

**UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO/  
EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS NAVALES**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Mantenimiento FMEA del sistema de alimentación del motor Wartsila 50DF-12V**

**Grado en Marina**

**Septiembre 2017**

Alumno: Iñaki Elexpuru López de Lacalle

Director: Miguel Ángel Gómez Solaeche

## ABREVIATURAS

En el texto que sigue se emplearán, entre otras más comunes, las siguientes abreviaturas:

ESDS	Emergency Shut Down System
CNG	Compressed Natural Gas
FBO	Forced Boil Off
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GCU	Gas Concentration Unit
GMS	Gas Management System
GVU	Gas Valve Unit
HFO	Heavy Fuel Oil
IGC	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquefied Natural Gas
MDO	Marine Diesel Oil
MDF	Marine Diesel Fuel
MFI	Multiport fuel Injection
NBO	Natural Boil Off
PLC	Programmable Logic Controller
RCM	Reliability Centered Maintenance
RPN	Risk Priority Number
WECS	Wartsila Engine Control System

De otro lado, se han dejado sin traducir determinados términos en lengua inglesa –como, por ejemplo, *air cooler*, *booster*, *alongside* o *gas valveunit*– porque son ampliamente conocidos y utilizados en la materia que nos ocupa.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
3. ESTADO DEL ARTE.....	9
3.1 Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad.....	13
3.1.1 Metas del RCM.....	15
3.1.2 Proceso de implantación del RCM.....	19
4. MATERIAL Y MÉTODOS .....	20
4.1 Análisis de Modo de Fallos.....	20
4.1.1 Apéndice.....	20
4.2 Descripción de los Principios Básicos.....	21
4.2.1 General.....	21
4.2.2 Principios y alternativas.....	22
4.2.3 Objetivos.....	23
4.3 Proceso de Realización de un Análisis.....	24
4.3.1 Motor Marino.....	24
4.3.2 Descripción básica del motor Wartsila 50DF Dual 4T.....	26
4.3.3 Sistema auxiliar del motor.....	28
4.3.3.1 Sistema de combustible.....	28
4.3.4 Sistema de Combustible Diesel.....	29

4.3.4.1 Sistema de diesel interno.....	31
4.3.4.1.1 Sistema de inyección principal combustible.....	31
4.3.4.1.2 Sistema piloto de inyección combustible.....	33
4.3.4.1.3 Bomba piloto.....	35
4.3.4.1.4 Bomba inyección.....	35
4.3.4.2 Sistema de diesel externo.....	36
4.3.4.2.1 Tanque de sedimentación.....	36
4.3.4.2.2 Bomba alimentación, separadora.....	36
4.3.4.2.3 Precalentador.....	36
4.3.4.2.4 Bomba de circulación.....	36
4.3.4.2.5 Tanque de pérdidas limpias.....	37
4.3.4.2.6 Enfriador.....	37
4.3.5 Sistema de Fuel (HFO).....	40
4.3.5.1 Sistema de fuel interno.....	41
4.3.5.2 Sistema de fuel externo.....	44
4.3.5.2.1 Calentadores de fuel.....	44
4.3.5.2.2 Operación del separador.....	45
4.3.5.2.3 Tanque de sedimentación.....	45
4.3.5.2.4 Precalentador.....	46
4.3.5.2.5 Separador de fuel (HFO).....	47
4.3.5.2.6 Sistema de alimentación.....	48
4.3.5.2.7 Calentador.....	48

4.3.6 Sistema de Gas.....	52
4.3.6.1 Sistema de gas externo.....	55
4.3.6.1.1 Gas Valve Unit (GVU).....	56
4.3.6.1.2 Válvula master.....	57
4.3.6.1.3 Venteo de fuel gas.....	57
4.3.6.2 Sistema de gas interno.....	58
4.3.6.2.1 Sistema Common Rail.....	59
4.3.6.2.2 Válvula de admisión de gas.....	59
4.4 Identificar los Modos de Fallo.....	60
4.4.1 Procedimientos.....	60
4.4.2 Modos de fallo.....	61
4.4.3 Efectos de fallo.....	62
4.4.4 Detección de fallo.....	62
4.4.5 Beneficios de un FMEA.....	63
4.4.6 Proceso de un FMEA.....	64
4.4.6.1 Severidad.....	64
4.4.6.2 Ocurrencia.....	66
4.4.6.3 Detección.....	67
4.4.6.4 Determinación del RPN.....	68

5. RESULTADOS.....	70
5.1 Análisis del Sistema de Modo de Gas.....	70
5.2 Análisis del Sistema de Modo de Diesel (MDO).....	81
5.3 Análisis del Sistema de Modo de Fuel (HFO) .....	85
6. CONCLUSIONES.....	87
7. BIBLIOGRAFÍA.....	88

## Índice de Tablas.

Tabla 1: Beneficios en un mantenimiento centrado en la fiabilidad(RCM).....	16
Tabla 2: Ejemplo de lista de modos de fallo.....	62
Tabla 3:Criterio. Severidad del efecto.....	64
Tabla 4: Frecuencia de fallo.....	66
Tabla 5: Probabilidad de detección por control de procesos.....	67

## Índice de Figuras

Figura 1: Proceso RCM.....	17
Figura 2: Planificación del RCM.....	19
Figura 3: Análisis de fallos FMEA.....	21
Figura 4: Wartsila 12V-50DF frontal.....	25
Figura 5: Wartsila 12V-50DF trasera.....	25
Figura 6: Modo Diesel.....	26
Figura 7: Modo Gas.....	27
Figura 8: Sistema de inyección.....	27
Figura 9: Sistema de combustible.....	28
Figura 10: Unidad de combustible. Unidad Booster.....	29
Figura 11: Elementos del sistema de inyección.....	32
Figura 12: Caja caliente.....	34
Figura 13: Bomba piloto.....	35
Figura 14: Bomba inyección.....	35
Figura 15: Línea de diesel.....	38
Figura 16: Inyección de fuel.....	42
Figura 17: Línea de fuel.....	43
Figura 18: Tabla de viscosidades y temperaturas.....	49
Figura 19: Línea de fuel y diesel.....	50
Figura 20: Sistema de control. Low Duty.....	53

Figura 21: Gas Valve Unit (GVU).....	55
Figura 22: GVU.....	56
Figura 23: Sistema de gas interno.....	58
Figura 24: Modulo de control de inyección de gas.....	59

## 1.INTRODUCCIÓN

El mantenimiento dentro de la industria ha sufrido una revolución importante, empujada en gran parte por el desarrollo tecnológico de los equipos de control y de medida. En sus inicios, los trabajos de mantenimiento eran vistos solamente como actividades correctivas para solucionar fallos, pero hoy en día se abre en un abanico muy amplio de los diferentes tipos de mantenimientos.

Este proyecto se enfoca a estudiar la criticidad del sistema de alimentación de combustible de un motor marino propulsor, el Wartsilla 50DF12V, en el cual se contemplará la implementación de un método de prognosis de averías basado en FMEA.

El análisis de modos de fallo en mantenimiento se utiliza para evitar errores en las fases o procesos preventivos o correctivos. Se identifica con el denominado FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) que, a su vez, se fundamenta en estudios estadísticos de fallos y en los modos y repercusiones de estos.

Conocer la criticidad de cada sistema proporciona la ventaja de optimizar el gasto en cada máquina, ya que genera un ahorro económico importante y una mejor gestión de los respetos que se necesitan a bordo.

---

AMFE: Análisis de Modo de Fallo y Efecto.

FMEA: Failure Mode and Effects Analysis.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el conocimiento y aplicación del método de mantenimiento FMEA del sistema de combustible de un motor propulsor de un buque gasero.

Su desarrollo se basa en lo siguiente:

- Definición del tipo de mantenimiento que se va a realizar.
- Conocimiento de la fiabilidad de los elementos en la instalación.
- Nociones básicas de la instalación de combustible del buque.
- Definición de los sistemas que componen las instalaciones.
- Realización de un esquema básico de mantenimiento FMEA.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

Este estudio versa sobre la metodología del mantenimiento centrado en la fiabilidad, tiene la finalidad de incrementar la vida útil de los componentes de los equipos e instalaciones y, al mismo tiempo, aumentar la disponibilidad de los mismos al disminuir las averías y sus consecuencias. No solamente se lograría así incrementar la vida útil de las máquinas y equipos sino que, adicionalmente, se rebajaría el costo de su mantenimiento.

El futuro nos está llevando a monitorizar los elementos de instalaciones complejas, y así se conoce con todo detalle la Sala de Máquinas y sus posibles averías. Con lo cual podemos programar una reparación con mucha anterioridad o alargar la vida útil de los componentes, ya que al estar estos dando constante información de su estado, el Técnico podrá anticiparse al fallo o programar medidas correctivas más fácilmente.

### **3.1 Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad.**

Una de las técnicas organizativas actuales para aplicar en Mantenimiento y mejorar significativamente sus resultados es la llamada RCM (Reliability Centered Maintenance) o Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad.

RCM es la técnica basada en la búsqueda de mejora de resultados.

Empezó a desarrollarse en la década de 1960 por la industria aeronáutica norteamericana y se aplicó por primera vez a gran escala para el mantenimiento del avión Boeing 747. Después se usó para el DC-10, y así fue extendiéndose a una gran parte de la aeronáutica. Los resultados, aunque tardaron años en concretarse (pues la implantación, como veremos, es lenta), fueron sorprendentes.

En la actualidad, varias décadas después, la técnica se está extendiendo decididamente a otros sectores como el energético, el ferroviario, etc. Este periodo tan dilatado se explica y justifica por la complejidad de su implantación y las carencias documentales existentes en algunos sectores industriales, lo que ha ocasionado que los análisis de fallos en que se basa el método sean muy lentos.

El RCM se puede definir como la filosofía de gestión del mantenimiento en la que un equipo bien organizado se encarga de optimizar la fiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas. El equipo trabaja estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los equipos pertenecientes a dicho sistema, y teniendo en cuenta los posibles efectos que originan los modos de fallo de estos equipos sobre la seguridad, el medio ambiente y las operaciones.

Es decir, el RCM es una metodología que permite identificar estrategias efectivas de mantenimiento que garantizan el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de mantenimiento.

Antes de realizar una determinada inmersión en los conceptos básicos del RCM es necesario conocer la técnica organizativa con el análisis de modo de fallo y de sus efectos FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Esta técnica se refleja en la norma UNE 20812 y se basa en hacer un proceso también sistemático y documentado de análisis básicamente cualitativo que revisa y estudia en profundidad la fiabilidad de un sistema y sus subsistemas.

El citado FMEA identifica, en primer lugar, el componente susceptible de averiarse, luego el modo de fallo dominante y a continuación sus efectos, tanto en el propio sistema, como en la instalación; también el área de trabajo de que se trate y demás. Tras ello intenta cuantificar la probabilidad de fallo y de ahí obtiene las tareas de mantenimiento preventivo requeridas.

Es el principio relativamente similar al utilizado en el RCM, pero tiene dos consideraciones relevantes que se deben conocer para entender sus diferencias:

1. El método FMEA considera las averías que pueden producirse en los componentes de un determinado sistema, pero, salvo excepciones a aportar por los que realizan el estudio, no tiene en cuenta la combinación de fallos cuya aparición simultánea podría pasar de ser una avería leve a un fallo catastrófico que impidiera al sistema cumplir su función.
2. Considera aquellos modos de fallo que pueden impedir el cumplimiento de dicha función, pero no aquellos otros que degradan el sistema y que pueden ser objeto de un tratamiento estadístico o de seguimiento predictivo de variables.

Se puede decir que la metodología FMEA reflejada en la norma citada ha sido útil, pues ha servido para dar un paso adelante en la elaboración de las estrategias y planes de mantenimiento. [1]

### **3.1.1 Metas del RCM.**

Para abordar una metodología nueva de mantenimiento como esta es necesario partir de una definición estratégica clara por parte de la Dirección. Se dice esto de forma rotunda y totalmente preliminar, porque no se puede poner en marcha un equipo de trabajo de RCM sin haber dejado claro a sus miembros qué es lo que la empresa espera de ellos. De lo contrario, el equipo es posible que navegue a la deriva y que se encuentre con interrogantes que exceden su nivel de decisión.

Así pues, se puede encontrar un caso extremadamente extraño de averías múltiples que pueden causar un percance de gran entidad incluso con riesgo de vidas humanas, pero cuya hipótesis de aparición es muy baja y, por tanto, sean altísimos sus costes para realizar, por ejemplo, una intervención o una modificación de la instalación a fin de prevenirlos.

En el siguiente cuadro vamos a exponer unos posibles beneficios a obtener de la implantación del RCM. En dicho cuadro pueden verse valores concretos de mejora de la disponibilidad en los costes de mantenimiento, etc., sobre los que debe reflexionar el equipo directivo antes de la puesta en marcha del sistema. Es de esperar que estos datos puedan ser de utilidad para la elección de objetivos concretos en la implantación de una metodología como esta. Aunque se resalte que los valores que se aportan son referenciales y su aplicación concreta a su Departamento, pueden verse modificados según el grado de optimización de actividades que ya tenga implantado el equipo de trabajo.

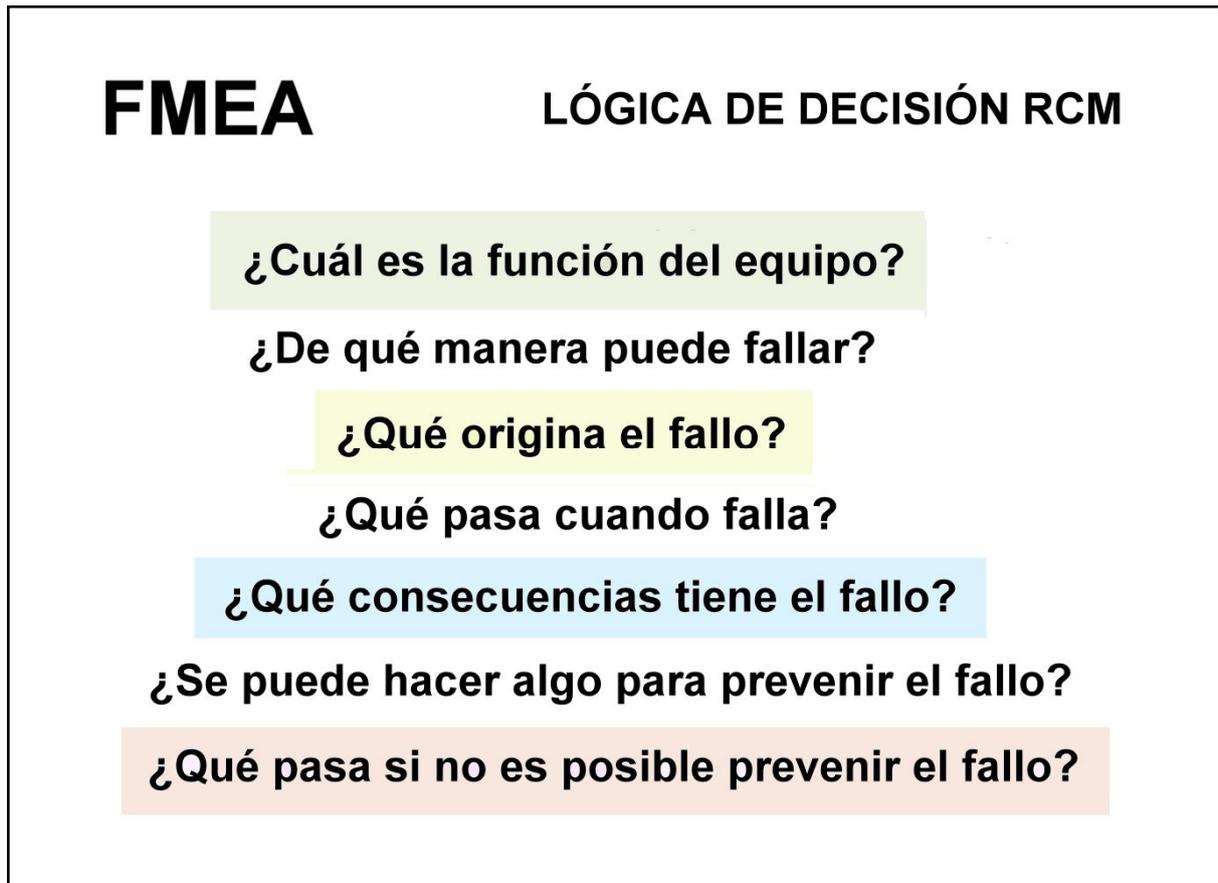
Es obvio que los márgenes de mejora no serán los mismos para una empresa que se haya limitado a hacer el preventivo recomendado por el fabricante del equipo en cuestión, que para la que lleve años optimizando periodicidades y consistencias del mismo preventivo.

**Tabla 1. Beneficios en un mantenimiento centrado en la fiabilidad**

<b>Beneficios a perseguir como metas en un mantenimiento centrado en la fiabilidad</b>				
<b>Costes</b>	<b>Servicio</b>	<b>Calidad</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Riesgos</b>
<p>Reducir los niveles y costes del mantenimiento preventivo rutinario (10 a 40%)</p> <p>Definir directrices y objetivos concretos para sustituir los preventivos rutinarios por predictivos.</p>	<p>Conocer mejor los requerimientos de servicio.</p> <p>Definir de forma consensuada niveles de calidad de servicio (ej., según ISO 9001).</p>	<p>Incremento de la disponibilidad por menor preventivo y menor correctivo (2 a 10%).</p> <p>Eliminación de fallos crónicos que alguien "no entiende " por qué no se reparan.</p>	<p>Reducción en las paradas programadas para grandes revisiones.</p> <p>Intervalos normalmente más largos entre paradas por seguimientos predictivos.</p>	<p>Mayor aseguramiento de la integridad de la seguridad y entorno.</p> <p>Análisis de fallos ocultos y sus causas, que no suelen revisarse en mantenimientos rutinarios.</p>
<p>Reducir los niveles de mantenimiento contratado y sus importes.</p>	<p>Reducir las averías con especial incidencia en las que repercuten en el servicio.</p>	<p>Mejora de la corresponsabilización y adhesión al cambio en el mantenimiento.</p>	<p>Tiempos de reparación más cortos por mejor conocimiento del sistema.</p>	<p>Reducción de la probabilidad de fallos múltiples.</p>
<p>Reducir las paradas en producción de forma rentable haciendo ingeniería.</p>	<p>Mejor comunicación entre departamentos de la empresa.</p>	<p>Mejor documentación del cambio y sistema auditable por terceros.</p>		<p>Reducción de riesgos asociados a las tareas rutinarias.</p>

Para definir el RCM partimos de la base de que es un proceso para determinar cuáles son las operaciones que debemos hacer para que un equipo o sistema continúe desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional, siempre y cuando estas sean rentables para la empresa.

Para llevar adelante la planificación correspondiente, el equipo de trabajo debe analizar las siguientes preguntas:



**Fig. 1. Proceso RCM**

Aquí se puede apreciar que el FMEA es una parte interna del mantenimiento RCM, por lo cual deben conocerse las bases de este último para poder realizar más adelante un esquema de mantenimiento.

Es importante determinar, cuando nos pongamos a responder dichas preguntas, qué es lo que el Armador o el servicio demandan de la instalación que hay que operar y gobernar. Esto es, el lugar, el entorno, las circunstancias de trabajo. Ello implica saber cuáles son verdaderamente los límites o estándares de funcionamiento necesarios en realidad para nuestra actividad; no se puede intervenir en un gran motor propulsor solamente por que parezca que hace un poco más ruido de lo normal.

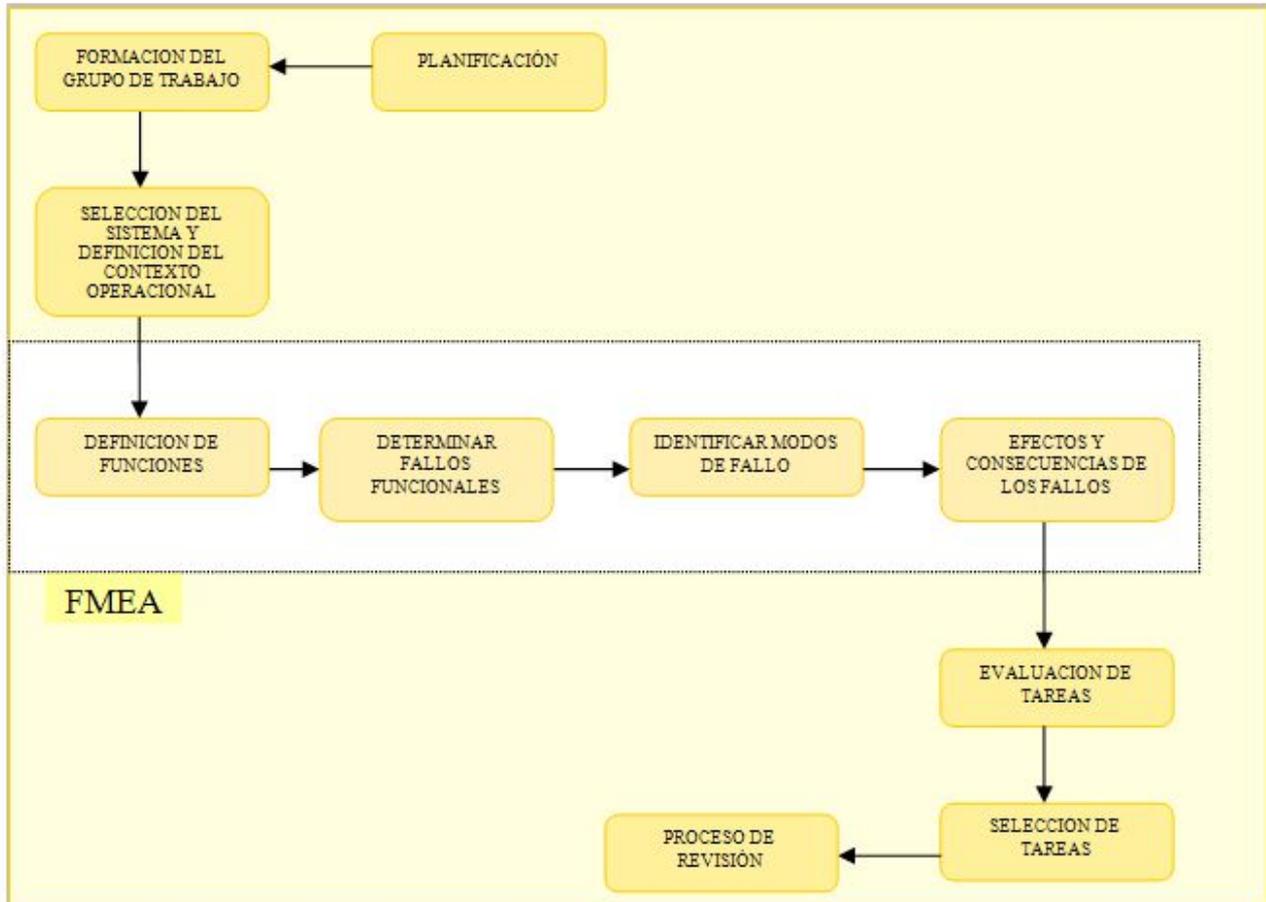
La rigurosidad debe estar siempre presente en nuestra toma de decisiones; con ello se quiere decir que en el caso de un motor como el que es objeto de este trabajo, el nivel de ruido deberá tener unos límites de aceptabilidad a partir de los cuales sea necesaria la intervención de mantenimiento.

Una vez sabidas cuáles son las funciones y prestaciones, hay que identificar y conocer los fallos. Esto es, que para dominar nuestra planta y los sistemas para implantar esta técnica de RCM hay que identificar una a una las posibilidades de fallo de cada elemento o equipo, entendiendo por fallo el dejar de realizar las funciones requeridas o salirse de los márgenes de validez para el buque o el Armador.

Por tanto, el fallo funcional a localizar e identificar por el grupo de trabajo será aquel que impide la incapacidad de cualquier equipo o elemento físico para cumplir un estándar de funcionamiento. [2]

### 3.1.2 Proceso de implantación del RCM.

En la siguiente imagen se muestra el esquema de implantación del mantenimiento RCM. No se entra en detalles, ya que este trabajo se realiza con el objetivo de explicar la planificación FMEA.



**Fig. 2. Planificación del RCM**

Con esta información se cierra el capítulo del Mantenimiento RCM y se da comienzo a explicar el funcionamiento básico del FMEA, sus características y por qué se escoge para realizar este trabajo, ya mencionado en la Introducción. [2]

## **4. MATERIAL Y MÉTODOS.**

### **4.1 ANÁLISIS DE MODO DE FALLOS Y SUS EFECTOS (FMEA/AMFE).**

#### **4.1.1 Apéndice.**

En el presente trabajo se realiza una evaluación teórica y práctica documentada de las peculiaridades de las posibles anomalías de un motor propulsor de un buque, y más concretamente del sistema de alimentación de combustible de un motor dual; está enfocado a definir y estudiar las condiciones de fallo que puedan existir.

Como se desarrolla en el contexto de las técnicas organizativas de mantenimiento denominadas RCM, este análisis trata de evitar fallos en los procesos de mantenimiento, revisando de forma metodológica y sistemática los mismos y la experiencia acumulada. Es un medio esencial para lograr bucles de calidad, tanto a nivel de ingeniería de mantenimiento, como en la propia ejecución o producción de los trabajos, aprendiendo de anteriores desaciertos tras el análisis constructivo de los mismos sin ánimo de búsqueda de culpables sino de causas de errores, definiendo medidas correctivas y preventivas para que no se repitan.

Los análisis AMFE tienen muchas variantes según los sectores de que se trate; en todos ellos su desarrollo e implantación se basa en cuantificar y calificar los efectos inducidos por los fallos, priorizando las acciones según los niveles de riesgo que tienen sus repercusiones. La metodología AMFE es similar en todas sus variantes.

Más abajo se explicará el procedimiento de aplicación de un AMFE:

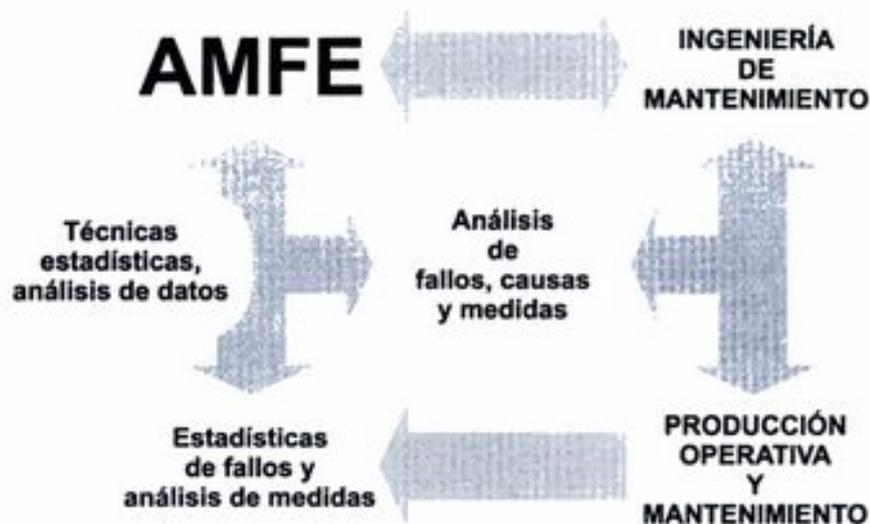
- Descripción de los principios básicos.
- Proceso de realización de un análisis.
- Identificación de los modos de fallos.

## 4.2 Descripción de los Principios Básicos.

### 4.2.1 General.

Los comienzos del AMFE parten de la segunda mitad de los años 1980, en la industria del automóvil y en la aeronáutica. Su objetivo fue analizar las fases de diseño o desarrollo de nuevos productos y los sistemas de puestas en marcha. Es evidente que su aplicación en mantenimiento precisa una cierta adecuación a las peculiaridades de esta actividad.

La implantación y estudios de fallos, causas y medidas correctoras y preventivas AMFE no pueden llevarse a cabo desde un departamento de ingeniería de mantenimiento ajeno a la realidad de la propia planta, de su entorno. Es necesaria la introducción de un método de trabajo basado en grupos de estudio que involucren a las diferentes áreas de la empresa.



**Fig. 3. Análisis de fallos FMEA**

Obviamente los análisis de fallos en mantenimiento mediante AMFE deben ser estructurados, plasmando su desarrollo y conclusiones en fichas e informes elaborados al efecto y que obliguen, tanto a los integrantes de grupos de trabajo como al coordinador que lo lidere, a reflejar de forma rigurosa y auditable sus conclusiones y las propuestas de soluciones correspondientes.

Estos análisis se fundamentan en "calificar" la importancia de los fallos mediante dos atributos: la criticidad y el origen del fallo.

La criticidad dependerá de sus repercusiones y de las probabilidades de que ocurra. Así, se califica esta criticidad con dos dígitos: el primero nos da idea de si es un fallo entre menor y catastrófico y el segundo aporta la probabilidad de su ocurrencia.

El siguiente punto de la clasificación dependerá del origen del fallo y de su contexto, mal uso, errores humanos inducidos, etc. Y analizará los factores de ingeniería asociados a la fatiga, el desgaste, falta de precisión del equipo de diseño, etc.

El equipo de trabajo AMFE debe esforzarse en aportar propuestas de medidas preventivas a acometer para que el fallo analizado no vuelva a producirse, como veremos más adelante al examinar el esquema y la forma de organizar la tabla de trabajo. [3]

#### **4.2.2 Principios y alternativas.**

El FMEA se basa en un solo concepto de fallo, bajo el cual cada sistema está considerado en varios niveles de la jerarquía funcional de un sistema, que se supone que falla por solamente una causa probable. Los efectos del fallo se analizan y clasifican según su gravedad, aunque tales efectos pueden incluir fallos secundarios en otros niveles. Cualquier modo de fallo que pueda causar efectos catastróficos debe ser protegido por la redundancia del sistema o del equipo, a menos que la probabilidad de tal fallo sea extremadamente improbable. Para los modos de fallo que causan efectos peligrosos, las medidas correctivas pueden ser aceptadas en su lugar. Debe establecerse un programa de prueba para confirmar las conclusiones del AMFE.

Mientras que el FMEA se sugiere como una de las técnicas más analíticas y mejor posicionadas para realizar, se acepta que hay otros métodos que pueden ser utilizados y que en ciertas circunstancias pueden ofrecer una visión igualmente completa a las particulares de fallo.

### 4.2.3 Objetivos.

El objetivo principal del FMEA es proporcionar una investigación exhaustiva, sistemática y documentada del sistema que establezca las peculiaridades del fallo del sistema de propulsión, dirección o generación de energía, como en este caso es el del motor propulsor de un buque. Debe evaluar asimismo cualquier otra solicitud del sistema por parte del Armador, y evaluar su importancia con respecto a la seguridad del buque y de su tripulación y pasaje.

Los principales objetivos del análisis son los siguientes:

- Proporcionar a los diseñadores de buques y sistemas datos para auditar sus diseños propuestos y mejorarlos.
- Proporcionar al Armador los resultados de un estudio sobre las características del fallo de los sistemas del buque, con el fin de mejorarlos.
- Proporcionar al Capitán y al Jefe de Máquinas datos para generar programas integrales de operación y mantenimiento.

Antes de proceder con un FMEA detallado en los efectos del fallo de los elementos del sistema es necesario realizar un análisis de fallo funcional de los sistemas considerados. De esta manera sólo los sistemas que fallan el análisis de fallo funcional deben ser investigados por un FMEA más detallado.

Cuando se lleva a cabo el examen de un sistema se deben considerar los siguientes modos operativos típicos, dentro de las condiciones ambientales de diseño de los buques: [4]

- Condiciones de navegación libre y a máxima potencia continua del propulsor.
- Velocidad máxima de en aguas congestionadas.
- Maniobras alongside.

### **4.3 Proceso de Realización de un Análisis.**

Proceso en el cual se explicará el funcionamiento básico del motor marino, y de las instalaciones referidas al motor Wärtsilä 50DF 12V. Se llevará a cabo el sistema de alimentación del motor marino, su modo gas, diesel y fuel.

#### **4.3.1 Motor Marino.**

Un motor es la parte de una máquina que es capaz de transformar un tipo de energía (eléctrica, de combustibles fósiles, etc.) en energía mecánica, capaz de realizar un trabajo.

En este caso, el motor Wartsila 50DF-12V Dual, de cuatro tiempos, es del tipo de combustión interna, ya que el combustible se quema dentro de la cámara de combustión del propio motor. Aunque cuando el motor funciona en Modo Gas (entiéndase gas combustible), la inyección de gas se genera fuera de esta cámara (indirecta). El gas se mezcla con aire en el conducto de admisión de aire, ingresando seguidamente en la cámara de combustión de cada cilindro.

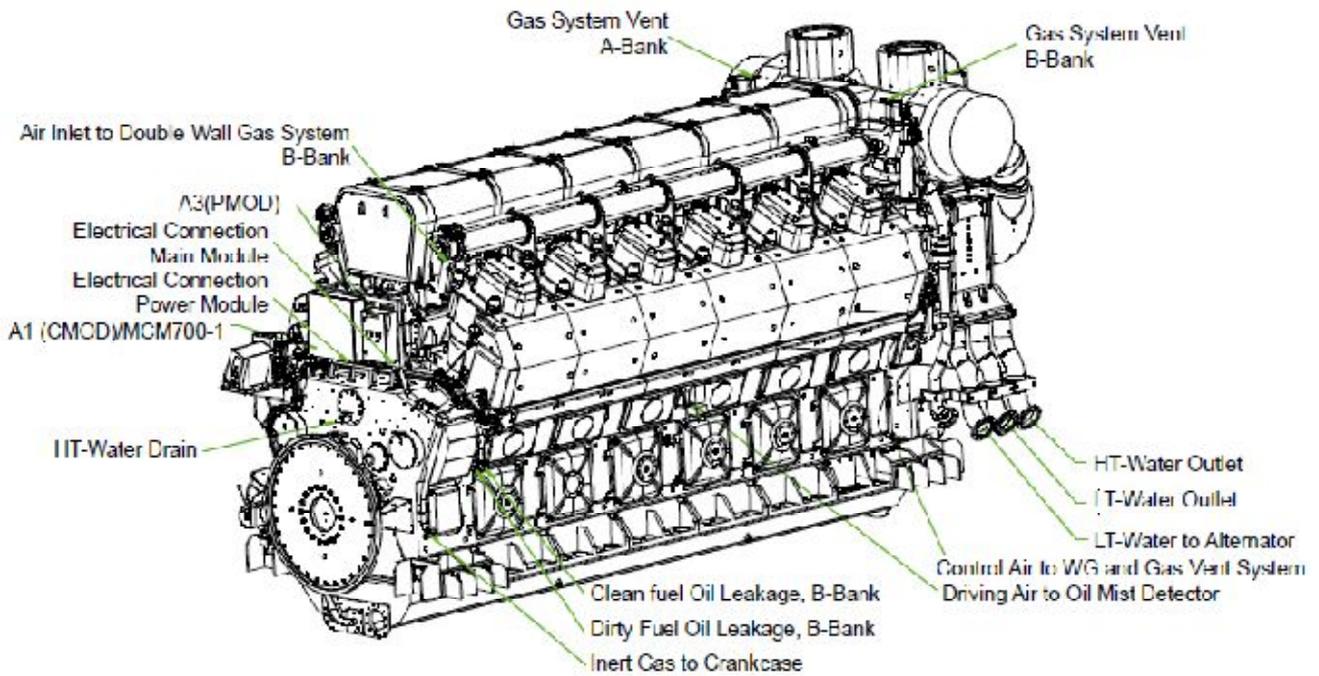


Fig. 4. Wartsila 12V-50DF, frontal

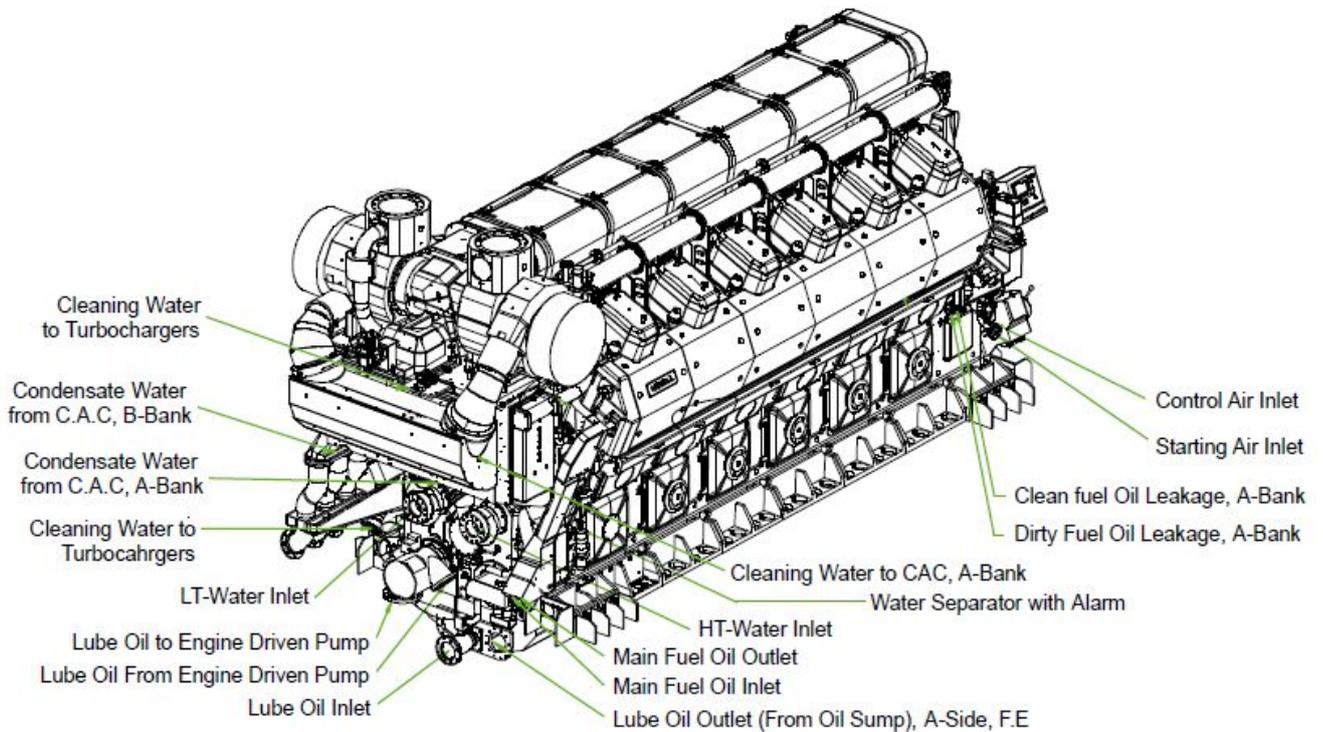


Fig. 5. Wartsila 12V-50DF, trasera

#### 4.3.2 Descripción básica del motor WARTSILA 50DF-12V DUAL 4T.

El motor dual Wartsila de la serie 12V50DF es de combustión interna, y cuando trabaja en modo gas el gas es inyectado a través de la válvula de gas en la admisión de aire (mezclado), y una vez ahí se inyecta en el cilindro.

Es un motor alternativo, de cuatro tiempos que puede funcionar en el ciclo Otto o bien mediante el ciclo Diesel. Cuando el motor consume HFO (Heavy Fuel Oil) se rige por el ciclo diesel, al igual que cuando se alimenta el motor con MDO (Marine Diesel Oil).

De esta manera el motor trabaja con las bombas de inyección y el sistema Common Rail para mantener la línea de combustible de entrada al motor presurizada, y un sistema de inyectores normalizado. Sin embargo, la línea de HFO, combustible mucho más viscoso, se calienta previamente con circuito de vapor (a unos 160 °C) para lograr una viscosidad conveniente.

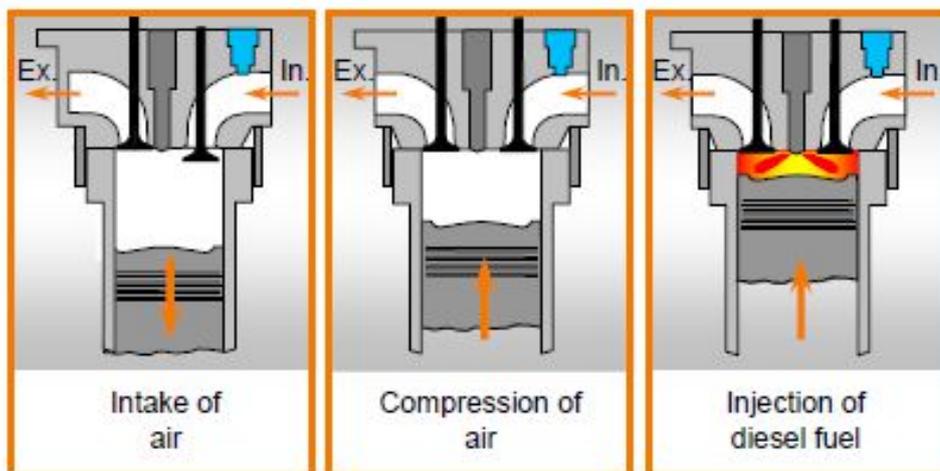


Fig. 6. Modo Diesel

Cuando está funcionando en modo Gas el motor trabaja según el ciclo Otto, aunque no hay bujía o dispositivo para generar chispa, existe otro sistema por el cual puede realizarse este ciclo de trabajo. La mezcla de aire y gas se realiza en la antecámara de admisión de aire, y seguidamente se inyecta en el cilindro para realizar la primera etapa del ciclo: compresión, y antes de alcanzar la máxima compresión del fluido el inyector "Piloto" realiza una pequeña inyección de MDO que al encontrarse en el seno de la mezcla con la temperatura debida a la presión, inflama el conjunto en el interior de la cámara de combustión y genera así un ciclo estándar de trabajo en ese cilindro.

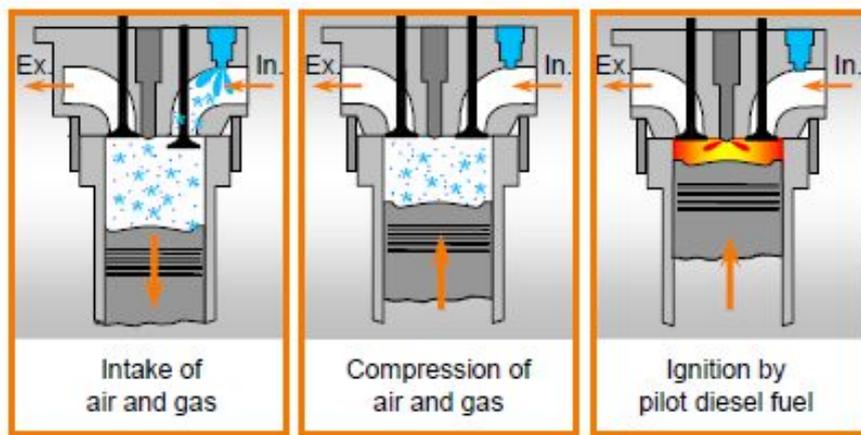


Fig. 7. Modo Gas

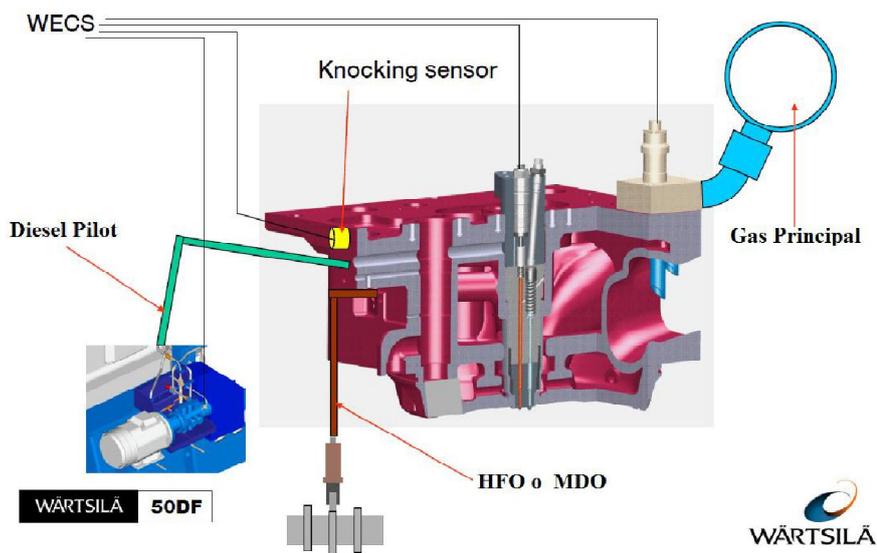


Fig. 8. Sistema de inyección

### 4.3.3 Sistema Auxiliar del Motor.

#### 4.3.3.1 Sistema de combustible.

Aunque en realidad tenga tres modos de operación, el motor puede trabajar según dos ciclos distintos. Puede funcionar con combustibles líquidos mediante el ciclo diesel en modo HFO o MDO, o bien mediante el ciclo Otto con un combustible gaseoso en modo Gas, como ya se ha expuesto anteriormente.

En el modo de Gas, el gas –gas natural, en nuestro caso–de baja presión se mezcla con el aire de barrido en el canal de entrada de aire en la culata. La mezcla es comprimida en el cilindro durante la carrera de compresión; el encendido se inicia con una pequeña cantidad de MDO piloto que se inyecta en la cámara de combustión. Funciona según el denominado sistema Common Rail, con una bomba de combustible acoplada y seguidamente a través del inyector.

En los modos HFO/MDO el combustible líquido se inyecta directamente en el cilindro al final de la carrera de compresión por medio de la bomba de inyección y el inyector. En estos modos de funcionamiento no se introduce gas en el cilindro, pero aun así el circuito de MDO piloto sigue inyectando líquido para evitar que los orificios de la tobera se obstruyan.

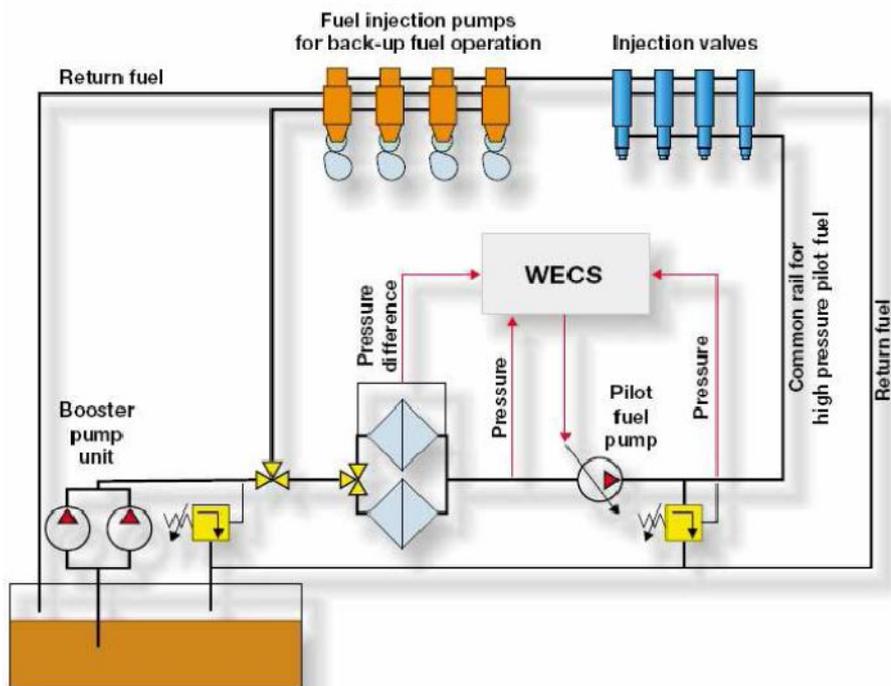


Fig. 9. Sistema de combustible

#### 4.3.4 Sistema de Combustible Diesel.

El combustible de un motor marino, ya sea HFO o MDO, normalmente llega al motor desde tanque de servicio diario. Para quemar ese combustible líquido en los motores existen unas unidades (Figura 10), que están instaladas entre el tanque de servicio diario y el propio motor.

Se les denomina unidades "Booster", y se componen de dos bombas de circulación que proporcionan al combustible una presión de unos cuatro bares y dos bombas de alimentación que elevan esa presión hasta alcanzar unos 10 bares; adicionalmente, la unidad posee filtros, válvulas y un sistema de regulación y control, ya sea en modo HFO o MDO.



**Fig. 10. Unidad de combustible. Unidad Booster**

Los circuitos de HFO están compuestos por entubaciones bien aisladas térmicamente y están dotados de líneas de calefacción con vapor a fin de mantener una temperatura adecuada en el combustible. Deben ser independientes al sistema de combustible ya que se tienen que poder dejar sin vapor en todo momento. Los cambios de combustible (HFO a MDO o viceversa), durante los cuales el motor sigue trabajando continuamente, deben hacerse de forma cuidadosamente gradual para evitar daños en el sistema de inyección debidos a cambios rápidos de temperatura (que puede causar agarrotamientos por dilatación o contracción)

Al salir de la unidad booster, el combustible pasa por unos filtros antes de llegar al circuito del motor, y seguidamente llega a las bombas de combustible, que son de tipo de pistón rotativo.

Los excedentes y las pérdidas limpias de combustible en bombas de inyección son reconducidos, a presión atmosférica, al circuito de combustible de baja presión.

El sistema de inyección de la bomba a la culata se compone de una tubería y una pieza de conexión en forma cónica que encaja en la lanza, que es la pieza que termina de llevar el combustible al inyector.

El sistema de MDO piloto es del tipo Common Rail. El circuito empieza en el tanque de MDO de servicio diario, pasa por un filtro, seguidamente a una bomba (a cuatro bares de presión) y a un enfriador. A la descarga del enfriador pasa por el filtro y la bomba de tornillo acoplada al cigüeñal del motor mediante un conjunto de engranajes que proporciona al combustible una presión de 900 bares.

La tubería del sistema Common Rail recorre los seis cilindros de cada bancada (bancada A y B), doce en total, y forma además las lanzas que van de cada culata al inyector. El sistema controla la inyección de MDO piloto electrónicamente, mediante una solenoide. Esto permite una mayor flexibilidad para mejorar los tiempos de inyección, ya sea en el tiempo de apertura o la presión para cada cilindro, y mejora en términos de consumo de combustible y emisiones.

En caso de producirse "knocking<sup>3</sup>" o "misfire<sup>4</sup>" el sistema permite reaccionar rápidamente e individualmente para cada cilindro y poder corregirlo, ya que puede ser un problema cuando el motor trabaja en modo Gas, y puede cambiarse automáticamente a modo MDO por seguridad.

---

<sup>3</sup>Knockingo golpeteo, llamado también "picado", es una combustión rápida y violenta de la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión del motor, la presión de los gases de combustión aumenta y puede llegar a romper los pistones.

<sup>4</sup>Es un fallo de encendido del motor que se produce a pesar de que la mezcla sea correcta y puede identificarse como un fallo de compresión o ignición.

#### 4.3.4.1 Sistema de Diesel Interno (MDF)

##### 4.3.3.4.1.1 Sistema de inyección principal de combustible.

El sistema principal de inyección de combustible está en uso cuando el motor está funcionando en modo diesel. Cuando el motor está funcionando en modo gas, el combustible fluye a través del sistema de inyección de combustible principal en todo momento, permitiendo así una transferencia instantánea al modo diesel.

El sistema de inyección de combustible interno del motor comprende el siguiente equipo para cada cilindro:

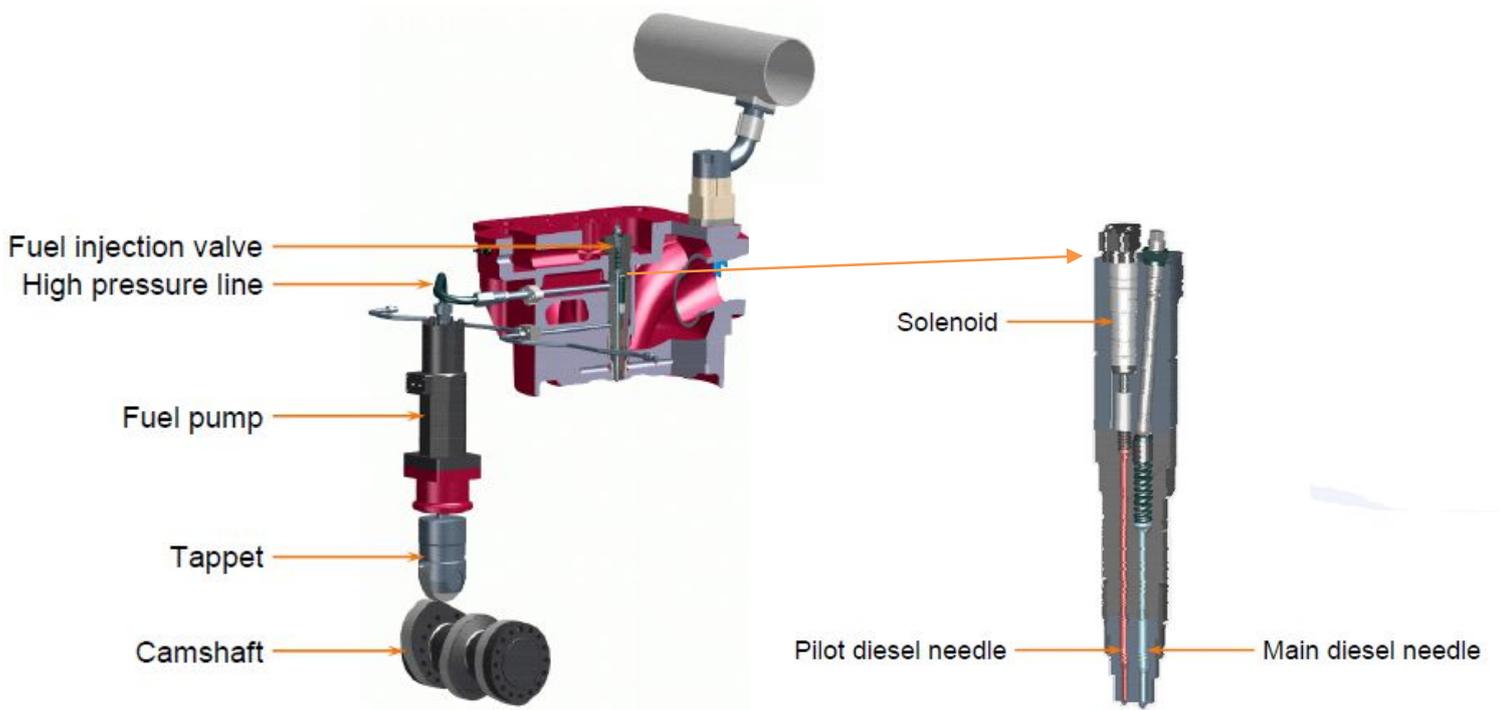
- Bomba de inyección de combustible.
- Tubería de alta presión
- Válvula de inyección de combustible gemela (para la inyección principal y la piloto)

El diseño de la **bomba de inyección de combustible** es del tipo mono-elemento diseñado para presiones de inyección de hasta 150 MPa. Las bombas de inyección tienen empujadores de rodillos incorporados, y también están equipados con cilindros neumáticos de parada que están conectados al sistema de protección contra sobrevelocidad.

La **tubería de inyección de alta presión** se sitúa entre la bomba de inyección y la válvula de inyección. El tubo es de doble pared y está situado dentro de la llamada *caja caliente* en el propio motor.

La **válvula de inyección gemela** es una inyección de diesel principal combinada, y una válvula de inyección de piloto de combustible, la cual está ubicada en la culata. La parte principal de inyección de diesel utiliza el diseño tradicional de agujas de carga.

La caja caliente incluye todos los equipos principales de inyección de combustible y tuberías del sistema, proporcionando la máxima fiabilidad y seguridad. El lado de alta presión del sistema de inyección principal está así completamente separado del lado de gas de escape y de los espacios del aceite lubricante del motor, por medidas de seguridad. Cualquier fuga en la caja caliente se recoge para evitar que el combustible se mezcle con aceite lubricante. Por la misma razón, las bombas de inyección también están completamente selladas del compartimento del árbol de levas. La línea de retorno de combustible está equipada con una válvula de control de presión.



**Fig. 11. Elementos del sistema de inyección**

#### 4.3.3.4.1.2 Sistema Piloto de inyección de combustible.

El sistema Piloto de inyección de combustible se utiliza para encender la mezcla aire-gas en el cilindro, cuando se opera en modo gas. El sistema piloto de inyección de combustible utiliza el mismo sistema de alimentación de combustible externo que el sistema principal de inyección de combustible. El sistema piloto se compone de los siguientes equipos:

1. Filtro piloto de combustible diesel.
2. Bomba Common Rail de alta presión.
3. Tubería del sistema Common Rail.
4. Válvula de inyección gemela de combustible (para cada cilindro).

El **filtro piloto** de combustible es una unidad dúplex de flujo total que evita que las impurezas entren en el sistema de combustible piloto. La finura del filtro es de 10  $\mu\text{m}$ .

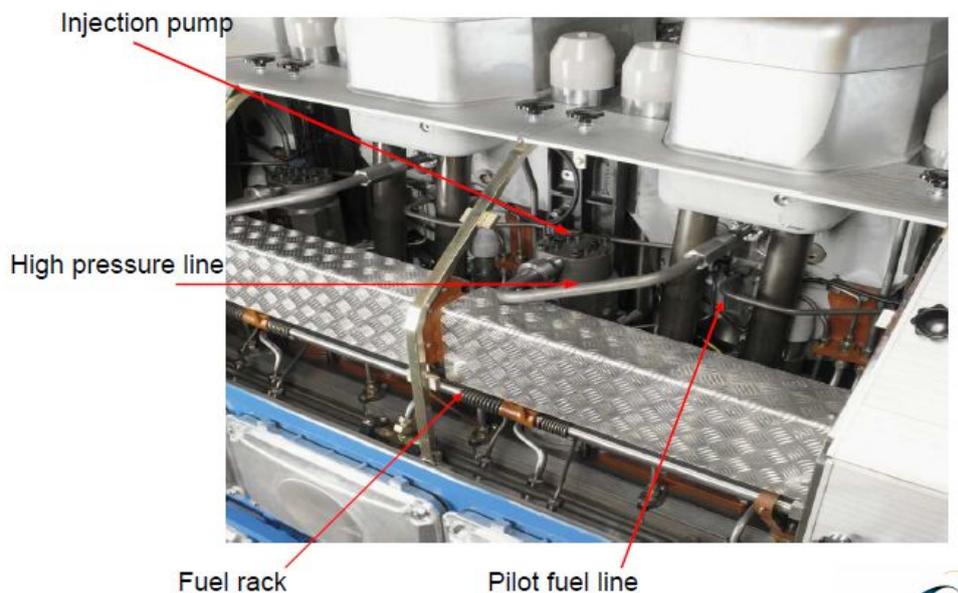
La bomba de combustible piloto de alta presión es de tipo pistón radial, accionada por un motor montado en el extremo libre del motor. La presión de combustible suministrada es controlada por el sistema de control del motor y es aproximadamente de unos 100 Mpa.

El combustible piloto presurizado se suministra desde la unidad de bombeo a tubo común de pequeño diámetro. La **tubería de Common Rail** suministra combustible piloto a cada válvula de inyección y actúa como acumulador de presión contra los impulsos de presión. La tubería de alta presión es de doble pared blindada y protegida dentro de la caja caliente. Las tuberías de alimentación distribuyen el combustible piloto desde el Common Rail a las válvulas de inyección.

La parte de inyección de diesel piloto de la válvula de inyección de combustible tiene una aguja accionada por una solenoide, que es controlada por el sistema de control del motor. El combustible diesel piloto se admite a través de una conexión de alta presión atornillada en el soporte de la boquilla. Cuando el motor funciona en modo diesel, la inyección del piloto está en funcionamiento, para mantener la aguja limpia.

Las pérdidas de combustible de las válvulas de inyección y de las bombas de inyección es drenado a presión atmosférica. Las pérdidas limpias de combustible pueden ser reconducidas al sistema sin tratamiento ninguno. La posible fuga de combustible no controlada y el agua y el aceite derramados se drenan por separado de la caja caliente y se llevarán a un tanque de fangos (circuito de combustible sucio).

El flujo de retorno del sistema piloto de combustible será devuelto al tanque de diario MDO. La caída de presión en la tubería puede ser de 80 kPa máximo, para asegurar el funcionamiento del equipo de combustible piloto.



**Fig. 12. Caja caliente**

#### 4.3.3.4.1.3 Bomba Piloto.

La bomba de combustible piloto es accionada mediante el motor. Recibe señal para la correcta presión de salida de combustible desde la unidad de control del motor y ajusta y mantiene independientemente la presión al nivel requerido. Transmite la presión predominante del combustible al sistema de control del motor.

El combustible de alta presión se suministra a cada válvula de inyección a través de un tubo del sistema Common Rail, que actúa como acumulador de presión y amortiguador contra los impulsos de presión en el sistema. El sistema de combustible tiene un diseño de doble pared con alarma para las posibles fugas.



**Fig. 13. Bomba Piloto**

#### 4.3.3.4.1.4 Bomba de inyección.

El motor Wartsila 50DF utiliza una bomba de inyección monobloque desarrollada por la propia Wartsila. Esta bomba resiste las altas presiones implicadas en la inyección de combustible, y tiene una válvula de alivio de presión constante para evitar la cavitación en la propia bomba. La bomba de combustible está lista para funcionar en todo momento, y cambiará de gas a fuel oil en caso de que sea necesario. El émbolo está equipado con un recubrimiento resistente al desgaste que la hace más duradera.



**Fig. 14. Bomba de inyección**

#### **4.3.4.2 Sistema de Diesel Externo.**

##### **4.3.4.2.1 Tanque de sedimentación (settling tank).**

Normalmente, el tanque de sedimentación está dimensionado para asegurar el suministro de combustible durante al menos 24 horas de funcionamiento, cuando está llenado al máximo. El tanque debe estar diseñado para proporcionar el efecto más eficaz de rechazo de lodos y agua condensada. La parte inferior del tanque debe tener una pendiente para asegurar un buen drenaje. No se necesitan bobinas de calefacción ni aislamiento en el tanque de sedimentación de MDO. La temperatura en el tanque de sedimentación de MDO debe estar entre 20 - 40 ° C.

##### **4.3.4.2.2 Bomba de alimentación, separador.**

Se recomienda el uso de una bomba de tornillo. La bomba debe estar separada del separador y accionada eléctricamente.

La bomba debe dimensionarse para la calidad real del combustible y el rendimiento recomendado a través del separador. Presión máxima de trabajo es de aproximadamente 0,5 MPa, y a una temperatura de 40°C.

##### **4.3.4.2.3 Precalentador (Preheater).**

Los combustibles con una viscosidad superior a 5 mm<sup>2</sup>/s (cSt) at 50°C necesitan precalentamiento antes del separador. Para MDO la temperatura de precalentamiento debe ser de acuerdo con las directrices que da el proveedor.

##### **4.3.4.2.4 Bomba de circulación**

La bomba de circulación mantiene la presión ante el motor. Se recomienda utilizar una bomba de tornillo como bomba de circulación. Una bomba en funcionamiento y otra bomba a modo de respeto, en stand-by. Se recomienda un máximo de dos motores por bomba.

#### **4.3.4.2.5 Tanque de pérdidas limpias.**

El combustible de pérdidas limpias es drenado de las bombas de inyección y puede ser reutilizado sin tratamiento ninguno. El combustible debe ser recogido en un tanque de combustible de fugas limpias y de allí ser bombeado al tanque de sedimentación. Los tubos del motor al tanque de drenaje deben estar situados de forma inclinada, para así drenar mejor las pérdidas limpias. Con el fin de evitar que la suciedad entre en el sistema las líneas de fugas deben conectarse a través de un sistema cerrado.

#### **4.3.4.2.6 Enfriador.**

El combustible se calienta cuando fluye a través del motor. La temperatura máxima del combustible (MDO) en la entrada de la bomba de alimentación no debe superar los 50°C. Además, la viscosidad del combustible antes del motor debe situarse entre los límites permitidos. La cantidad de calor transferido al combustible es de aproximadamente 4kW/cilindro a plena carga.

Para controlar bien la temperatura del combustible se puede requerir un enfriador de combustible en el circuito externo. El agua de más o el agua de enfriamiento de baja temperatura (LT) del motor pueden utilizarse como medio de intercambio de calor. El enfriador también puede actuar como un calentador en caso de que la temperatura del tanque sea baja.

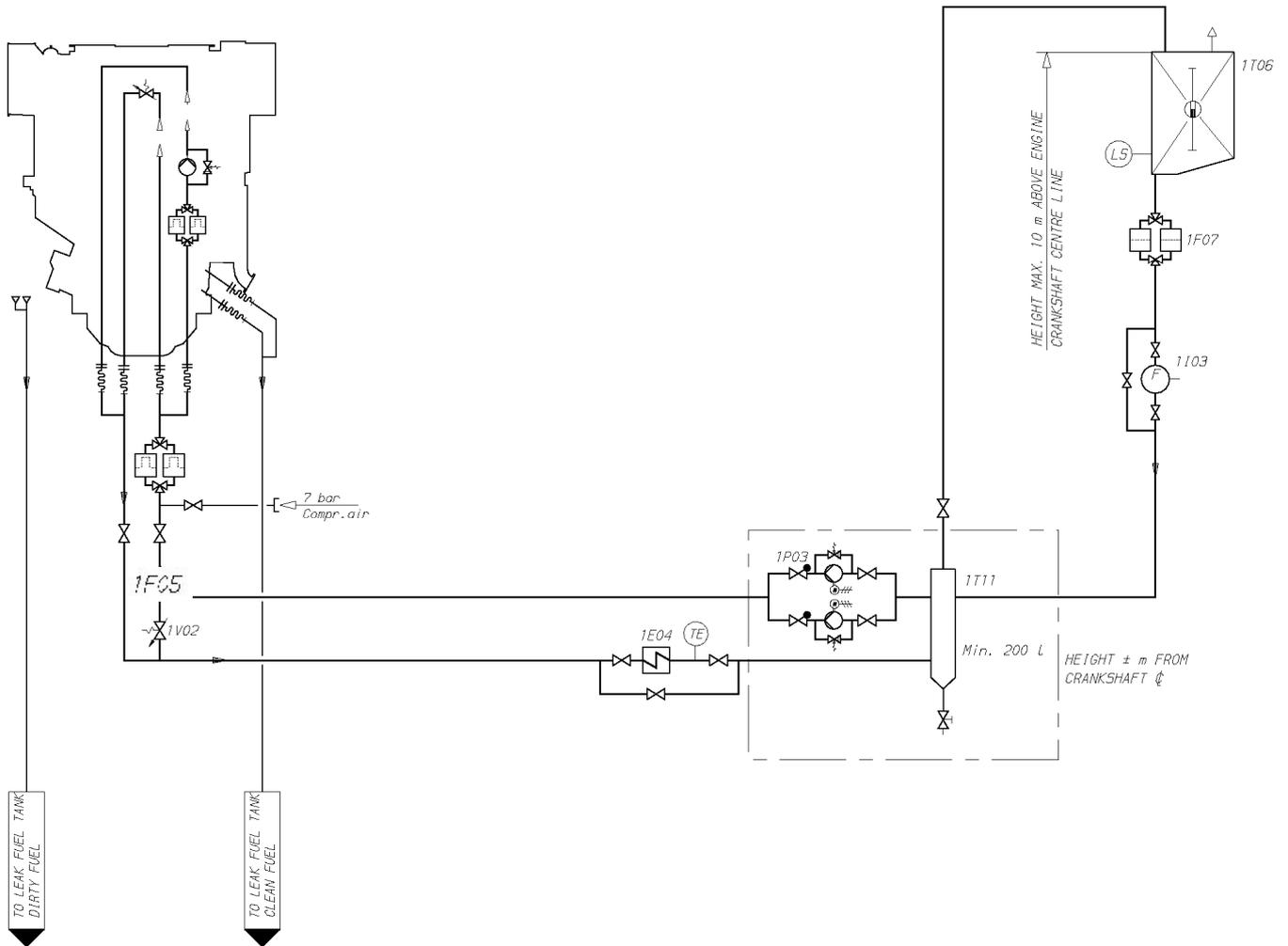


Fig. 15. Línea de Diesel

- 1E04 Enfriador (línea de retorno de MDF).
- 1F05 Filtro fino.
- 1F07 Filtro de succión.
- 1I03 Caudalímetro.
- 1P03 Bomba de circulación.
- 1T06 Tanque de diario.
- 1T11 Tanque de mezcla.

- 1V02 Válvula de control de presión.

#### **4.3.5 Sistema de Fuel Oil (HFO).**

El sistema de HFO básicamente se compone de los mismos elementos que el sistema de MDO. Existen pequeñas diferencias que se explicarán, aunque no se volverán a citar los elementos ya mencionados para el diesel. Sí que se puntualizará de la existencia de los elementos, y se expondrán en caso de tener alguna diferencia.

Un elemento muy importante en el sistema de HFO es el sistema de calefacción por vapor generado en las calderas. Ya que los tanques en los que se encuentra el HFO tienen que estar calefactados con vapor, para ser trasegado y fluir al motor. La elevada viscosidad del HFO haría inviable su trasiego en frío.

Para el bombeo de HFO, su temperatura en los tanques de almacenamiento (ubicados generalmente en el doble fondo del buque) debe mantenerse siempre entre 5 y 10 °C por encima de su punto de fluidez, que normalmente es de entre 40 - 50 °C. Los serpentines de calefacción se pueden diseñar para una temperatura aproximada de unos 60 °C, aunque el proyecto también depende mucho de la forma y volumen del tanque y de la cantidad de combustible que puede almacenar.

El diseño del sistema de combustible externo puede variar de barco a barco, pero cada sistema debe proporcionar combustible bien limpio con la temperatura y presión correctas a cada motor.

Cuando se utiliza combustible pesado es muy importante que el combustible elimine adecuadamente las partículas sólidas y la mayor cantidad posible de agua. Además del daño que el combustible con impurezas hará al motor, un alto contenido de agua puede dañar el sistema de alimentación de combustible. Para el sistema de alimentación deben utilizarse componentes bien probados y que garanticen su buen funcionamiento.

El sistema de tratamiento de combustible debe comprender al menos un tanque de sedimentación y dos (o más) separadores que garanticen suministrar al motor combustible suficientemente limpio. El dimensionado de los separadores de HFO es de la mayor importancia, y por lo tanto las recomendaciones del fabricante del separador deben ser seguidas de cerca.

#### 4.3.5.1 Sistema de fuel interno.

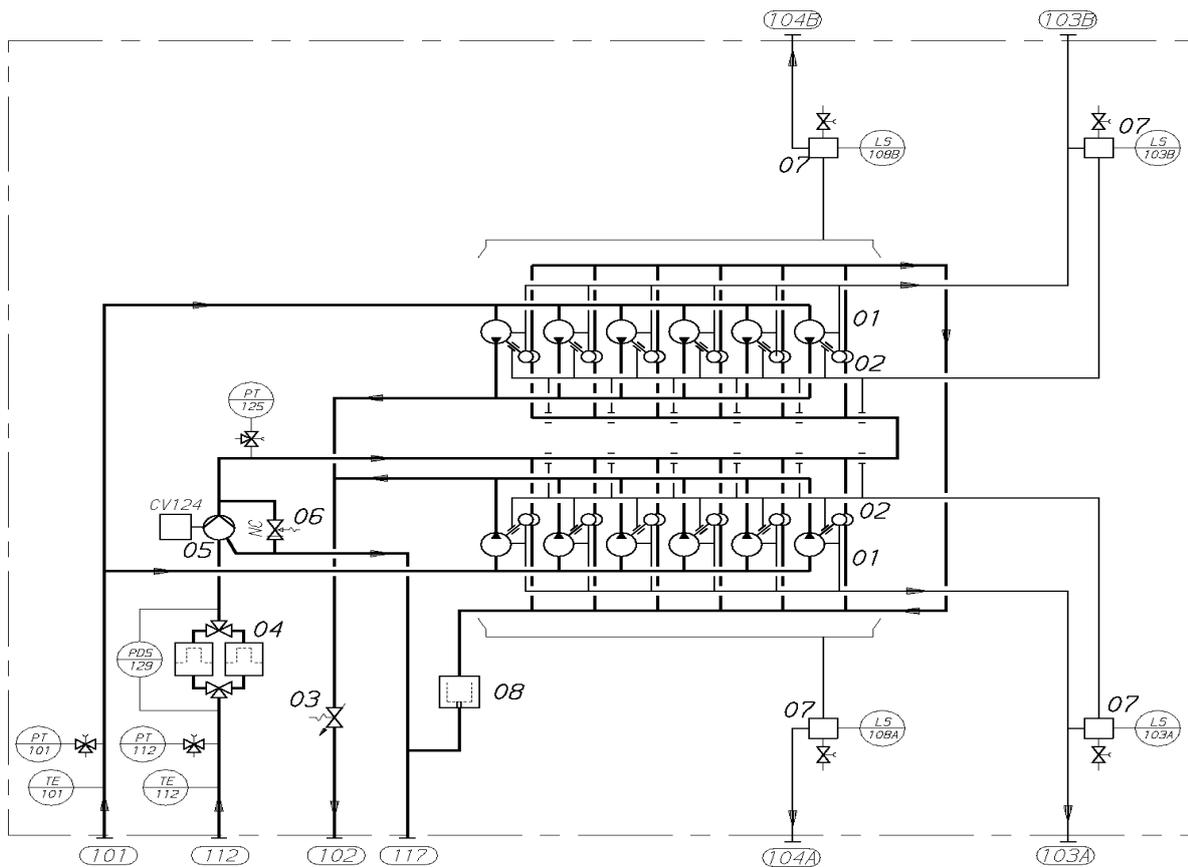
El sistema comprende los siguientes elementos:

- Bombas de inyección de combustible.
- Tubería de alta presión.
- Válvula de inyección gemela de combustible.

Las tuberías de combustible piloto (MDO) y de combustible principal (HFO) en el motor se mantienen separadas. No se permite que el HFO entre en el sistema piloto de MDO, ya que podría obstruir la tobera y parte del inyector piloto. El escape de combustible de las válvulas y bombas de inyección se drena a presión atmosférica (cleanleak fuel system). El combustible de pérdidas limpias puede ser recogido al sistema sin tratamiento. El escape de combustible no controlado y el agua y el aceite derramados se drenan de la caja caliente por separado y se conducen a un tanque de fangos (sucios).

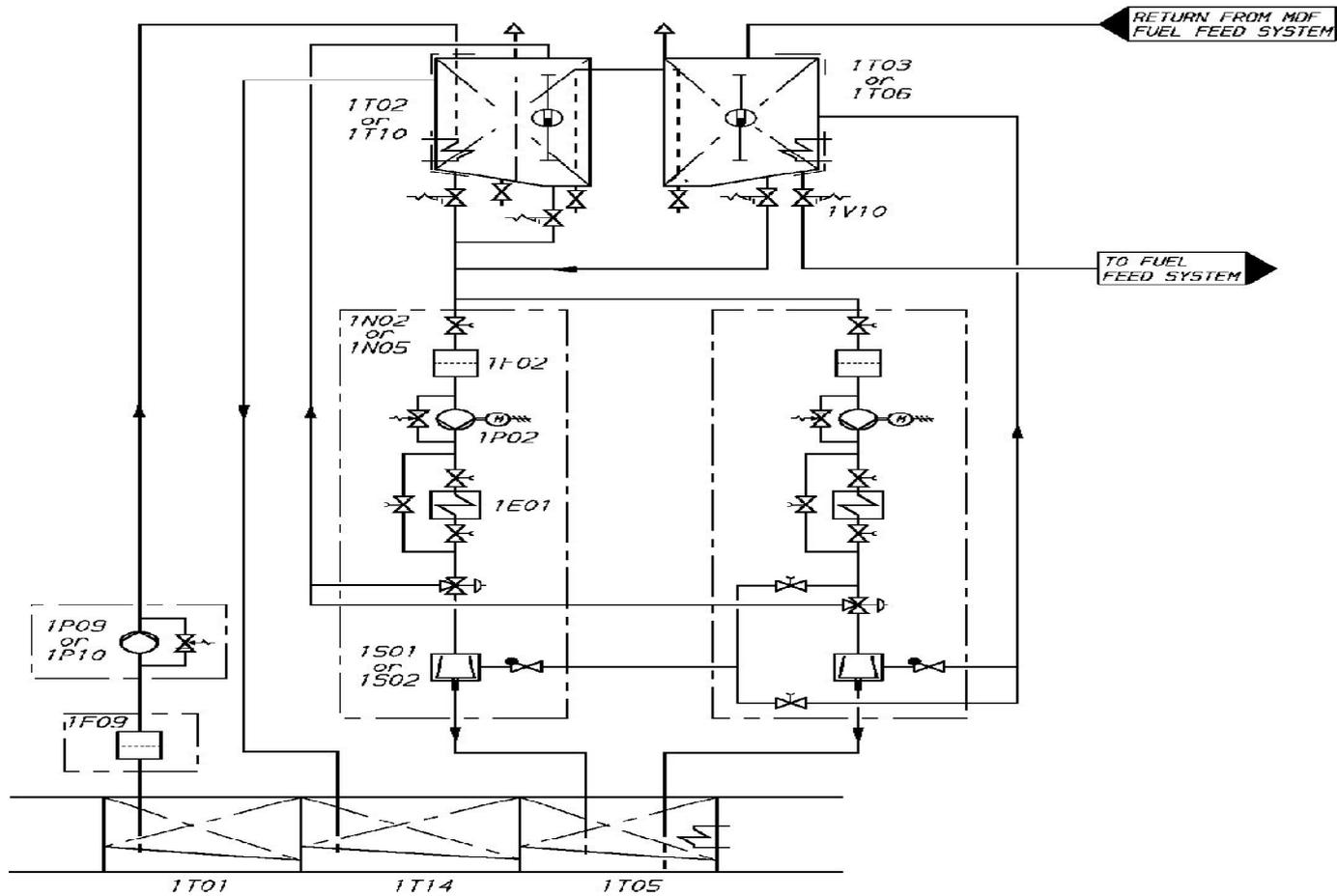
El sistema de inyección de las bombas funciona igual que en el circuito de MDO. Y para el inyector realizará la inyección normal, ciclo de diesel, aunque la inyección principal, es de HFO.

El sistema también consta de un sistema de tuberías de alta presión que ya ha sido explicado al tratar del ciclo MDO, por lo cual no se volverá a detallar aquí.



**Fig. 16. Inyección de Fuel**

- 01 Bomba de inyección.
- 02 Válvula de inyección piloto con solenoide y tobera.
- 03 Válvula de control de presión.
- 04 Filtro piloto.
- 05 Bomba piloto.
- 06 Válvula piloto de seguridad.
- 07 Colector de pérdidas.
- 08 Separador de agua.



**Fig. 17. Línea de fuel**

- 1N02 Unidades de separación (HFO).
- 1F02 Filtro de succión.
- 1P02 Bomba de alimentación.
- 1E01 Calentador.
- 1S01 Separador (HFO).
- 1N05 Separador (MDO).
- 1S02 Separador (MDO).
- Válvula de cierre rápido (depósito de combustible).

#### 4.3.5.2 Sistema de fuel externo.

##### 4.3.5.2.1 Calentadores de fuel.

En los buques destinados a funcionar con combustible pesado se deben instalar serpentines de vapor para calentamiento, como ya se ha explicado. Los elementos de los que se compone el sistema de almacenaje y trasiego de HFO son:

- Tanques almacén (generalmente en el doble fondo).
- Tanques de sedimentación y de servicio diario.
- Calentadores.
- Separadores de combustible.
- Módulos booster (los mismos que en el sistema MDO).

El requerimiento de calentamiento de los tanques se calcula a partir de las pérdidas de calor máximas del tanque y de la exigencia de elevar la temperatura en 1°C/h. Se puede suponer que la pérdida de calor es de 15 W/m<sup>2</sup> y °C entre los tanques y el forro del buque (en contacto con el mar), y de 3W/m<sup>2</sup> y °C entre tanques y cofferdams<sup>5</sup>. La capacidad calorífica del combustible se puede tomar como 2 kJ/kg y °C.

Las temperaturas del tanque de sedimentación o decantación están normalmente en el rango de 50 - 80 °C. Una potencia media de calefacción es de 12 kW para cada uno. El calentamiento de las tuberías de combustible aisladas requiere aproximadamente 1,5 W/m<sup>2</sup> y °C, calculado sobre el área externa total del tubo de combustible. Los separadores de combustible requieren típicamente 7 kW/motor por cada MW de potencia del propulsor, y las unidades de refuerzo, 30 kW/motor para idéntica potencia.

---

<sup>5</sup> Cofferdam: espacio vacío entre dos tanques.

#### **4.3.5.2.2 Modo de operación del separador.**

El combustible pesado (residuos y mezcla de residuos destilados) debe limpiarse en un eficiente separador centrífugo antes de entrar en el tanque.

Deben instalarse dos separadores, del mismo tamaño. La capacidad de un separador debe ser suficiente, para el consumo total de combustible. El otro separador (en stand-by) también debe poder estar en funcionamiento todo el tiempo. Se recomienda que los separadores convencionales con disco de gravedad estén dispuestos para funcionar en serie, el primero como purificador y el segundo como un clarificador. Esta disposición puede utilizarse para combustibles con una densidad de hasta  $991 \text{ kg/m}^3$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Los separadores con descarga controlada de lodos (sin disco de gravedad) que funcionan de forma continua pueden manejar combustibles con densidades superiores a  $991 \text{ kg/m}^3$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . En este caso, los separadores principales y el de stand-by deben estar en paralelo.

#### **4.3.5.2.3 Tanque de sedimentación.**

Normalmente, el tanque de sedimentación debe dimensionarse para asegurar el suministro de combustible durante un mínimo de 24 horas de funcionamiento, cuando se llene al máximo. El tanque debe estar diseñado para proporcionar el efecto más eficaz de rechazo de lodos y agua. El fondo del tanque debe tener pendiente para asegurar un buen drenaje. El tanque debe estar provisto de serpentín de calefacción y estar bien aislado.

Para asegurar la temperatura constante del combustible en el separador, la temperatura del tanque de sedimentación debe mantenerse estable. La temperatura en el tanque de decantación debe estar entre  $50$  y  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

El nivel mínimo en el tanque de sedimentación debe mantenerse lo más alto posible, y el tanque debe ser drenado manualmente varias veces al día. De esta manera, la temperatura no disminuirá demasiado al recibir el tanque nuevo combustible más frío.

#### 4.3.5.2.4 Pre calentador.

El pre calentador está dimensionado normalmente de acuerdo con la capacidad de la bomba de alimentación y con una temperatura dada del tanque de sedimentación.

La temperatura de la superficie del calentador no debe ser demasiado alta, para evitar el craqueo (cracking) térmico del combustible. La temperatura de pre calentamiento recomendada para el combustible pesado es de 98 °C. El calentador debe ser controlado para mantener la temperatura del combustible a  $98 \pm 2$  °C.

La capacidad mínima requerida del calentador es de:

$$P = \frac{m \times \Delta t}{1700}$$

Siendo:

P = Capacidad del calentador [en kW]

m = Capacidad de la bomba de alimentación del separador [en l/h]

$\Delta t$  = Aumento de temperatura en el calentador [en °C]

Para los combustibles pesados se puede usar  $\Delta t = 48$  °C; es decir, una temperatura del tanque de sedimentación de unos 50 °C.

Los combustibles con una viscosidad superior a 5,0mm<sup>2</sup>/s (cSt) a 50 °C necesitan pre calentamiento antes del separador. Los calentadores deben estar provistos de válvulas de seguridad con tubos de escape a un tanque de fuga (para que se pueda detectar la posible fuga).

#### 4.3.5.2.5 Separador de Fuel (HFO).

El separador de aceite de combustible debe dimensionarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del separador. Basándose en un tiempo de separación de entre 23 y 23,5 h/día, el servicio máximo por puesta del separador puede estimarse de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{P \times b \times 24}{\rho \times t}$$

Donde:

Q = Caudal [en l/h].

P = Potencia máxima continua del motor [en kW].

b = Consumo específico de combustible + 15% como margen de seguridad [en g/kWh].

$\rho$  = Densidad del combustible [en kg/m<sup>3</sup>].

t = Tiempo de separación diario para el separador autolimpiable [en h].

No se deben sobrepasar los caudales recomendados para el separador y el grado de combustible en uso. Cuanto menor sea el caudal, mejor será la eficiencia de separación.

#### **4.3.5.2.6 Sistema de alimentación de combustible.**

El sistema externo de alimentación de combustible tiene que ser hueco, para mantener el sistema piloto de combustible libre de HFO. El sistema de alimentación de combustible para fuel será del tipo presurizado para evitar la formación de espuma en las líneas de retorno y la evacuación en las bombas de circulación.

Las tuberías de combustible pesado deberán estar debidamente aisladas y estar equipadas con calefacción, si la viscosidad del combustible es de  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$  (cSt) a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  o superior. Debe ser posible apagar la calefacción de los tubos cuando se efectúa el cambio a MDO.

Cualquier disposición para cambiar el tipo de combustible durante el funcionamiento debe diseñarse para obtener un cambio suave en la temperatura y viscosidad del combustible. A través de un tanque mezclador. Al cambiar de HFO a MDO, la viscosidad en el motor debe ser superior a  $2,8 \text{ mm}^2/\text{s}$  (cSt) y no caer por debajo de  $2,0 \text{ mm}^2/\text{s}$  (cSt), incluso en condiciones transitorias cortas. En ciertas aplicaciones puede ser necesario un enfriador. El sistema de alimentación de combustible para la inyección piloto de combustible (MDO) tiene que estar activo en todo momento, tanto también cuando se opera en HFO.

#### **4.3.5.2.7 Calentador.**

El calentador está normalmente dimensionado para mantener una viscosidad de inyección de  $14 \text{ mm}^2/\text{s}$  (cSt). Para combustibles con una viscosidad superior a  $380 \text{ cSt}$  a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , la temperatura de entrada del motor no debe exceder los  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para evitar el craqueo (cracking) térmico del combustible, la temperatura de la superficie en el calentador no debe ser demasiado alta. La potencia superficial de los calentadores eléctricos no debe ser superior a  $1,0 \text{ W}/\text{cm}^2$ . La salida del calentador debe ser controlada por un viscosímetro. Como reserva puede instalarse un control de termostato.

El punto de ajuste del viscosímetro será algo menor que la viscosidad requerida en las bombas de inyección, para compensar las pérdidas de calor en las tuberías. La capacidad mínima requerida del calentador es:

$$P = \frac{m \times \Delta t}{1700}$$

Fórmula en la que:

P = Capacidad del calentador [en kW].

m = Consumo de combustible del motor, aumentado en un 20% [en l/h].

$\Delta t$  = Aumento de la temperatura del combustible, más elevada cuanto mayor sea su viscosidad [en °C].

Para compensar las pérdidas de calor de la instalación, la potencia teórica del calentador debería incrementarse; como referencia de este incremento se pueden utilizar los siguientes valores:

Fuel viscosity (mm <sup>2</sup> /s (cSt) at 50°C)	Temperature rise in heater (°C)
730	65 (80 in day tank)
380	65 (70 in day tank)
180	60 (60 in day tank)

**Fig. 18. Tabla de viscosidades y temperaturas**

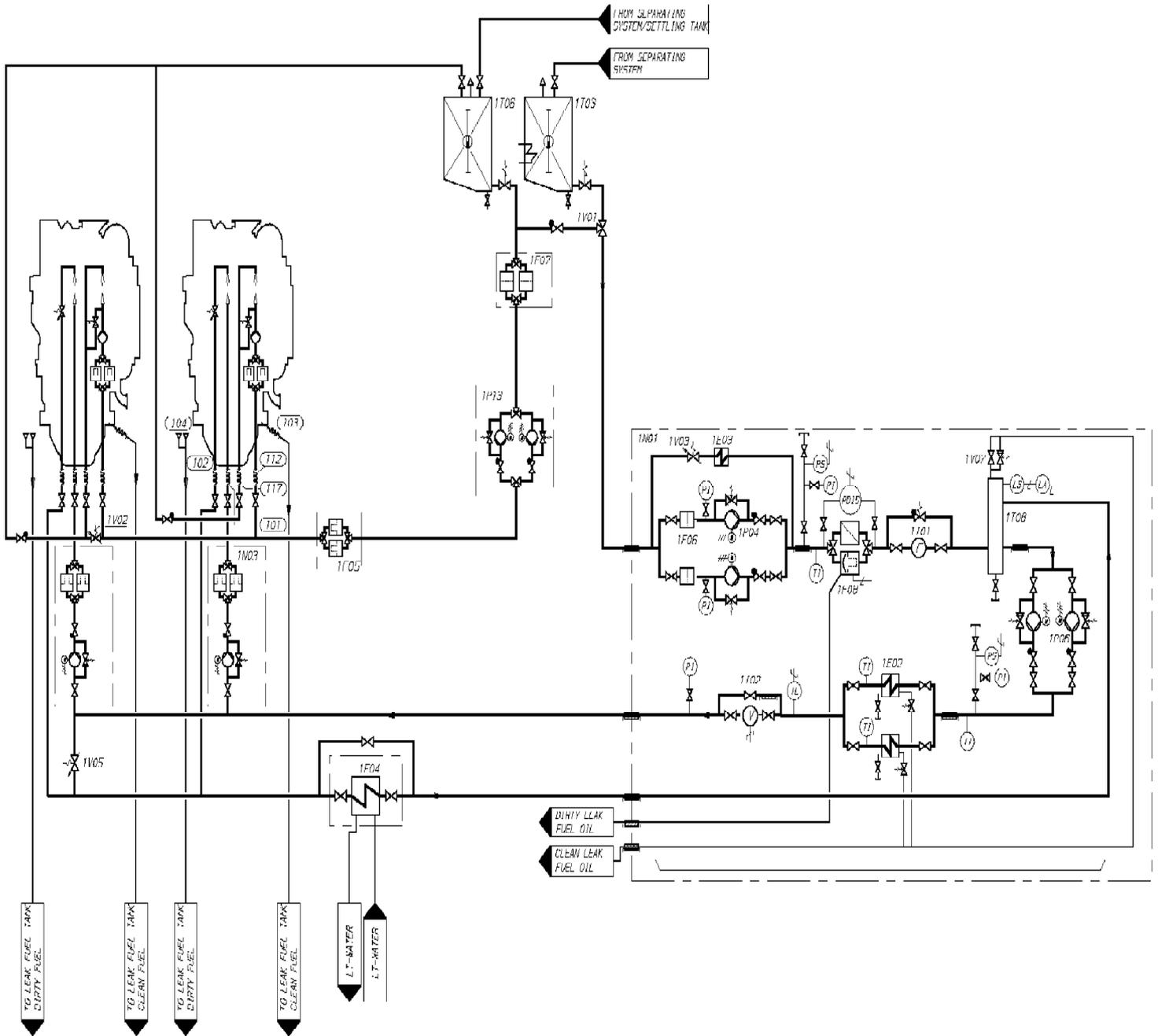


Fig.19. Línea de fuel y diesel

- 1E02 Calentador.
- 1E03 Enfriador.
- 1E04 Enfriador (retorno de MDO).
- 1F05 Filtro fino.

- 1F06 Filtro de succión.
- 1F07 Filtro (MDO).
- 1F08 Filtro automático.
- 1I01 Caudalímetro.
- 1I02 Viscosímetro.
- 1N01 Unidad Feeder/Booster.
- 1N03 Bomba y filtro (HFO/MDO).
- 1P04 Bomba de alimentación de fuel.
- 1P06 Bomba de circulación.
- 1P13 Bomba piloto de alimentación de fuel (MDO).
- 1T03 Tanque de diario (HFO).
- 1T06 Tanque de diario (MDO).
- 1T08 Tanque de desaireación.
- 1V01 Válvula de cambio.
- 1V02 Válvula de presión (MDO).
- 1V03 Válvula de control de presión.
- 1V05 Válvula de reboses (HFO/MDO).
- 1V07 Válvula de venteo.

#### 4.3.6 Sistema de Gas.

En este apartado trataremos el sistema de gas para el correcto funcionamiento del motor Wartsila 50DF-12V. Pues la característica principal de este motor es la posibilidad de utilizar como combustible la propia carga transportada en un buque LNG.

El sistema de gestión del gas (GMS), actúa de forma que mantiene la presión constante en los tanques de carga, siempre dentro de unos límites de funcionamiento normales. También incluye la función de seguridad automática, esta actúa en caso de que la presión del tanque exceda los límites de trabajo.

Durante el transporte de LNG por mar se genera vapor de gas, a causa de la transferencia de calor entre la mar y la propia atmósfera a través del aislamiento de los tanques. También se produce vapor de gas debido al propio movimiento del buque.

El vapor de gas se toma desde la línea de vapor y pasa por un separador de atmósferas y de ahí pasa al compresor Low Duty. Más adelante pasa por un calentador/enfriador, para llegar en condiciones óptimas y poder quemarlo en los motores.

La presión del tanque de carga se controla mediante el Natural Boil Off (NBO) del propio gas cargado, ya que va aumentando su temperatura y esto genera un Natural Boil Off que aprovecharemos mediante los compresores Low Duty, para comprimir ese gas y así poder quemarlo en los motores.

Los compresores Low Duty son los que mantienen la presión de gas de combustible constante para quemar en los motores Wartsila 50DF.

A continuación de estos compresores se instala una válvula de sobrepresión (de retorno al tanque de carga) controlada por el GMS, para evitar que haya alta presión del gas empleado como combustible en el motor Wartsila durante la reducción de la carga en este último.

En la eventualidad de que no exista suficiente NBO se utiliza el "Forcing Vaporiser", que genera Forced Boil Off (FBO). Este método es utilizado cuando en los tanques se debe mantener una presión reducida, o si el motor demanda más gas para aumentar su potencia.

Otro método de eliminar presión en los tanques sería quemar el gas en la GCU, sistema muy utilizado para liberar presión en los tanques; también se puede evacuar gas a la atmósfera, aunque es un método que entraña peligro.

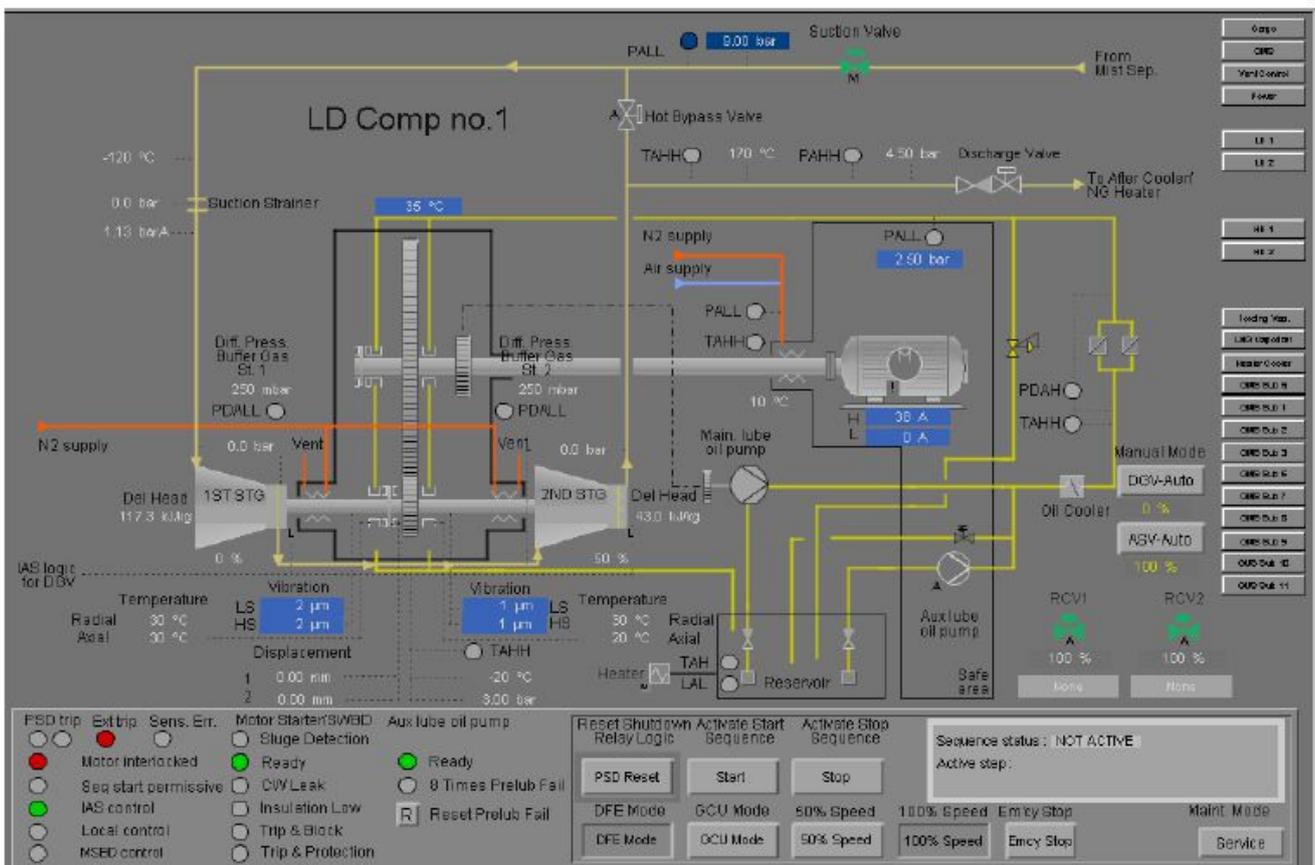


Fig. 20. Sistema de control de Low Duty

### **Sobrepresión.**

Para proteger los tanques de carga contra la sobrepresión debida al NBO, este gas tiene que o bien ser consumido por el motor propulsor, o ser quemado por la GCU, o ser enviado a la atmósfera por el venteo.

De las tres opciones señaladas, lógicamente, la que hay que procurar siempre es la primera, y en caso de que el Wartsila no pueda absorber más gas, quemar el excedente en la GCU.

Los compresores Low Duty suministrarán el gas natural proveniente de la ebullición natural (NBO) del gas al motor propulsor y a la GCU para usarlo como gas combustible. De esta manera se mantiene la presión estable.

Si el propulsor requiere menos gas combustible, es decir, si hay demasiado NBO y no se puede consumir todo, entonces la presión del vapor en los tanques aumentará, con los riesgos que ello conlleva. Para evitar el aumento de la presión se debe quemar el NBO sobrante por medio de la GCU.

### **Baja presión.**

Para proteger los tanques de carga y no provocar infrapresión respecto a la atmósfera, el propulsor Wartsila tendrá que operar en modo MDO. Si el NBO no fuese suficiente para abastecer el consumo del motor propulsor, se recurrirá a forzar la vaporización mediante el "Forcing Vaporicer" antes de cambiar al modo MDO. En caso de tener una baja presión en el colector de entrada a la GVU, el sistema de control cambiará automáticamente el modo de funcionamiento a MDO.

#### 4.3.6.1 Sistema de Gas Externo.

El gas usado como combustible normalmente puede estar almacenado como CNG a presión atmosférica o como LNG presurizado.

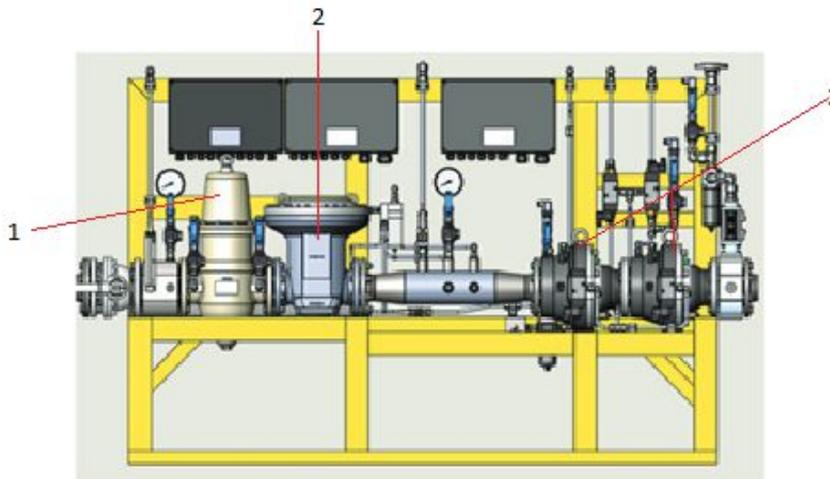
El diseño del sistema externo de gas puede variar, pero cada sistema debe proporcionar gas natural con temperatura y presión correctas a cada motor para su buen funcionamiento.

Sistema externo se denomina a la zona exterior del motor, como es la zona de Gas Valve Unit (GVU), la válvula master, compresores, etc.

##### 4.3.6.1.1 Gas Valve Unit (GVU)

También conocida como la unidad de válvula de gas (Figura 21). Antes de que se suministre gas al motor, este pasa a través de la unidad de válvula de gas (GVU), para ser tratado y filtrado. Incluye una válvula reguladora de presión de gas y una serie de válvulas de bloqueo y purga para garantizar un funcionamiento fiable y seguro del gas.

La unidad la forman una válvula de cierre manual, conexiones de purga, un filtro fino, regulador de presión de gas como combustible principal, válvulas de bloqueo de cierre, válvulas de ventilación, transmisiones de presión (medidores) y un transmisor de temperatura del gas.



**Fig. 21. Gas valve unit (GVU)**

1. Filtro de partículas.
2. Válvula reguladora de presión.
3. Shut-Off y válvula de venteo.

El **Filtro fino de partículas** protege el equipo de las impurezas. El filtro está equipado con un interruptor de presión diferencial que indica mediante alarma que está sucio. El punto de ajuste para la alarma es de 20 kPa, y el grado de filtración es de  $2\mu\text{m}$  con una separación del 98%.

La **Válvula reguladora de presión** de gas ajusta la presión de alimentación del gas al motor según la carga de este. El regulador de presión operado por el piloto es controlado por el sistema de control del motor a través de un convertidor presión/intensidad.

El sistema está diseñado para mantener en todo momento una presión constante en el sistema de "Common Rail".

La unidad de válvula de gas también está equipada con una válvula de cierre de seguridad (Shut-Off). La **válvula de cierre** está situada físicamente en la válvula de regulación de presión y protege al equipo de sobrepresión cerrando la entrada de gas en caso necesario. Solo se puede restablecer de manera manual.

La unidad de la válvula de gas realizará una comprobación de posibles fugas antes de cada puesta en marcha del motor. Esta es una precaución de seguridad para asegurar la estanqueidad de las válvulas y el correcto funcionamiento de los componentes.



Fig. 22. GVU

#### **4.3.6.1.2 Válvula Master.**

Para los transportes de LNG, el código IGC<sup>6</sup> (International Gas Carrier) de la OMI<sup>7</sup> (Organización Marítima Internacional) requiere que se instale una válvula de combustible principal en el sistema de alimentación de gas usado como combustible.

Para ello se requiere al menos una válvula maestra de gas, pero se recomienda aplicar una válvula para cada compartimento del motor que utilice gas, al objeto de permitir un funcionamiento independiente.

Siempre se recomienda tener una válvula principal de cierre fuera de la sala de máquinas.

#### **4.3.6.1.3 Venteo de Fuel Gas.**

En ciertas situaciones durante el funcionamiento normal del motor Wartsila DF, así como debido a ciertos fallos, es necesario ventilar con seguridad la tubería de gas de combustible.

Durante una secuencia de parada de una operación de gas del motor DF (es decir, parada estándar o parada de emergencia) las válvulas de ventilación de gas realizan una secuencia de ventilación para aliviar la presión en la tubería de alimentación de gas.

La pequeña cantidad de gas resultante de ello es enviada a la atmosfera en una zona donde no haya fuentes de ignición, con lo que no se genera ningún peligro de explosión.

En caso de que el motor DF se detenga en modo de operación de gas, la apertura de las válvulas de ventilación reducirá rápidamente la presión del gas a presión atmosférica.

La caída de presión de las líneas de ventilación debe mantenerse en un mínimo. Y las líneas de ventilación de un sistema de suministro de gas de los motores deben mantenerse separadas de otras líneas de ventilación.

---

<sup>6</sup>El Código IGC es un código Internacional OMI para la construcción y el equipamiento de buques que transporten gases licuados a granel.

<sup>7</sup>La OMI -Organización Marítima Internacional- es el organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques.

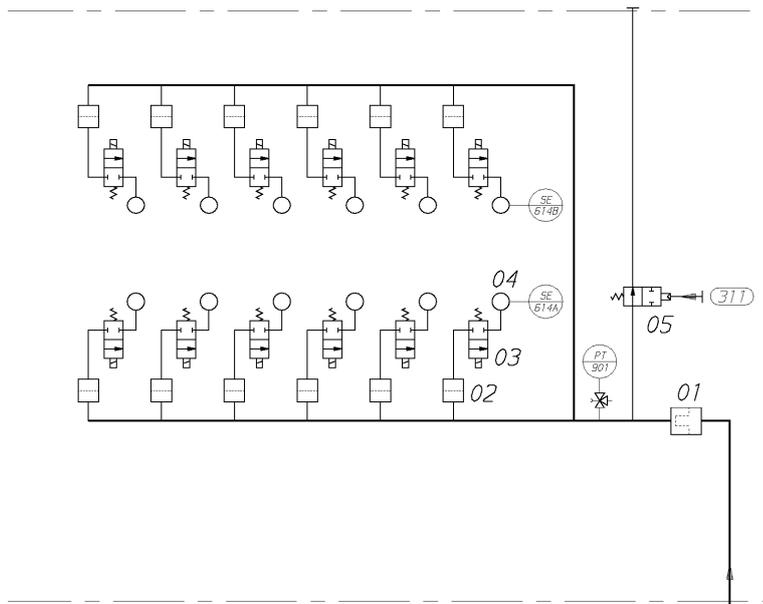
#### 4.3.6.2 Sistema de Gas Interno.

Cuando se arranca el motor en modo gas, este es inyectado a través de las válvulas de admisión de gas en la tubería de entrada a cada cilindro. El gas se mezcla con el aire de combustión inmediatamente (inyección indirecta) sobre la culata.

Puesto que la válvula de gas de acciona independientemente de la válvula de entrada, es posible que el barrido del cilindro arrastre inquemados de la inyección de gas.

El sistema de gas de combustible en el motor se compone de los siguientes equipos:

1. Filtro fino de gas.
2. Tubería de sistema de Common Rail de baja presión.
3. Válvula de admisión para cada cilindro.
4. Filtros de seguridad para cada válvula de gas.
5. Tubería de venteo del sistema Common Rail.



**Fig. 23. Sistema de gas interno**

1. Filtro de gas.
2. Filtro de seguridad.
3. Válvula de admisión de gas.
4. Cilindro.
5. Válvula de venteo.

#### 4.3.6.2.1 Sistema Common Rail.

El gas es suministrado a cada válvula de admisión por el conducto del sistema de Common Rail. El tubo del Common Rail es de pared simple y totalmente soldado, de un diámetro grande, y actúa también como un acumulador de presión. Las tuberías de alimentación distribuyen el gas combustible de la tubería común y a las válvulas de admisión de gas, situadas en cada cilindro, para así alimentar el motor en modo gas.

La válvula de ventilación de la tubería de gas del Common Rail se utiliza para liberar el gas, cuando el motor cambia del modo gas a modo MDO. La válvula es activada neumáticamente y controlada por el sistema del control del propio motor.

#### 4.3.6.2.2 Válvula de Admisión de Gas.

Las válvulas de admisión de gas (una por cada cilindro) se controlan electrónicamente y se accionan para alimentar a cada cilindro de forma individual y con la cantidad correcta de gas.

Las válvulas de admisión de gas son controladas por el sistema de control del motor para regular la velocidad y la potencia del motor. Las están situadas en la culata (en nuestro caso, dos bancadas de cilindros en V).

La válvula de admisión de gas es una electroválvula de accionamiento directo. Su posición de reposo es cerrada mediante un resorte (sellado positivo) cuando no hay señal eléctrica.

Con el sistema de control del motor es posible ajustar la cantidad de gas suministrada a cada cilindro, para equilibrar la carga del motor mientras el motor está funcionando.

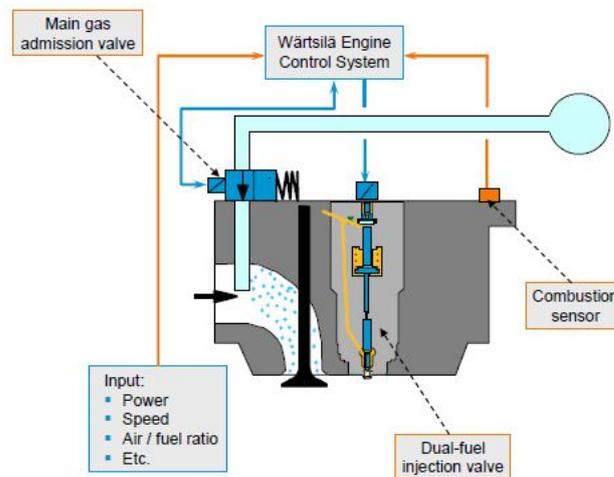


Fig. 24. Módulo de control de inyección de gas

#### **4.4 Identificar los Modos de Fallo.**

Se identificarán los modos de fallo, y como realizar las tablas correspondientes al FMEA.

##### **4.4.1 Procedimientos.**

Los siguientes pasos son necesarios para realizar un FMEA:

- Definir el sistema a analizar.
- Ilustrar la interrelación de los elementos funcionales del sistema mediante diagramas de bloques.
- Identificar todos los posibles modos de fallo y sus causas.
- Evaluar los efectos en el sistema de cada modo de fallo.
- Identificar las medidas correctivas para los modos de fallo.
- Evaluar la probabilidad de fallos que causen efectos catastróficos o peligrosos.
- Documentar el análisis.
- Preparar el informe de FMEA.

El primer paso en un estudio FMEA es realizar un detallado análisis del sistema a mantener, mediante el uso de dibujos y manuales de los propios equipos. Debe redactarse una descripción narrativa del sistema y sus requerimientos funcionales, incluyendo la siguiente información:

- Descripción general del funcionamiento y estructura del sistema.
- Relaciones funcionales entre los elementos del sistema.
- Límites aceptables de rendimiento funcional del sistema.
- Restricciones del sistema.

El siguiente paso es desarrollar un diagrama de bloques que muestre la secuencia de flujo funcional del sistema, tanto para la comprensión técnica de las funciones como para el funcionamiento del sistema, y para el posterior análisis. Como mínimo, el diagrama de bloques debe tener un desglose del sistema donde estén señaladas todas las entradas y salidas y los números de identificación por los cuales cada subsistema es referenciado; así como las redundancias y otras características de ingeniería que proporcionen medidas de seguridad.

#### **4.4.2 Modos de fallo.**

El modo de fallo es la forma en que se observa una anomalía en la instalación o equipo a analizar. Generalmente describe la forma en que ocurre el fallo o su impacto en el equipo o sistema. A modo de ejemplo se proporciona una lista de modos de fallos que no encontraremos más adelante expuestos en caso real del motor Wartsila (véase ejemplo de lista de modos de fallo).

Los modos de fallo enumerados pueden describir el fallo de cualquier elemento del sistema en términos suficientemente específicos. Cuando se utilizan junto con las especificaciones de rendimiento que rigen las entradas y salidas en el diagrama de bloques del sistema, se pueden identificar y describir todos los modos de fallo potenciales. Así, por ejemplo, una fuente de alimentación puede tener un modo de fallo descrito como pérdida de salida y una causa de fallo abierta (eléctrica).

Aunque se menciona el diagrama de bloques no será necesario confeccionar uno, pues la información procedente de las explicaciones teóricas descritas en el sistema es suficiente; el objeto del trabajo consiste en realizar un FMEA de la línea de alimentación de un motor marino.

**Tabla 2. Ejemplo de lista de modos de fallo**

<b>1-Fallo estructural</b>	<b>2- Válvula no abre o no cierra</b>
3-Fugas internas o externas	4-Fallo fuera de tolerancias
5-Falsa actuación	6-Fallo al arrancar o parar
7-Fallo de encendido	8-Pérdida de señal

#### **4.4.3 Efectos de fallo.**

La consecuencia de un modo de fallo en el funcionamiento, la función o el estado de un equipo o un sistema se denomina efecto de fallo. Los efectos de fallo en un subsistema o equipo específico bajo consideración se llaman efectos de fallos locales. La evaluación de los efectos locales del fallo ayudará a determinar la eficacia de cualquier equipo redundante o la acción correctiva en ese nivel del sistema. En ciertos casos puede no haber un efecto local más allá del modo de fallo propiamente dicho.

El impacto de un fallo del equipo o subsistema en la salida del sistema (función) se denomina efecto final. Se evaluará el efecto final y se clasificará su gravedad como catastrófico o peligroso (en mayor o menor grado).

#### **4.4.4 Detección del fallo.**

En general, el estudio del FMEA solo analiza los efectos de fallo en base a un único incidente habido en el sistema y, por lo tanto, en base a un solo medio de detección de fallo, tal como es un dispositivo de advertencia visual o de detección automática, instrumentación de detección y otros.

Cuando el fallo del elemento del sistema no es detectable y el sistema puede continuar con su operación específica, el análisis se ampliará a la determinación con el primer fallo indetectable, lo que puede dar como resultado un efecto de fallo más grave; por ejemplo, puede ser peligroso o catastrófico, como se ha catalogado anteriormente. [5]

#### 4.4.5 Beneficios de un FMEA.

La eliminación de los modos de fallos potenciales tiene beneficios tanto a corto como a largo plazo. A corto plazo representa ahorros de los costes de reparaciones, las pruebas repetitivas y el tiempo de paro. El beneficio a largo plazo es mucho más fácil de medir puesto que se relaciona con la satisfacción del Armador con el buque y con su percepción de la calidad operativa.

Por otro lado, apoya y refuerza el proceso de diseño ya que:

- Ayuda en la selección de alternativas del diseño.
- Incrementa la probabilidad de que los modos de fallos potenciales y sus efectos sobre la operación del sistema sean considerados durante el diseño.
- Proporciona una información adicional para ayudar en la planeación de programas de pruebas concienzudos y eficientes.
- Desarrolla una lista de modos de fallos potenciales, clasificados conforme a su probable efecto sobre el sistema.
- Proporciona un formato documentado abierto para recomendar acciones que reduzcan el riesgo.
- Identifica los modos de fallos conocidos y potenciales que de otra manera podrían pasar desapercibidos.
- Detecta fallos primarios, aunque a menudo mínimos, que pueden causar ciertos fallos secundarios.
- Proporciona un punto de vista novedoso en la comprensión de las funciones de un sistema. [6]

#### 4.4.6 Proceso de un FMEA.

Para la elaboración de un FMEA es necesario la revisión de los puntos que siguen; para juzgar los cuales son necesarias las tablas por las que se realiza el criterio de evaluación de la severidad, la frecuencia y la facilidad de detección de los fallos.

##### 4.4.6.1 Severidad.

El primer paso para analizar el riesgo es cuantificar la severidad o gravedad de los efectos. Dicha severidad se cuantifica en una escala del 1 al 10, siendo el nivel 10 el más severo. El equipo humano debe llegar a un acuerdo sobre un criterio racional de evaluación y un sistema de clasificación sensato. En la siguiente tabla se muestra un criterio de evaluación sugerido en el sistema de clasificación para la severidad de los efectos de un FMEA.

**Tabla 3. Criterio: Severidad del efecto**

<b>Efecto</b>	<b>Criterio: Severidad del efecto.</b>	<b>Nivel</b>
<b>Peligroso sin aviso</b>	La falla afecta la operación segura del equipo. Puede poner en peligro al operador. El fallo ocurre sin previo aviso.	10
<b>Peligroso con aviso</b>	El fallo afecta la operación segura del equipo. El fallo ocurre con previo aviso.	9
<b>Muy alto</b>	Interrupción mayor en la línea de producción. El fallo ocurre con previo aviso.	8
<b>Alto</b>	Interrupción menor en la línea. El equipo entra en operación en el siguiente turno.	7

<b>Moderado</b>	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en el mismo turno.	6
<b>Bajo</b>	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo opera con disminución de algunas funciones.	5
<b>Muy bajo</b>	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en poco tiempo.	4
<b>Menor</b>	Interrupción menor de la línea de producción. El equipo entra en operación en muy poco tiempo.	3
<b>Muy menor</b>	Sin interrupción de la línea de producción. Baja la eficiencia del equipo.	2
<b>Ninguno</b>	El modo de fallo no tiene efecto.	1

Los efectos son evaluados en conjunto cuando se cuantifica el riesgo, incluso cuando a dichos efectos se les asignen valores individuales de severidad. Se asume que todos los efectos se producirán cuando el modo de fallo ocurre. Por lo tanto, el efecto más severo tiene precedencia cuando se evalúa el riesgo potencial.

#### 4.4.6.2 Frecuencia de la Ocurrencia.

La ocurrencia es la probabilidad de que ocurra una causa particular y resulte en un modo de fallo durante la vida útil de un proceso. Es simplemente la probabilidad que una causa o mecanismo de fallo pueda ocurrir. A partir de definir la ocurrencia solamente como la probabilidad que el fallo ocurra, no hay manera de cuantificar la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo y de los subsecuentes efectos. La siguiente tabla presenta criterios para la evaluación de la ocurrencia de los fallos.

**Tabla 4. Frecuencia del Fallo**

Ocurrencia del Fallo	Frecuencia de Fallo.	Nivel
<b>Muy alta. Muy repetitiva</b>	Promedio mayor o iguala 10 por año.	5
<b>Alta: Fallo repetitivo</b>	Promedio mayor a 6 y menor a 10.	4
<b>Media. Fallo ocasional</b>	Promedio mayor a 3 y menor a 6.	3
<b>Baja. Pocos fallos</b>	Promedio mayor a 1 y menor a 3.	2
<b>Muy baja. Muy pocos fallos</b>	Promedio menor a 1 fallo por año.	1

#### 4.4.6.3 Facilidad de Detección.

La facilidad de detección indica la probabilidad de que se detecte la causa de un modo de fallo o el modo de fallo en sí mismo, previniéndolo o puenteadolo antes que alcance al sistema.

**Tabla 5. Probabilidad de detección por control de procesos**

<b>Detección</b>	<b>Criterio: Probabilidad de detección por control de procesos.</b>	<b>Nivel</b>
<b>Casi imposible</b>	No existen controles conocidos para detectar el modo de fallo o la causa.	10
<b>Muy remota</b>	Probabilidad muy remota de que los controles vigentes detecten el modo de fallo o la causa.	9
<b>Remota</b>	Probabilidad muy remota que los controles vigentes detectaran el modo de fallo o la causa.	8
<b>Muy baja</b>	Probabilidad muy baja de que los controles vigentes detecten el modo de fallo o la causa.	7
<b>Baja</b>	Probabilidad baja que los controles detecten el modo de fallo.	6
<b>Moderada</b>	Probabilidad moderada que los controles detecten el modo de fallo.	5
<b>Moderadamente alta</b>	Probabilidad moderadamente alta de que los controles detecten el modo de fallo o la causa.	4
<b>Alta</b>	Probabilidad alta de que se detecte el modo de fallo o la causa.	3
<b>Muy alta</b>	Probabilidad alta que los controles detecten el fallo o la causa.	2
<b>Detectable</b>	Los controles detectarán el modo de fallo. Detección muy fiable.	1

#### 4.4.6.4 Determinación del número de prioridad del riesgo.

El número de prioridad de riesgo (Risk Priority Number, RPN) es un coeficiente adimensional que indica la probabilidad de que suceda un determinado fallo, anomalía o incidente en una instalación industrial.

El RPN es el resultado del producto matemático de otros tres coeficientes dimensionales, que proceden respectivamente de asignar un valor numérico a cada una de las siguientes variables de incidentes anteriormente registrados:

- Severidad (S). Indica la gravedad de la avería.
- Ocurrencia (O). La frecuencia con que ha sucedido.
- Detección (D). La facilidad con que se ha detectado el fallo.

Las tres variables se catalogan en números enteros en una escala del uno al 10, donde el 10 representa el caso más adverso, como ya se ha explicado anteriormente.

O sea, que el RPN es:

$$RPN = S \times O \times D$$

Este número RPN, que puede variar entre 1 y 1.000, no es un indicativo exacto y seguro sino solamente una ayuda o guía para identificar los riesgos más serios y para preparar la correspondiente acción correctiva. [7]



## 5. RESULTADOS

### 5.1 Análisis del Sistema de Modo de Gas.

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN	
Sistema de combustible, modo Gas  Disparo del modo Gas  El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO	Baja presión de gas.  PT 901	Filtro de gas	6	Obstruido o filtro sucio	1	No hay	1	6	
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		Compresor LD	10	Fallo eléctrico	1	No hay	9	90	
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		Disparo de señal ESDS (emergencia)	2	Mantener gas en la carga NBO/FBO	8	160			
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		Alta temperatura	3	Revisar el enfriador	3	90			
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Mistseparator	5	Filtro obstruido	2	No hay	1	10			
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Bomba de fuel gas	10	Fallo eléctrico	1	No hay	8	80			
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Válvula de succión	10	Válvula pegada	1	Revisión previa	9	90			
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
No hay suficiente gas en los tanques	9	No hay posibilidad de trabajar en modo Gas	1	Al no existir carga, no hay posible combustión de gas en los motores	1	9			

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas  Disparo del modo Gas  El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO	Baja presión de aire de instrumentación	Compresor de aire de control	6	Fallo mecánico, rotura de cojinete, etc.	2	No hay. Rotura natural por desgaste	6	72
				Falta de aceite en el compresor	4	Revisar y proceder al llenado del cárter	2	48
		Filtros de toda la línea, filtro de partículas, humedad, etc.	6	Aire no muy seco, humedad y suciedad	1	Máxima limpieza, tratamiento del aire	1	6
		Línea de tuberías	6	Suciedad en el aire del compresor, corrosión en la tubería por causa de la humedad	1	Tratar de secar y limpiar el aire lo máximo posible	1	6

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas	Alta temperatura del aire de carga	Fallo en el compresor de aire de servicio	6	Temperatura ambiente (entrada al compresor) muy alta.	2	Enfriar el aire de entrada al compresor. Refrigeración	5	60
Disparo del modo Gas				Nivel de aceite en el compresor muy bajo	2	Mantener el nivel de aceite correcto, revisar pequeñas pérdidas	4	48
El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO				Válvula termostática rota (falla)	2	Fallo electrónico	5	60

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas  Disparo del modo Gas  El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO	Diferencia de presión entre el gas y el aire de alta presión	Filtro de seguridad, entrada a la válvula de admisión	8	Suciedad en la línea de admisión	1	Mantener la línea de gas completamente limpia, tratarla y limpiarla	4	32
		Válvula de gas MFI (MainFrecuenceInyección)	9	Mal uso de funcionamiento. Si se mantiene mucho tiempo abierta la mezcla es demasiado rica para quemar en el cilindro, y si está demasiado cerrada, la mezcla es muy pobre	3	Falla por desgaste natural	7	189
		Aire húmedo	5	Fallo en los dryers (secadores de aire), fallo de PLC, fallo de control, tubería obstruida, etc.	2	Mantener la entrada de aire a los dryers constante, no cerrarlas por posible futura obstrucción y oxidación de las tuberías	6	60

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas  Tripeo del modo Gas  El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO	Desviación de los gases de escape	Turbina	9	Holgura en el eje	1	Buena lubricación, evita desgastes	6	54
		Cilindros	8	Válvula de escape no abre del todo, genera inquemados en el cilindro, aumenta la suciedad dentro, toberas sucias, inyectores, etc.	2	Cambiar la válvula de escape, y que el modo de inyección sea el óptimo.	5	80
		Colector de agua condensada	8	Puede estar obstruido, o no elimina el exceso de agua, lo cual entra en el cilindro y al explosionar y tener agua genera inquemados, gases de escape sucios, y arrastra el fallo	2	Posible obstrucción de los conductos de drenaje.	5	80

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas	Desviación de los gases de escape	Air cooler (enfriador de aire)	6	Temperatura demasiado elevada en la entrada del enfriador, o suciedad y conductos atascados	2	Mantener el enfriador limpio y drenado, ya que arrastra elevados fallos	5	60
Tripeo del modo Gas		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO		Compresor	6	No da carga suficiente	3	Pequeña pérdida en el compresor, fuga, o posible desgaste en cojinetes	5	90
				No levanta presión	3	Posible obstrucción de la válvula de admisión	5	90

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas	Alta temperatura de los gases de escape	Aumento de temperatura en el proceso, pudiendo hacer sobrecalentar la línea, y sus elementos	6	Alta temperatura en el ambiente	2	Poder refrigerar el aire de entrada, para cuando la T <sup>a</sup> es elevada	2	24
Tripeo del modo Gas		Compresor	6	Línea de aceite obstruida, suciedad en el cárter	2	Renovar el aceite, posible falla mecánica	5	60
El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO		Cilindro	6	Mucha carga en el cilindro (combustión), aumento de temperatura por sobrecarga del motor	3	Mantener la carga del motor estable, no superar el 100% de carga	5	90

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas	Inyección de gas y carga máxima del motor (Relación air-fuel)	Regulador P/I Reguladora de aire	9	Fallo electrónico, no se puede testear la válvula de gas (procedimiento de seguridad)	2	No hay	3	54
Tripeo del modo Gas		Termostato de alta temperatura de los gases de escape	9	Fallo por sobre-temperatura	1	Control de los gases de escape y la combustión en los cilindros	3	27
El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO								

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas.	Tripeo de la válvula de seguridad GVV (Gas valveunit)	Válvula de corte de gas	9	Electrónica	1	Protocolo de seguridad para el arranque	2	18
Tripeo del modo Gas.		Filtro de partículas	7	Obstruido, sucio	1	Limpieza de la línea de gas	2	14
El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO.		Válvula reguladora	7	Rotura del diafragma	1	Realizar mantenimiento	2	14

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas.	Fallo de la señal del motor WECS (Wartsila Electronic CommunicationSystem)	Fallo de comunicación, no hay señal en el control del motor	10	Electrónica	1	No hay	8	80
Tripeo del modo Gas.	Potencia del motor por debajo del 15%	Válvula de admisión de gas, tripea el motor	9	Desgaste	2	Reemplazar	8	144
El motor pasa a funcionar en modo diesel. MDO.	Golpeteo (knocking)	Rotura del cilindro	8	Inquemados en la cámara de combustión. Aumenta la Tª debido a las explosiones internas	3	Reemplazarel ementos de admisión de gas	8	192

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible, modo Gas  Tripeo del modo Gas  El motor pasa a funcionar en modo diesel MDO	Tripeo de la válvula de seguridad GVV (Gas valve unit)	Válvula de corte de gas	9	Electrónica	1	Protocolo de seguridad para el arranque	2	18
		Filtro de partículas	7	Obstruido, sucio	1	Limpieza de la línea de gas	2	14
		Válvula reguladora	7	Rotura del diafragma	1	Realizar mantenimiento	2	14

### 5.2 Análisis del Sistema de Modo de Diesel (MDO).

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
<p>Sistema de combustible modo diesel(MDO)</p> <p>En caso de fallo del modo diesel el motor para por completo, lo cual es una falla grave</p>	<p>Fallo de presión en el sistema de inyección de la piloto</p>	Bomba de inyección	8	Atascada, no inyecta combustible	3	Mantener el combustible a temperatura indicada y limpio	4	96
		Válvula de control de presión	7	Rota, fallo electrónico	3	No hay	5	105
		Filtro piloto	4	Obstruido por suciedad	4	Mayor limpieza del combustible	2	16
		Tobera del inyector	9	Sucia, recubierta de hollín	3	Mejorar la relación de compresión	6	162
		Common Rail	8	Tubería dañada, perdida de presión	2	Mantener la línea presurizada	3	48
		Bomba piloto	8	Atascada no inyecta combustible	3	Realizar las tareas de mantenimiento oportunas para su buen funcionamiento	4	96

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
<p>Sistema de combustible modo diesel (MDO)</p> <p>En caso de fallo del modo diesel el motor para por completo, lo cual es una falla grave</p>	<p>Fallo sistemas generales del modo diesel (MDO)</p>	Tanques de diario vacío	10	No hay diesel en el tanque de combustible	1	Mantener el tanque con combustible	1	10
		Unidad booster	8	Bombas de circulación en modo fallo	2	Realizar el mantenimiento o preventivo	3	48
				Válvulas de tres-vías bloqueadas	1	Tarjetas Electrónicas	2	16
		Purificadora de diesel	7	Fallo mecánico o eléctrico	1	Realizar limpieza y mantenimiento	2	14
				Bomba de circulación falla	1	Realizar mantenimientos	2	14
				Bomba de alimentación	6	Tubería de alimentación obstruida, atascada	2	Limpieza del combustible, para evitar suciedades etc.

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
<p>Sistema de combustible modo diesel (MDO)</p> <p>En caso de fallo del modo diesel el motor para por completo, lo cual es una falla grave</p>	<p>Fallo sistemas generales del modo diesel (MDO)</p>	Sistema de admisión Fuga de combustible	10	Válvulas rotas	3	Mantenimiento correctivo	5	150
		Inyectores Suministro deficiente o irregular de combustible	10	Desgaste o Mala calidad del combustible	7	Mantenimiento correctivo	3	210
		Bomba de inyección	9	Desgaste o Humedad en el ambiente	2	Mantener calibrada la válvula reguladora de presión, mantener la bomba lubricada y el combustible libre de alto porcentaje de agua	5	90
		Filtro de aire	9	Motor no arranca Combustión incompleta Falta admisión de aire	3	Inspección visual, Purga de la línea	6	162

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN	
<p>Sistema de combustible modo fuel (HFO)</p> <p>En caso de fallo del modo fuel el motor pasa al modo diesel, por seguridad</p>	<p>Fallo sistemas generales del modo fuel (HFO)</p> <p>Unidad de separación</p>	<p>Cilindros</p> <p>La mezcla de aire combustible contiene agua</p>	8	<p>Separador de agua obstruido, no ejerce</p>	2	<p>Realizar el mantenimiento o al separador</p>	3	48	
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		<p>Purificadoras de fuel.</p> <p>Knocking en los cilindros</p>	7	<p>Fallo mecánico o eléctrico</p>	1	<p>Realizar limpieza y mantenimiento o</p>	2	14	
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		<p>Bomba de circulación falla</p>	7	<p>Realizar mantenimiento o</p>	2	14			
<p>Tobera de los inyectores</p>	6	<p>Obstruida o sucia</p>	2	<p>Mejora de la combustión y combustible más limpio</p>	4	-	48		
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
<p>Inyector</p>	7	<p>Desgaste del propio elemento</p>	1	<p>Realizar limpieza y mantenimiento oportunos</p>	3	21			

### 5.3 Análisis del Sistema de Modo de Fuel (HFO).

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible modo fuel (HFO)  En caso de fallo del modo fuel el motor pasa al modo diesel, por seguridad	Fallo sistemas generales del modo fuel (HFO)	Bomba de combustible	9	Cremallera atascada, no inyecta combustible a los inyectores	2	Engrasar las bombas y revisar los mecanismos	2	36
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		Bomba de circulación de fuel	6	Atascada, fuel demasiado pesado.	2	Mantener caliente el fuel para su mejor trasiego	3	36
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
		Línea de vapor (Heater)	6	Atascada, posible causa de la química, o suciedad de las líneas	3	Mantener la línea limpia, verter la química justa, no en exceso	5	90

Descripción del proceso	Modo de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causas de la falla	Ocurrencia (O)	Controles Actuales de prevención	Detección (D)	RPN
Sistema de combustible modo fuel (HFO)	Fallo sistemas generales del modo fuel (HFO)	Separador de agua del combustible (HFO)	6	Obstruido o sucio	2	Mantenimiento correctivo	3	36
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		Unidad booster	8	Fallo de programación, electrónica	1	No hay	6	48
En caso de fallo del modo fuel el motor pasa al modo diesel, por seguridad				Falla de bombas de circulación de la unidad	2	Mantenimiento correctivo	5	80
				-----	-----	-----	-----	-----

## 6. CONCLUSIONES

No existe un mantenimiento del que pueda decirse que es el mejor bajo todas las circunstancias, pues estas últimas ofrecen mucha variedad. Por lo tanto, dependiendo del tipo de instalación a mantener y de su importancia en relación con la seguridad y calidad del servicio, y su importancia en lo tocante al medioambiente, seguridad y calidad, será mejor aplicar un método de mantenimiento u otro. Por ello debe realizarse un estudio previo que determine cuál de los modelos de mantenimiento es el más adecuado.

Para el sistema de alimentación de combustible del que hemos tratado más arriba, al cual se le va a realizar el mantenimiento, el que mejor se adecúa es el método FMEA, que está dentro del tipo del RCM y que enfatiza la fiabilidad. Esto es debido a que en la instalación descrita en este trabajo adquiere vital importancia la seguridad, ya que en un motor propulsor marino la seguridad es primordial puesto que involucra aspectos medioambientales y seguridad de las vidas humanas.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el método FMEA es un mantenimiento basado en la fiabilidad de los equipos, por lo que se ajusta a la perfección a sistemas que pertenezcan a buques, en los que el fallo de equipos puede concatenarse y ocasionar la parada del buque, con todos los peligros y los costes que eso conlleva.

En un principio los costes de mantenimiento son elevados, pues el valor inicial de los equipos es alto; el costo añadido que supone el mantenimiento es un plus a tener muy presente

Por último, el método FMEA va a ser la mejor opción en muchas de las instalaciones industriales, debido a que su plan de mantenimiento es muy detallado y se concreta en todos los elementos que constituyen el sistema de alimentación como es en este caso. De esta manera se puede conocer perfectamente el fallo y la criticidad de los elementos y optar por la manera más adecuada de realizar su reparación, lo que confirma que el mantenimiento FMEA que se encuentra dentro del tipo RCM es la mejor opción para esta instalación.

---

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] González, Francisco Javier(2005), *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. Madrid, España. Fundación Confemetal.
- [2] Moubray, John (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centred Maintenance)*. North Carolina 28803, USA. Aladon LLC.
- [3] The International Marine Contractors Association(2002). *Guidance on Failure Modes & Effects Analysis (FMEA)*. <http://www.amcsearch.com.au/wp-content/uploads/IMCA-166-Guidance-on-Failure-Modes-and-Effects-Analyses-FMEAs1.pdf>
- [4] Diago, Juan Manuel(2015). *Análisis de modos y efectos de falla FMEA*. <https://prezi.com/tfkiuktnllom/analisis-de-modos-y-efectos-de-falla-fmea/>
- [5] Documentación de la empresa Bureau Veritas(2016). *Procedures for Failure Modes and Effects Analysis*.
- [6] Martínez Lugo, Cesar Alejandro(2004). *Implementación de un análisis de modo y efecto de falla en una línea de manufactura para juguetes*. León, España. UANL.
- [7] Reyes, P.(2007). *Análisis del Modo y Efecto de falla*. [www.icicm.com/files/PFMEA.doc](http://www.icicm.com/files/PFMEA.doc)

