el HDS para los cálculos de T^2 [30].

El LSC, se determino por la siguiente expresión:

$$LSC = \frac{p(n+1)(n-1)}{n(n-p)} F_{\{\alpha, p, n-p\}} \quad (4)$$

Para el cálculo del LSC, se utilizo la distribución F de $\alpha = 0,05$. El nivel de α elegido es el nivel normalmente utilizado en procesos industriales pero este es variable, dependiendo del nivel de restricción del método.

Los valores de T^2 que exceden del LSC establecido, son declarados como señales atípicas y esto conduce a que la observación esta fuera de rango con respecto al funcionamiento de operación normal del proceso.

3. OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

Como se ha observado en el presente trabajo y durante los cursos de estudio del grado en ingeniería marina, el mantenimiento industrial y más en concreto el mantenimiento en un buque, es un tema muy amplio e importante de estudio, y en este trabajo se intenta mejorar y ampliar el estudio y enfoque de este mantenimiento y su mejora.

1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo se podría decir que es mejorar el mantenimiento del buque gasero Sestao Knutsen mediante el uso de gráficos estadísticos multivariantes para facilitar la detección de anomalías en los procesos de la sala de maquinas para predecir posibles fallos o averías con la suficiente antelación para prevenirlos.

2. Objetivos particulares:

- Presentar un enfoque diferente para la mejora del mantenimiento.
- Mejorar y facilitar el mantenimiento predictivo del buque.
- Reducción de gastos en mantenimiento reduciendo la necesidad del uso de un mantenimiento correctivo.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se ha contado con información obtenida durante el embarque realizado como alumno de maquinas en el buque gasero Sestao Knutsen, donde se obtuvieron los conocimientos necesarios para tratar de mejorar un plan de mantenimiento.

En esta sección del trabajo se han explicado las características del buque y los sistemas de la sala de maquinas. Para luego seleccionar un proceso, el cual ser monitorizado mediante gráficos de control de T^2 para la detección de fallos.

4.1. Descripción del buque Sestao Knutsen

El Sestao Knutsen es uno de los buques de transporte de LNG, o “gasero” o “metanero”, como son habitualmente llamados, construido en España. Construido en las gradas de La Naval (Construcciones Navales del Norte) en Sestao entre los años 2005 y 2007 y operado por la compañía noruega Knutsen OAS Shipping. Buque de bandera española y puerto de registro es Santa Cruz de Tenerife, su número IMO es 9338797 y la sociedad de clasificación que lo regula es la Lloyds Register of Shipping.



Figura 3: Buque Sestao Knutsen. Fuente: propia

El Sestao Knutsen es un buque construido expresamente y dedicado al transporte de gas natural licuado (LNG) con capacidad para transportar 138.000 metros cúbicos de dicho gas en sus cuatro tanques de doble membrana, a una temperatura de -163°C y una presión absoluta de 1.060 milibares de acuerdo con los requerimientos de la IMO.

4.1.1. Características particulares

Tabla 1: Características particulares. Fuente: [31]

Eslora máxima	284 m
Eslora entre perpendiculares	271 m
Manga de trazado	42,5 m
Puntal hasta cubierta principal	25,4 m
Calado de diseño	11,4 m
Calado de verano	12,3 m
Calado en lastre	9,7 m
Peso muerto	77.329 Tm
Peso bruto	98.478 Tm
Peso neto	27.143 Tm
Capacidad de carga	138.100 m ³
Sistema de contención de carga	Doble membrana
Potencia propulsora	MCR (Maximum) 28.000 kW NSR (Normal) 25.200 kW
Velocidad de servicio	19,5 kn

4.1.1.1. Sistema propulsor

La propulsión del buque Sestao Knutsen consta de una turbina de vapor y una línea de ejes acoplada a una hélice.

Se trata de una turbina de alta presión (una etapa Curtis doble y ocho etapas Rateau), una turbina de baja presión (cuatro etapas Rateau y cuatro etapas de reacción) y una turbina de ciar (dos etapas Curtis dobles).

La turbina principal, turbina de alta presión, es una turbina de condensación, ya que la presión al final de la última etapa está por debajo de la presión atmosférica [31].

Éste es el sistema convencional que se ha utilizado en los buques destinados al transporte de gas licuado en los últimos 30 años, y está compuesto por [32]:

- Turbina Kawasaki-Izar, de 28.000 kW a 83 rpm.
- Reductora reversible tipo tándem, doble y articulada.
- Línea de ejes fabricada y tubo de bocina suministrados por Sidenor.
- Hélice de cinco palas fijas y 8.700 mm de diámetro de Wärtsila.



Figura 4: Turbina de alta y baja presión, turbina de ciar y reductora. Fuente: propia

4.1.1.2. Sistema generador

4.1.1.2.1. Turbogeneradores

Dos turbogeneradores Mitsubishi de 3.150 kW de potencia cada uno. La turbina de vapor que los acciona consta de 6 etapas y gira a 10.000 rpm. La turbina mueve el eje al que están acoplados los alternadores que son de la marca ABB, giran a 1.800 rpm y suministran una corriente eléctrica trifásica (60 Hz) a los cuadros eléctricos principales de 3.300 V y 689 A. Los turbogeneradores tienen “switches” para poder conectarlos indistintamente al cuadro eléctrico principal (3.300V) de estribor o de babor [31].



Figura 5: Turbogenerador de estribor. Fuente: propia

4.1.1.2.2. Motor diesel-generador

Un diésel-generador Wärtsilä de 8 cilindros que gira a 720 rpm y que genera una potencia de 3.100 kW, conectado a un alternador de la marca ABB, que a su vez conecta directamente con los cuadros eléctricos principales, suministrando una energía eléctrica a los cuadros de 3.300 V y 678 A. Este generador, al igual que los turbogeneradores, se puede conectar indistintamente a los cuadros eléctricos principales de estribor o babor. Este generador diesel no se suele usar excepto cuando existe un exceso en la demanda de energía eléctrica [31].



Figura 6: Motor diesel-generador. Fuente: propia

4.1.1.2.3. Motor diesel-generador de emergencia

Un grupo diésel-generador de emergencia MAN de 4 tiempos y 12 cilindros en V que gira a una velocidad de 1.800 rpm. El alternador al que está conectado genera una tensión de 450 V y una potencia de 550 kW. Este grupo de emergencia se puede conectar al cuadro eléctrico de emergencia (440V) y de ahí suministrar corriente eléctrica al cuadro eléctrico principal [31].

4.1.1.3. Planta energética

Por otro lado, La planta energética del buque Sestao Knutsen se compone de dos calderas que suministran vapor a la toda planta.

Tabla 2: Características de la caldera. Fuente: [31]

Características	Mitsubishi
Número	2
Modelo	Mitsubishi MB-4E
Tipo	Dos colectores, acuotubular, de circulación forzada
Vaporización máxima	65,000 Kg/h
Vaporización normal	50,000 Kg/h
Condiciones del vapor	Vapor sobrecalentado a 61,8 Kg/cm ² y 515°C
Consumo de fuel oil	3,641 Kg/h a vaporización normal
Consumo de gas	2,974 Kg/h a vaporización normal
Numero de mecheros	3 duales de fuel y gas

Estas dos calderas suministran vapor sobrecalentado a la turbina principal, turbogeneradores y a las turbobombas de alimentación de agua de las propias calderas.

Las calderas tienen 4 modos de combustión:

- Modo Fuel (solo fuel)
- Modo Dual (fuel y gas)
- Modo Gas (solo gas)
- Modo Low Load Gas

Por otra parte, el exceso de vapor recalentado que sale de la caldera entra al desrecalentador, situado en el colector de vapor. Así el vapor recalentado cede parte de su energía a la mezcla de agua y vapor que hay en el colector superior.

El vapor desrecalentado sale de cada caldera para unirse en una línea común que suministra a:

- Sistema de vapor de exceso DUMP.
- Sistema de soplado de calderas.
- Conexión de vapor de emergencia de la turbina principal.
- Piano de válvulas reductoras de presión.

El sistema de vapor DUMP, es ese consumo de vapor generado simplemente para quemar gas en las calderas y controlar así la presión de los tanques de carga. Este vapor es controlado a través de una válvula de pistón automática y dos válvulas de descarga o válvulas dumping que pasa a través de unos silenciadores y se le inyecta agua en forma de spray para bajar su temperatura antes de ser enviado al condensador principal.

- Condensador principal

El condensador principal es de tipo horizontal, tubular, alimentado con el vapor de exhaustación de la turbina principal, los turbogeneradores y el vapor desrecalentado DUMP, y refrigerado por circulación de agua salada mediante tres bombas de circulación centrífugas de 8.000 m³ /h cada una de ellas.[31]

- Turbobombas de alimentación de la caldera

Dos turbobombas que consumen vapor a 60 kg/cm² y 510°C, cuyo vapor de exhaustación a una presión de 2,7 kg/cm² se utiliza como suministro del vapor auxiliar.

Estas turbinas que accionan las bombas de alimentación de las calderas son turbinas de contrapresión, puesto que sus últimas etapas tienen una presión superior a la atmosférica [31].

4.1.1.4. Ciclo Rankine

La planta de propulsión del buque Sestao Knutsen está basada en el ciclo Rankine de vapor.

Este ciclo termodinámico se fundamenta en la evaporación y condensación de un fluido, en este caso, el agua. El agua de alimentación de la caldera es transformada en vapor mediante la absorción de energía calorífica procedente de la quema de un combustible en el interior del hogar.

Ese vapor sobrecalentado se envía a la turbina, con el fin de transformar la energía cinética y de presión del propio vapor en energía mecánica. El vapor con poca energía que hay a la salida de la turbina se envía al condensador principal, donde se condensa. Una bomba aumenta la presión del líquido para introducirlo en las calderas y volver a comenzar el ciclo [31].

4.2. Obtención de datos

El buque a estudio, estaba equipado con un equipo de monitoreo y control de procesos, el IAS (Integrated Automation System)

El sistema IAS fabricado por Kongsberg Simrad y de modelo Simrad Vessel Control, es un sistema de monitoreo, alarma y control de la maquina que cubre todas las plantas importantes a bordo del buque, como propulsión, generación de energía, calderas, maquinaria auxiliar y sistema de control de carga / lastre, etc.

Las funciones básicas incluyen:

- Monitoreo de sistemas y procesos
- Registro y monitoreo de eventos
- Control de funciones (control del motor, control de válvulas y PIDs)

Las principales aplicaciones a las que se aplican estas funciones son:

- Administración de la potencia
- Planta de propulsión
- Manejo del gas
- Control de carga y lastre
- Sistema de alarmas

El sistema se compone de los siguientes tipos de vistas:

- Procesos
- Flujos
- Graficas de tendencias
- Equipos

En la figura 7, se puede ver los gráficos de control univariantes generados por el sistema IAS para la monitorización y visualización de procesos de la sala de maquinas. El gráfico de la imagen en concreto, está representado por 10 variables no necesariamente de un proceso en concreto, ya que aparecen representadas tanto presiones de vapor, como las revoluciones del eje, carga de la caldera o vapor dumpeado.

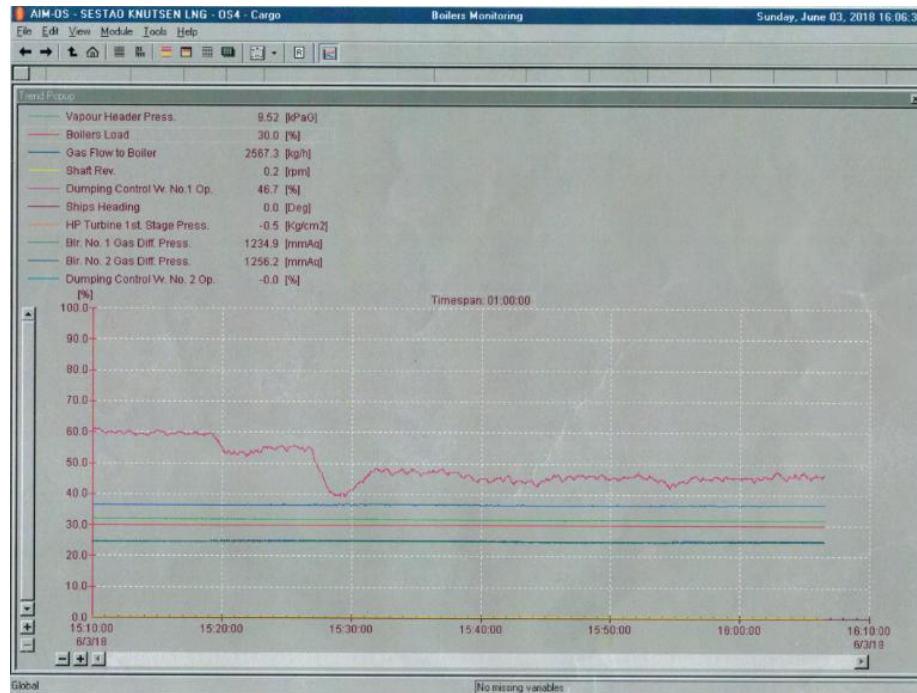


Figura 7: Gráfico univariante generado por IAS.

En el gráfico, también se puede observar la gran cantidad de variables monitorizadas al mismo tiempo en el mismo grafico, lo que dificulta la interpretación de datos y puede incluso generar un error de interpretación de los mismos.

Es aquí donde comienza a ser aplicado lo explicado hasta el momento en el trabajo, la creación de gráficos multivariantes, que mejoren el control de procesos en comparación a los gráficos de tendencias univariantes generados en el IAS.

Para la obtención de los datos nos ayudamos del sistema IAS, que aparte de lo descrito anteriormente, contaba con un equipo de adquisición de datos, el cual generaba diariamente una lista de los parámetros más relevantes de los procesos de la sala de maquinas, los cuales debían ser reescritos en el diario de mediodía del jefe de maquinas, con el fin de detectar posibles cambios en dichos parámetros.

La lista diaria de parámetros generada fue recogida durante un periodo de dos viajes.

Para la generación del grafico de control multivariante, se seleccionaron las variables de un proceso característico/general de la maquina donde lograr encontrar variaciones.

El sistema seleccionado para la elección de dichas variables fue el de caldera-turbina, proceso representado por el diagrama de flujo de la figura 8.

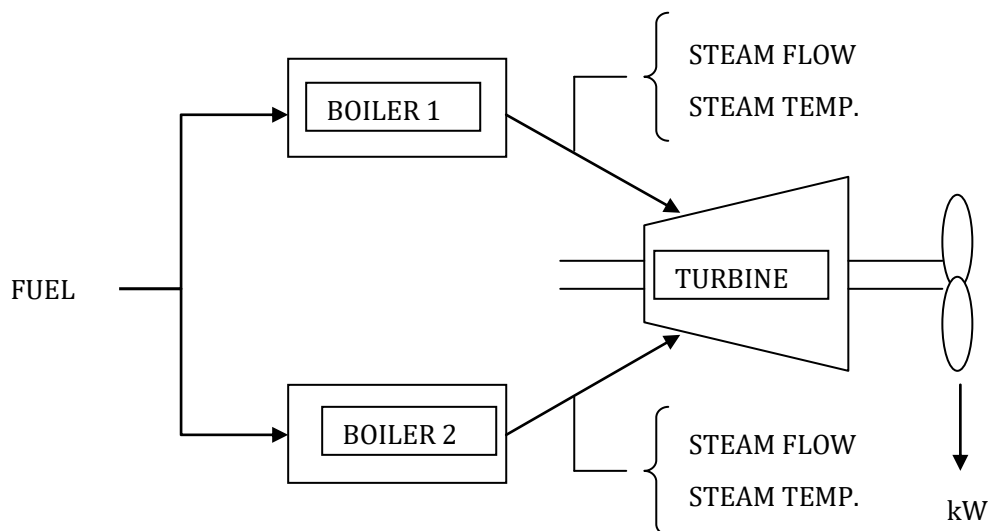


Figura 8: Diagrama de flujo del proceso caldera-turbina

El proceso quedo definido por 6 variables. Para la selección de las mismas, se conto con la ayuda de los oficiales de maquinas del buque y de la documentación técnica perteneciente al proceso seleccionado a monitorizar.

Las variables controladas son:

- Potencia generada por el eje (kW)
- Producción de vapor sobrecalentado de la caldera 1 (Tn/h)
- Producción de vapor sobrecalentado de la caldera 2 (Tn/h)
- Temperatura de salida del vapor sobrecalentado de las caldera 1 (°C)
- Temperatura de salida del vapor sobrecalentado de las caldera 2 (°C)
- Consumo (m³/día)

Entre estas variables, cabe destacar el control del consumo, ya que es un aspecto de gran importancia para las navieras, ya que supone una gran parte de los costes del buque.

La correlación de estos datos fue comprobada mediante el sistema de correlación de Pearson.

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas [33].

Con esta técnica se generó una tabla de comprobación de correlaciones.

Tabla 3: Correlaciones de Pearson

	Potencia	Producción caldera 1	Producción caldera 2	Tª vapor sobrecalentado caldera 1	Tª vapor sobrecalentado caldera 2	Consumo
Potencia	1	0,775	0,798	0,883	0,594	0,714
Producción caldera 1	0,775	1	0,819	0,671	0,528	0,638
Producción caldera 2	0,798	0,819	1	0,702	0,521	0,629
Tª vapor sobrecalentado caldera 1	0,883	0,671	0,702	1	0,759	0,659
Tª vapor sobrecalentado caldera 2	0,594	0,528	0,521	0,759	1	0,518
Consumo	0,714	0,638	0,629	0,659	0,518	1

Donde la correlación va dada de -1 a 1, siendo estas las máximas correlaciones, por lo tanto, se puede observar que existe una clara correlación entre las variables.

Estos datos fueron recogidos durante un periodo de dos viajes en lastre y en la misma ruta, por lo que las condiciones del barco y del ambiente son similares. De esta manera se ha podido realizar la comparación entre los dos viajes.

Las condiciones de adquisición de los datos recogidos, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Condiciones de los viajes

	VIAJE 1	VIAJE 2
Fecha	10/12/17 → 25/12/17	13/01/18 → 25/01/18
Ruta	Malta → Trinidad	Malta → Trinidad
Condición del buque	Lastre	Lastre
Consumo	Only Gas	Only Gas
T ^a maquina (°C)	27 – 32	27 – 32
T ^a ambiente (°C)	16 – 32	16 – 32
Velocidad media (kt)	10 – 13.5	10 – 13.5

4.3. Cálculos

Como se explicó en la sección del estado del arte, la implementación de estos gráficos de control se realiza en dos fases:

4.3.1. Fase I

Podríamos definir esta fase como la fase de purgado para la obtención de la base histórica de los datos de referencia, es decir, creamos el proceso ideal, Historical Data Set (HDS), que define los límites con el que comparar nuevos datos.

Para esta fase se toman los datos del primer viaje, un conjunto de 77 datos preliminares que consideramos como un caso ideal ya que se encontraban dentro de las condiciones de viaje establecidas previamente en la tabla 4.

La base de datos preliminar fue monitorizada a través del gráfico de control T^2 de Hotelling, siguiendo la siguiente ecuación:

$$T_i^2 = (x_i - \bar{x})' S^{-1} (x_i - \bar{x}) \quad (5)$$

Donde:

x_i = Datos preliminares

\bar{x} = Vector de medias

S^{-1} = Inversa de la matriz de covarianza

Y se estableció un límite de control superior (LSC), siguiendo la ecuación 6 en función de la distribución beta con $\alpha = 0,05$, este valor, fue seleccionado por ser el mayormente usado en procesos industriales. Este valor podría ser modificado, haciendo más o menos estricto el método.

$$LSC = \frac{(n-1)^2}{n} \beta \left(\alpha, \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right) \quad (6)$$

Donde:

p = número de variables

n = tamaño del conjunto de datos

$\beta \left(\alpha, \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right)$ = es el α th quantile de la distribución $\beta \left\{ \frac{p}{2}, \frac{n-p-1}{2} \right\}$

Para la elaboración de estos gráficos se ha contado con la ayuda del programa informático QualStat 6, un programa para poder realizar la construcción de los gráficos T^2 de Hotelling.

En la primera fase de eliminación de datos atípicos, se monitorizaron las 77 muestras de la base de datos preliminar, como se puede observar en la figura 9. Se detectaron valores de T^2 de 6 de las muestras que superaban el LSC establecido, estas muestras fueron eliminadas de la base de datos.

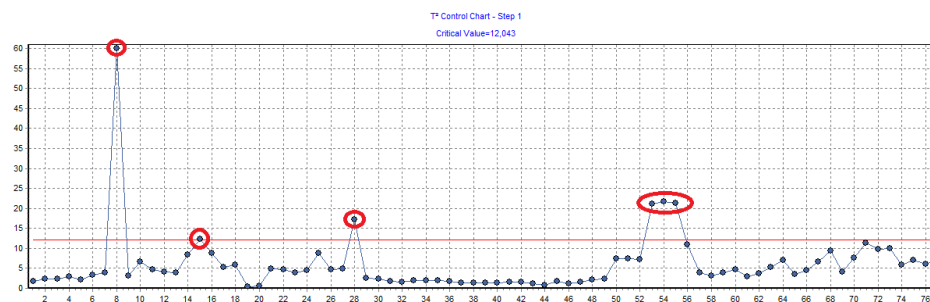


Figura 9: Gráfico del cálculo del HDS

Una vez eliminados los valores atípicos, con las restantes observaciones, se calcularon nuevas estimaciones del vector de medias y de la matriz de covarianza, y se volvieron a monitorizar siguiendo el mismo método. De nuevo, aquellas observaciones que superaron el LSC fueron eliminadas.

Este proceso se repitió hasta obtener un set homogéneo.

En la figura 10, se muestra el set final de datos que consideramos como el HDS del proceso formado por 54 muestras.

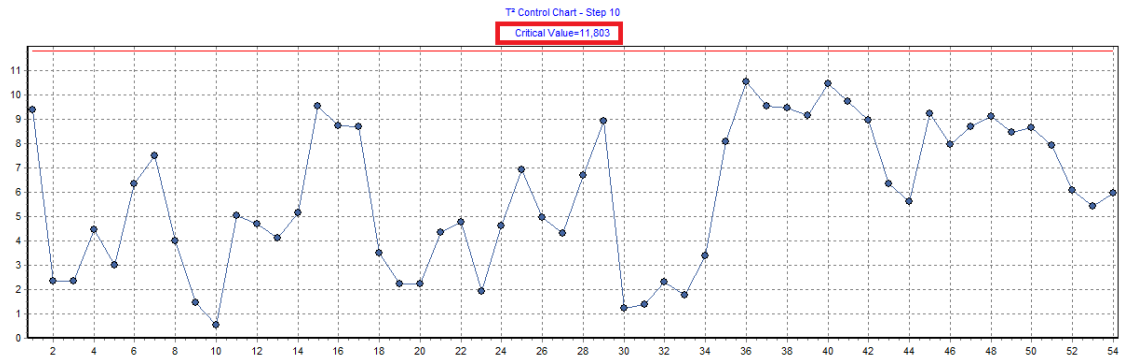


Figura 10: Gráfico del HDS

4.3.2. Fase II

En esta segunda fase, se comprobó si una nueva entrada de datos generaba alguna desviación con respecto al modo de operación normal del proceso.

La nueva entrada de datos, correspondió a muestras adquiridas durante un viaje, obteniendo un total de 14 muestras validas, después de analizarlas acorde al criterio de las condiciones de operación normal del buque, tal y como se muestra en la tabla X

Los valores de T^2 de los nuevos datos fueron calculados siguiendo la ecuación 7.

$$T_i^2 = (x_i - \bar{x})'S^{-1}(x_i - \bar{x}) \quad (7)$$

Donde:

\bar{x} y S^{-1} , son el vector de medias y la matriz de covarianzas obtenidas desde el HDS.

x_i , es la nueva entrada de datos.

Para el cálculo del LSC se siguió la distribución F de $\alpha = 0.05$, como se explica anteriormente, valor establecido por ser el valor utilizado para la mayoría de procesos industriales.

Para este cálculo se siguió la ecuación 8.

$$LSC = \frac{p(n+1)(n-1)}{n(n-p)} F_{\{\alpha,p,n-p\}} \quad (8)$$

Donde:

$p = n^{\circ}$ de variables.

$n =$ tamaño HDS

$F_{\{\alpha,p,n-p\}} = \alpha$ th quantile de $F_{\{\alpha,p,n-p\}}$

5. RESULTADOS

5. RESULTADOS

El proceso de estudio fue monitorizado por 6 variables mediante la carta de control de T^2 de Hotelling.

Primero, se calcularon los valores de T^2 según la expresión 7, para cada una de las 14 observaciones pertenecientes al segundo viaje y se monitorizaron en una carta de control según se observa en la figura 11.

Estos valores de T^2 se compararon con un LSC = 15,48, previamente calculado, siguiendo la expresión 8.

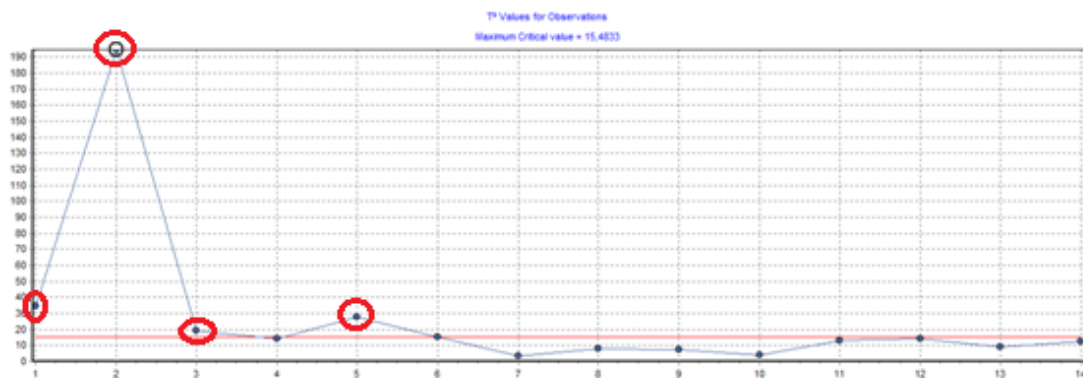


Figura 11: Gráfico de control

En la figura 11, correspondiente a la carta de control, se observaron valores de T^2 por encima del LSC, esto indicó, que en ese intervalo de tiempo, el proceso sufrió una desviación. No estaba trabajando bajo las condiciones de operación normal del proceso.

Esta situación no quiere decir que el proceso estuviese fallando, si no que en ese momento se desvió de sus condiciones de operación normales. Pero si esa tendencia negativa se repite en el tiempo, sería un indicativo de la necesidad de tomar acciones correctivas para la prevención de un mal funcionamiento del proceso.

En la figura se observan las 4 muestras que provocaron la desviación del proceso, en el que siendo el valor del LSC = 15,48, los valores de T^2 correspondientes a las muestras desviadas son:

- Muestra 1. $T^2 = 34,54$
- Muestra 2. $T^2 = 194,81$
- Muestra 3. $T^2 = 19,05$
- Muestra 5. $T^2 = 28,01$

Por lo tanto con la simple visualización del gráfico, descubrimos que en el transcurso del viaje realizado, existió una desviación en el proceso monitorizado de la sala de maquinas.

Existen técnicas como la descomposición de MYT, para detectar, cual o cuales han sido las variables que provocaron la desviación en el proceso. Sin embargo esto no ha sido objeto de estudio en este trabajo.

6. DISCUSIÓN

6. DISCUSIÓN

La mejora del mantenimiento para la prevención y detección de fallos en la sala de maquinas es un objetivo primordial para los buques, ya que el mantenimiento es un importante costo en la explotación de un buque.

Por este motivo es de gran importancia la interpretación y el estudio de los datos obtenidos del desarrollo del plan de mantenimiento.

Para la interpretación de los datos obtenidos en este trabajo se han aplicado los gráficos multivariantes de T^2 de Hotelling que nos dio como resultado un grafico que compara un funcionamiento ideal del buque, con unos nuevos datos obtenidos de un nuevo viaje.

Como se ha observado en la sección de resultados se obtuvieron 4 muestras desviadas de su funcionamiento normal, y cabe destacar la facilidad de detección de dichas desviaciones en un proceso de 6 variables con la simple visualización de un grafico. Esta es una de las principales ventajas de la utilización de estos gráficos multivariantes frente a los sistemas de control univariantes existentes actualmente en los buques, pero también existe alguna desventaja, estas se pueden resumir en:

Ventajas:

- Facilita la visualización y detección de desviaciones en un proceso multivariante.
- Sin la prematura detección de desviaciones en el proceso, habría que esperar a que la variable o variables desviadas se hubiesen elevado por encima de su "set point" establecido, y hubiesen activado la alarma de alta o baja, lo que en ocasiones supone una avería.
- Como se ha explicado antes, los sistemas actuales de monitorización de los buques, vienen dotados con sistemas de alarma, la cual es activada cuando una variable supera o no llega a sus límites previamente establecidos. Estos sistemas, no tienen en cuenta las condiciones del

buque, por lo que la interpretación de una señal de alarma podría llevar a error. Mientras que los gráficos multivariantes, correlacionan las variables de tal forma que se correlacionan las condiciones del buque con los debidos valores de las variables controladas.

Desventajas:

- La desventaja de la técnica de control estadístico de T^2 de Hotelling es que no detecta pequeñas y progresivas desviaciones del proceso monitorizado, sino que, estos gráficos son sensibles a desviaciones bruscas.

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

Hoy por hoy se puede afirmar que en toda la industria del mantenimiento y sobre todo en el mantenimiento en los buques, predominan sobre todos los intereses, el económico. Esto es una realidad, exceptuando los casos imprevistos que puedan tener consecuencias catastróficas, tanto en las vidas humanas como medioambiental, por lo que siempre se busca el coste mínimo de las acciones de mantenimiento.

Como se ha explicado en el trabajo, para la reducción de estos gastos, es vital una minimización de los trabajos de mantenimiento correctivo y preventivo, en los que en ocasiones se realizan paradas innecesarias, generando un aumento en el coste del mantenimiento no justificado.

La evolución del mantenimiento ha venido dado a medida que lo venían haciendo los avances tecnológicos, los cuales están en una constante renovación.

Por lo tanto, sabiendo la importancia que tiene el mantenimiento en un buque, tanto en el aspecto económico, como en el aspecto técnico, podemos concluir el trabajo destacando varios puntos:

- Una buena aplicación del mantenimiento significa una mejora del funcionamiento de la máquina de un buque y de la vida humana.
- La clave para la mejora de las técnicas de mantenimiento consiste en un desarrollo del mantenimiento predictivo.
- Los gráficos de control multivariantes como técnica de mejora del mantenimiento predictivo en un buque es un sistema útil, novedoso y desarrollable.
- Los gráficos de control multivariantes en comparación con los gráficos de control univariantes, existentes ya en la monitorización

de las sala de maquinas, dan como resultado una mayor facilidad en la detección de fallos o averías en procesos monitorizados de la sala de maquinas.

7. BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Mora, L. A. (2009). *MANTENIMIENTO-Planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor.

[2] de Mantenimiento, A. E. (1995). *El Mantenimiento en España: Encuesta sobre su situación en las empresas españolas*. Asociación Española de Mantenimiento.

[3] Newbrough, E. T. (1982). Personal de Albert Ramond y asociados. *Administración del Mantenimiento Industrial. 6taed. México: Diana*.

[4] García, S. (2009). *Ingeniería de mantenimiento: Técnicas avanzadas de gestión del mantenimiento en la industria*. Editorial RENOVETEC. Madrid, España. 150 p

[5]<file:///D:/DATOS%20WINDOWS/Downloads/36317036/MantenimientoIndustrial.pdf> consulta (15/03/2018)

[6] Baldín, A., Furlanetto, L., Roversi, A., & Turco, F. GG (1982). *Manual de mantenimiento de instalaciones industriales.. Barcelona*.

[7] Márquez, A. C., de León, P. M., & Herguedas, A. S. (2004). *Ingeniería de mantenimiento: técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Aenor.

- [8] Adolfo, C. M. (2004). Moreu de León Pedro, Sánchez Herguedas Antonio,“. *Ingeniería de mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos” primera edición, editorial AENOR, Madrid, España.*
- [9] Kelly, A., & Harris, M. J. (1998). *Gestión del mantenimiento industrial&eA. Kelly y MJ Harris.* Fundación Repsol, Publicaciones.
- [10] Rodríguez, H. (2014). Diseño de un Plan de Mantenimiento preventivo para Instalaciones Industriales de Bombeo de Agua Potable. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas. 88 p.
- [11] Rivella Oscar Mantenimiento basado en condicion para el buque [Publicación periódica] // Ingenieria Naval. - Ferrol, España : [s.n.], 23 de Julio de 2006. - págs. 49-59. ISSN 1885-3331.
- [12] Monchy, F. (1990). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial.* Masson.
- [13] de León, F. C. G. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial.* Editum.
- [14]<https://es.slideshare.net/JorgeGamarraTolentino/librodemantenimientoindustrial-24925104> consulta (25/03/2018)
- [15]<http://www.ingenieriamantenimiento.org/fundamentosmantenimientoindustrial/> consulta (26/03/2018)
- [16] Fernández, F. J. G. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado.* FC Editorial.

- [17] Nakajima, S., & Sim, Y. (1989). *La maintenance productive totale (TPM): mise en oeuvre*. Afnor.
- [18] Companys Pascual, R. (1989). Planificación y programación de la producción. *Ed. Boixereu Marcombo, Barcelona, España*.
- [19] Ávila, R. (1992). Fundamentos de Mantenimiento: Guías Económicas, Técnicas y Administrativas. *México DF. México: Editorial Limusa SA*.
- [20] del Mantenimiento, T., & Rotativas, D. D. M. E. (1998). Manés Fernández Cabanas y Otros Marcombo.
- [21] Moreu De León, P., & Crespo Márquez, A. (1996). Consideraciones sobre el sistema de información para la gestión del mantenimiento industrial. *Revista Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios, (97), 25-34*.
- [22] Wireman, T. (1994). *Computerized maintenance management systems*. Industrial Press Inc..
- [23] Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: Total Productive Maintenance (preventative maintenance series). *Hardcover. ISBN 0-91529-923-2*.
- [24] Campbell, J. D., & Jardine, A. K. (2001). *Maintenance excellence: optimizing equipment life-cycle decisions*. CRC Press.
- [25] Wireman, T. (1998). Developing Performance Indicators For Managing Maintenance, Industrial. *Press, New York, NY*.

- [26] Shewhart, W. A., & Deming, W. E. (1939). *Statistical method from the viewpoint of quality control*. Courier Corporation.
- [27] Arvelo, A. F. (1998). *Capacidad de Los Procesos Industriales: Métodos Estadísticos Exigidos Por Las Normas ISO-9000*. Universidad Católica Andrés Bello.
- [28] Hotelling, H. (1947). Multivariate quality control. *Techniques of statistical analysis*.
- [29] Tracy, N. D., Young, J. C., & Mason, R. L. (1992). Multivariate control charts for individual observations. *Journal of quality technology*, 24(2), 88-95.
- [30] Gnanadesikan, R., & Kettenring, J. R. (1972). Robust estimates, residuals, and outlier detection with multiresponse data. *Biometrics*, 81-124.
- [31] Knutsen OAS Shipping. (2009). "Machinery Operating Manual".
- [32] La Naval. (2017). La Naval. Obtenido de <http://www.lanaval.es/es/descargas/reportajes-buques.html> consulta (8/04/2018)
- [33] Dagnino, J. (2014). CoEfICIEnTE DE CorrELACIÓn LInEAL DE PEArSon. *Rev Chil Anest*, 43, 150-153.

