



**Universidad
de La Laguna**

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

SECCION DE NAUTICA, MAQUINAS Y RADIOELECTRONICA NAVAL

CURSO 2019-2020

TRABAJO FIN DE GRADO

**Sistema de inyección de combustible common rail y detección de averías en los
motores MAN 7L48/60CR**

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

Alumno: Aarón Trujillo Alonso

Director: Juan Toribio Morales Darias

Fecha: 23 de Junio de 2020

Santa Cruz de Tenerife

Autorización del tutor

D. Juan Toribio Morales Darias, Profesor de la UD de Ingeniería Marítima, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna:

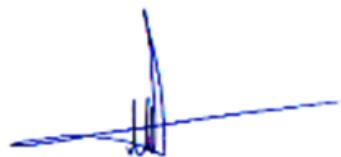
Expone que: D/D^a. Aarón Trujillo Alonso con DNI 42221516 W, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado:

“SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE COMMON RAIL Y DETECCIÓN DE AVERÍAS EN LOS MOTORES MAN 7L48/60CR”

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente documento.

En Santa Cruz de Tenerife a 23 de junio de 2019.



Fdo.: Juan Toribio Morales Darias

Director del trabajo de fin de grado

Índice general

Índice de figuras	8
Índice de tablas	11
Índice de acrónimos.....	13
Resumen	15
Abstract.....	16
I. Introducción	18
II. Objetivos.....	20
III. Antecedentes.....	21
IV. Metodología	24
V. Desarrollo/Resultados.....	24
1. Descriptiva del sistema common rail	24
1.1. Esquema Sistema carburante	25
1.2. Descriptiva del sistema	26
1.2.1. Throttle:	26
1.2.2. Bomba de alta presión:	27
1.2.3. Acumulador:	29
1.2.4. Válvula de mando (control):.....	30
1.2.5. Válvula de parada de emergencia:.....	31
1.2.6. Válvula de seguridad:	32
1.3. Principio de funcionamiento del sistema Common Rail	32
2. Operativa del sistema Common rail	37
2.1. Regulación de las revoluciones y la potencia en función de la carga.....	37
2.2. Sistema de Control.....	39
2.3. Funcionalidades del sistema SaCoSone.....	42

2.3.1.	Funciones de seguridad	42
2.3.2.	Funciones de alarma	43
2.3.3.	Comprobaciones automáticas	43
2.3.4.	Control de la velocidad.....	43
2.3.5.	Apagado del motor	44
2.3.6.	Protección contra sobrevelocidad.....	44
2.3.7.	Control de temperatura de medios.....	45
2.4.	Leyenda de alarmas	45
3.	Plan de mantenimiento	47
3.1.	Fichas de mantenimiento del sistema de inyección	47
4.	Detección de averías en el sistema de inyección	51
4.1.	Detección de averías por fugas	51
4.1.1.	Fuga en acoplamiento de la bomba de alta presión:.....	51
4.1.2.	Fugas en el rail y comprobación de los tornillos de fugas:.....	53
4.1.3.	Sensores capacitivos para la detección de fugas:	54
4.1.4.	Tanque para la detección de fugas:.....	55
4.2.	Detección de averías por mal funcionamiento.....	57
4.2.1.	Avería de la throttle:.....	57
4.2.2.	Avería en la válvula de control:.....	58
VI.	Discusión.....	59
VII.	Conclusión	61
VIII.	Conclusions	62
IX.	Bibliografía.....	62

Índice de figuras

Ilustración 1: Instalación de un nuevo módulo de combustible	20
Ilustración 2: Circuito common rail	25
Ilustración 3: Válvula Throttle	27
Ilustración 4: Bomba de alta presión	28
Ilustración 5: Acumulador de dos cabezas	30
Ilustración 6: Esquema válvulas 2/2 - 3/2	31
Ilustración 7: Válvula 2/2 - 3/2.....	31
Ilustración 8: Posición 1	34
Ilustración 9: Posición 2	34
Ilustración 10: Posición3	35
Ilustración 11: Posición 4	35
Ilustración 12: Posición 5	36
Ilustración 13: Posición 6	36
Ilustración 14: Posición 7	37
Ilustración 15: Sistema de regulación de la carga	38
Ilustración 16: Esquema Sistema SaCoSone.....	39
Ilustración 17: Panel de operación remoto	41
Ilustración 18: Rueda de medición	44
Ilustración 19: Conexión tubería de combustible a la bomba	52
Ilustración 20: Retén.....	53
Ilustración 21: Cabezal del acumulador	54
Ilustración 22: Sensor capacitivo.....	55
Ilustración 23: Tanque de fugas de ruptura	56
Ilustración 24: Tanque de fugas de cajas calientes.....	57

Ilustración 25: Temperatura gases de escape 59

Índice de tablas

Tabla 1: Combustible que emplea	18
Tabla 2: Características de los motores	19
Tabla 3: Circuito common rail.....	26
Tabla 4: Elementos bomba alta presión.....	28
Tabla 5: Elementos del sistema de regulación de la carga	39
Tabla 6: Elementos del Sistema SaCoSone.....	40
Tabla 7: Alarmas Sistema inyección	46
Tabla 8: Alarmas derivadas	46
Tabla 9: Mantenimiento del sistema de combustible	48
Tabla 10: Mantenimiento del accionamiento de control	48
Tabla 11: Mantenimiento de la bomba de alta presión de carburante	49
Tabla 12: Mantenimiento de la válvula de inyección de combustible	50
Tabla 13: Mantenimiento de la unidad acumuladora de alta presión para carburante	51
Tabla 14: Comparativa motores	60
Tabla 15: Comparativa esquemática.....	61
Tabla 16: Comparativa esquemática (inglés)	62

Índice de acrónimos

TFG	Trabajo Fin de Grado
HS	High Sulphur
LS	Low Sulphur
ULS	Ultra Low Sulphur
MGO	Marine Gasoil
HPV	Hélice de Paso Variable
UPS	Uninterruptible Power Supply
MAN	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
LOP	Panel de Operación Local
PMS	Punto Muerto Superior
PMI	Punto Muerto Inferior
IFA	Industrieverband Fahrzeugbau
SOPROMI	Societe des Procedes Modernes D'Injection

Resumen

El sistema *common rail* es un sistema de inyección de combustible a presión constante presente en los motores principales a bordo del buque Volcán del Teide, perteneciente a la compañía Naviera Armas, en el que llevé a cabo mis prácticas como alumno de máquinas. Estos días de embarque me alentaron a realizar este proyecto llevando a cabo el estudio de las averías propias del sistema de inyección de estos motores, ya que eran las que se presentaban con mayor frecuencia en todos los motores. Éstas se debían al desgaste de los componentes por las horas de funcionamiento, al combustible empleado, así como a las altas presiones de funcionamiento a las que estaban sometidas.

Es por ello que, un adecuado estudio del sistema, al igual que un correcto mantenimiento y un histórico de las averías, permiten la anticipación ante cualquier avería posible evitando así una indisponibilidad del motor.

Así como una básica comparativa entre motores cuyos sistemas de inyección presentan distintos principios de funcionamiento; por un lado, se encuentran los motores con sistema de inyección *common rail*, mientras que por otro lado se encuentran los sistemas bomba-inyector, determinando así sus ventajas y desventajas.

Abstract

The *common rail* system is a constant pressure fuel injection system which is present in the main engines on board the *Volcán del Teide* ship, belonging to the company Naviera Armas, in which I carried out my internship as a machine cadet. These days of boarding I was encouraged to perform this project by doing the study of the common failures of these injection system motors, because these were the failures occurred frequently in all motors. It was due to the wear and tear of the components by the operating hours, the fuel used, as well as the high operating pressures to which they are subjected.

This is why, a proper study of the system, as well as a correct maintenance and an historical records of the failures, allow the anticipation of any possible failure thus avoiding an unavailability of the engine.

As well as a basic comparison between engines whose injection systems have different operating principles; on the one hand, there are engines with common rail injection system. And on the other hand, there are pump-injector systems, thus determining its advantages and disadvantages.

I. Introducción

Los sistemas de inyección actuales a presión constante e inyección electrónica, llamados comúnmente sistemas common rail, son sistemas de inyección en los cuales se almacena combustible a gran presión dentro de un recipiente para posteriormente inyectarlo en la cámara de combustión durante el proceso de inyección del motor.

Estos sistemas han experimentado un gran avance desde sus inicios llegando así a conseguir actualmente, un mayor rendimiento en los motores y una disminución en la cantidad de residuos originados por una mala combustión. Esto se debe a la inyección, en el momento preciso, de la cantidad adecuada de combustible por parte del sistema, generando así una mezcla más homogénea del combustible con el aire, localizado en el interior de la cámara de combustión, y por consiguiente una mejor combustión y un mayor rendimiento.

Estos sistemas son muy diversos y cada fabricante emplea sus parámetros e instala sus componentes, creando así una gran variedad de ellos, pero siempre siguiendo las mismas pautas de presurización previa del combustible y posterior inyección, mediante válvulas controladas electrónicamente. En este caso, el trabajo se centrará en los motores de propulsión del buque Volcán del Teide, donde se llevará a cabo un desglose del sistema de inyección y su funcionamiento, debido a sus particularidades. Por ello, comenzaremos con la exposición de las características de dicho buque, tal y como se muestra en la *Tabla 1: Combustible que emplea* y *Tabla 2: Características de los motores*, obtenidos del Manual L+V48/60CR, Four-Stroke Diesel Engine (*Engine, n.d.*).

Combustible que emplea	
Consumo diesel oil	380 mm ² /s
Consumo fuel oil	180 g/kWh
High Sulphur Fuel Oil	IFO 380 HS
Low Sulphur	IFO 380 LS
Marine Gasoil	MGO
Ultra Low Sulphur	IFO 380 ULS

Tabla 1: Combustible que emplea

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual L+V48/60CR

Características de los motores	
Marca Comercial	MAN (Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg)
Modelo	7L48/60CR
Nº de cilindros	7
Diámetro de los cilindros	480 mm
Velocidad de giro	500 rpm
Carrera	600 mm
Potencia unitaria	8400 kW
Potencia conjunta	33600 kW
Accionamiento	· HPV (Hélice de paso variable)
	· Generador de cola

Tabla 2: Características de los motores

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual L+V48/60CR

Inicialmente este buque no contaba con la posibilidad de consumir combustible IFO 380 ULS, pero debido a las nuevas normativas, en cuanto al límite mundial de contenido en azufre en los Fuel Oil, entradas en vigor el día 1 de Enero de 2020, dicho límite se fijó en el 0,50% masa/masa (*Azufre 2020: Reduciendo Las Emisiones de Óxidos de Azufre, n.d.*). Se procedió, durante el proceso de varada llevada a cabo en noviembre del año 2019, a la instalación de un nuevo módulo de combustible, tal y como se puede observar en la *Ilustración 1: Instalación de un nuevo módulo de combustible*, y la limpieza de los tanques destinados a este, pudiéndose adaptar así, a las nuevas restricciones.



Ilustración 1: Instalación de un nuevo módulo de combustible

Fuente: Ilustración propia

Una vez conocidas las características propias del buque, se llevará a cabo un recorrido por todo el circuito de inyección de combustible, en el que veremos todos sus componentes y el funcionamiento que realiza cada uno de ellos, además del mantenimiento que se ha de llevar a cabo, indicado por el fabricante. Además, se hará mención a los sistemas de mando y control de los motores, con los que se pueden prevenir ciertas averías a bordo.

Es importante llevar a cabo un correcto mantenimiento de las máquinas, ya que una avería en alguna de ellas, llevaría a una disminución en su rentabilidad. En este caso, contamos con 4 motores propulsores divididos en dos bandas, estos accionan 2 hélices de paso variable, de modo que, en caso de que uno de ellos sufriese una avería, se podría seguir el funcionamiento con los 3 motores restantes, aunque habría que bajar la carga, lo que lleva consigo una bajada de la velocidad, conllevando al aumento de tiempo para la llegada al puerto de destino, suponiendo una gran pérdida económica para la empresa.

II. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el de, mediante la experiencia obtenida a bordo, poder llevar a cabo un estudio de los fallos más usuales que se han tenido con relación al sistema de inyección de los motores principales. Esto se ha podido observar gracias a las frecuentes averías que se presentaban en los 4 motores del buque, por ello y viendo que las

mismas averías se producían en los diferentes motores a lo largo del tiempo, se pudo llevar a cabo un estudio de las mismas y, por tanto, determinar las causas y las posibles soluciones que se podrían llevar a cabo.

Por otro lado, se realiza una comparativa entre los motores MAN 7L48/60CR con los que contábamos a bordo, frente a motores MAK 8 M 25. Descubriendo así, las ventajas de los motores con inyección electrónica common rail, en cuanto ámbito de consumo, averías, mantenimiento y gases de escape.

III. Antecedentes

Los motores Diésel o de ciclo por compresión, fueron inventados por el ingeniero alemán Rudolf Diesel en 1893, cuyo objetivo era conseguir un motor capaz de sustituir las máquinas de vapor y con el cual conseguir un aumento del rendimiento de modo que se aprovechara una mayor cantidad del combustible empelado.

Dicho motor se compone principalmente de 6 elementos: el cigüeñal, la biela, el émbolo, el cilindro, el inyector, y las válvulas de escape y admisión. Existen dos ciclos de trabajos para estos motores: el ciclo de trabajo que es realizado en cuatro tiempos (dos vueltas del cigüeñal) o el ciclo que es realizado en dos tiempos (una vuelta del cigüeñal); en este caso nos centraremos en los motores de cuatro tiempos ya que son a los que nos hacemos referencia en este estudio. Su funcionamiento, consiste en la compresión del aire procedente a través de la válvula de aspiración, de modo que, el movimiento ascendente del émbolo hacia su punto más alto PMS (Punto Muerto Superior), genera la presión suficiente en el interior del cilindro, para que, una vez introducido el combustible a través del inyector, este, en contacto con el aire, se auto inflame y genere una combustión que desplace el émbolo en un movimiento descendente hasta su punto más bajo PMI (Punto Muerto Inferior) llevando a cabo así un movimiento rectilíneo alternativo que es transferido al cigüeñal por medio de la biela, transformándolo así en un movimiento circular uniforme. Tras el movimiento descendente del embolo, regresa con un recorrido ascendente hasta su PMS donde expulsa a través de la válvula de escape los gases procedentes de la combustión.

Los motores ante los que nos encontramos, tal y como hemos mencionado en el apartado anterior, llevan a cabo su ciclo en cuatro tiempos, por lo que el cigüeñal realiza dos

giros de 360° y el émbolo pasa dos veces por su PMS y PMI para realizar el ciclo. Este ciclo se divide en:

- Un primer tiempo, en el que se encuentra abierta la válvula de admisión y el émbolo se desplaza a su PMI llenando así el cilindro de aire.
- Un segundo tiempo, donde se cierra la válvula de admisión y el émbolo comienza su carrera ascendente a su PMS, de modo que, comprime el aire que existe en el interior del cilindro.
- Un tercer tiempo, en el que se inyecta el combustible en la cámara de combustión, de modo que se inflama la mezcla y se expanden haciendo que el émbolo se desplace a su PMI.
- Un cuarto tiempo, con la válvula de escape abierta, donde el émbolo lleva a cabo un recorrido ascendente de manera que expulsa los gases resultantes de la combustión.

Una vez conocido el principio de funcionamiento, se procederá al estudio en profundidad, del tercer tiempo del ciclo de trabajo, correspondiente a la inyección del combustible en el motor. Por otro lado, cabe destacar que existen múltiples sistemas de inyección de combustible, pero este trabajo se centrará, como ya se ha expuesto con anterioridad, en el sistema common rail.

Los inicios de estos sistemas, de recipiente intermedio para la acumulación de combustible a una elevada presión, son reconocidos desde los inicios de los motores Diésel, siendo Rudolf Diesel uno de los investigadores que propusieron algunas de las ideas que posteriormente formaron parte de los sistemas de inyección common rail. Al igual que Rudolf Diesel, muchos fueron los investigadores que estudiaron la manera de mejorar la inyección de combustible, surgiendo así una patente en 1913 para Vickers Ltd. de Gran Bretaña (*Inyección de Combustible Common Rail*, n.d.), quien propuso un sistema de inyección sin aire comprimido para atomizar el combustible en la cámara de combustión. Este sistema emplearía un recipiente, donde se acumularía el combustible a una presión constante, para posteriormente, ser inyectado en la cámara de combustión con la propia presión existente en el fluido, con inyectores accionados mecánicamente. En este sistema se empleaban bombas de combustible accionadas por el propio motor, para elevar la presión de combustible en el rail hasta aproximadamente 400 bares, pudiendo, posteriormente, ser transportado hasta las válvulas de inyección de combustible, accionadas mecánicamente por

levas y palancas oscilantes. Seguidamente, el sistema de control de las levav de combustible fue sustituido por inyectoras, cuyo accionamiento se realizaba hidráulicamente (*El Motor Electrónico Controlado Por Computadora*, n.d.).

Durante el mismo periodo de tiempo, donde Vickers presentó su patente, también fue presentada otra en los Estados Unidos, para Thomas Gaff por un motor de ciclo OTTO, con inyección directa controlada eléctricamente por válvulas solenoides, de modo que era posible controlar la cantidad de combustible inyectado, a través del tiempo en el que permaneciese abierta la válvula. Estos avances supusieron un punto de partida para que los investigadores Brooks Walker y Harry Kennedy desarrollasen una válvula de inyección para un motor Diésel con sistema de inyección common rail comandada eléctricamente, esta válvula fue desarrollada a finales de 1920, pero no fue aplicada en motores Diésel hasta principios de 1930 por la Atlas-Imperial Diesel Engine Company de California.

Durante la década de 1960, la Societe des Procedes Modernes D'Injection (SOPROMI), trabajo en los sistemas de inyección de combustible common rail, pero sus avances no supusieron un gran desarrollo, ya que la tecnología no proporcionaba beneficios suficientes frente a los sistemas que se encontraban en uso en ese momento, debido al requerimiento de una mayor capacidad y precisión de las solenoides.

En la década de los años 80, surgieron nuevos desarrollos en estos sistemas para motores Diésel, a raíz de la construcción de un camión con common rail e inyección eléctrica por parte de la Industrieverband Fahrzeugbau (IFA), pero este proyecto fue abandonado unos años más tarde. A la vez, surgió un nuevo modelo common rail para motores de ligera carga, pero a causa de cancelaciones en su programa de motores Diésel, fue rechazado.

Posteriormente, a principios de la década de los 90 hubo un auge en los sistemas de inyección common rail y surgieron numerosos avances, como por ejemplo, la implantación de los sistemas common rail desarrollados por Nippondenso para vehículos comerciales, la compra de la tecnología UNIJET por parte de Bosch y la introducción de sus sistemas de common rail en vehículos comerciales, o el desarrollo de la próxima generación de sistemas common rail en 2003 por parte de la compaa Fiat, que permitía un rango de trabajo de 3 a 5 inyecciones (*Inyección de Combustible Common Rail*, n.d.).

Todos estos, unidos a un desarrollo de la electrónica industrial y los avances en la tecnología informática, han permitido un mayor desarrollo de los sistemas de inyección common rail, puesto que permiten llevar a cabo un mayor control de los tiempos de inyección y la presión del acumulador. De esta manera, han surgido los sistemas de control de inyección y los sistemas de inyección controlados electrónicamente (*El Motor Electrónico Controlado Por Computadora*, n.d.).

IV. Metodología

En este trabajo, se ha empleado el sistema APA (American Psychological Association) para realizar el referenciado de las fuentes bibliográficas que se han empleado en el desarrollo del trabajo. En concreto, se ha empleado la sexta edición de este sistema con la modificación del día 22 de marzo de 2019, siendo Brenton M. Wiernik su autor.

Los datos empleados como fuente de información, para la elaboración de este trabajo, son principalmente manuales de funcionamiento del sistema estudiado, además de la información obtenida durante el período de mis prácticas profesionales a bordo. Por otro lado, se han empleado páginas web para la búsqueda de datos complementarios relacionados con este estudio.

Durante este periodo de embarque, además se obtuvo opinión y conocimientos de primera mano propios de los oficiales del buque y del personal de la empresa creadora de estos motores encargados de llevar a cabo las reparaciones de los mismo.

V. Desarrollo/Resultados

1. Descriptiva del sistema common rail

A continuación, se llevará a cabo un desglose del sistema de inyección de nuestro motor, comenzando por la tubería de carburante, que suministra combustible a la bomba de alta presión, hasta finalizar el circuito, con la tubería colectora de descarga, encargada de recoger todo aquel combustible que no se haya empleado durante el proceso de inyección, además de todas aquellas fugas que pudiesen existir para depositarlo en el tanque de sedimentación.

Es por ello, que se comenzará con un esquema detallado del sistema de inyección, para posteriormente desglosar cada una de sus partes y saber qué función realiza cada una de ellas durante el ciclo de trabajo del motor.

1.1. Esquema Sistema carburante

Este apartado se compone del esquema del sistema de inyección, como se puede observar en la *Ilustración 2: Circuito common rail*, además de la *Tabla 3: Circuito common rail*, en la que veremos todas las partes a las que hace referencia dicho esquema. Con ello, se pretende identificar el puesto que ocupa cada elemento dentro del circuito y de ese modo poder tener una primera idea del proceso que se lleva a cabo durante la inyección del combustible.

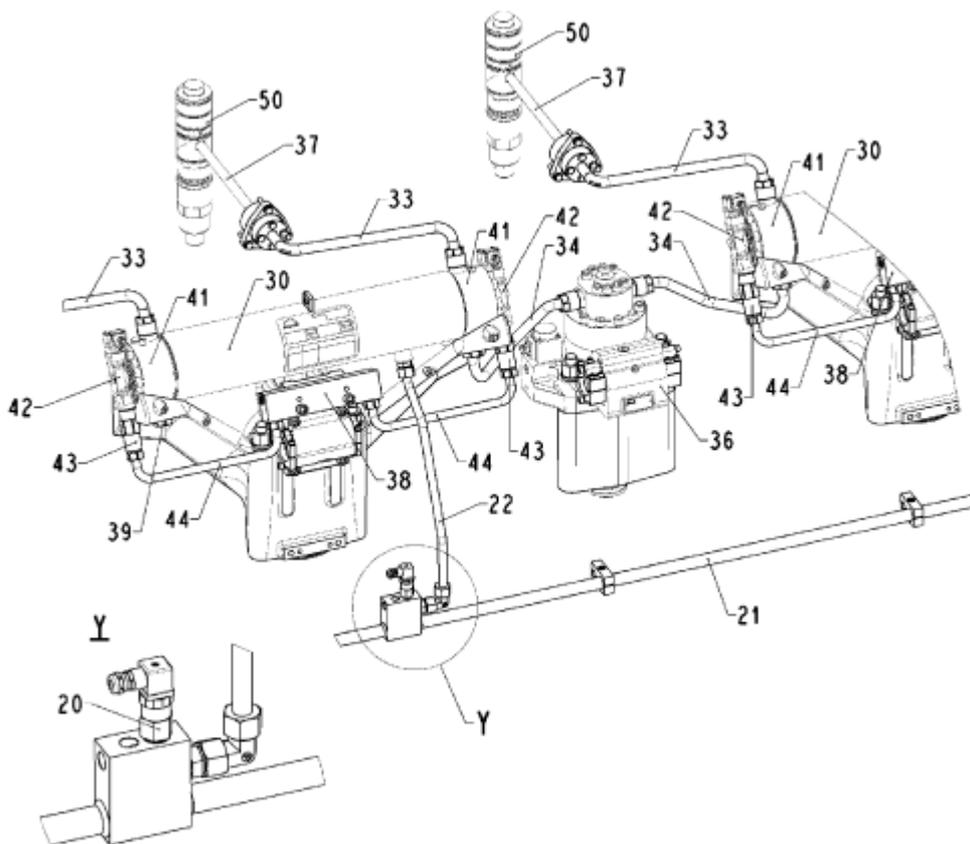


Ilustración 2: Circuito common rail

Fuente: Manual de Instrucciones L48/60CR

20	Sensor capacitivo	38	Elemento distribuidor
21	Tubería colectora de descarga	39	Válvula de parada de emergencia
22	Tubería de descarga de fugas	41	Soporte de válvula de mando
30	Unidad acumuladora	42	Grupo de válvulas
33	Tubería de inyección	43	Válvula reguladora
34	Tubería de alta presión	44	Conducto de desvío
36	Bomba de alta presión	50	Válvula de inyección de combustible
37	Tubería de conexión		

Tabla 3: Circuito common rail

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

1.2.Descriptiva del sistema

El sistema se compone de las siguientes partes:

1.2.1. Throttle:

Se encuentra en la aspiración de la bomba de combustible, justo después de la tubería de combustible, con una presión de 11 bares. Este dispositivo, funciona mediante un campo magnético, consiguiendo el movimiento ascendente y descendente del pistón que se encuentra en su interior, este se puede observar en la *Ilustración 3: Válvula Throttle*, pudiendo actuar de ese modo sobre el asiento donde se apoya, accionando así la válvula que se encuentra en él, y permitiendo de esta forma que el combustible pase desde la tubería hasta la aspiración de la bomba. La throttle es semejante a un actuador que, al recibir una señal, hace que el pistón descienda y abra la válvula, para que pueda pasar el combustible. Mientras no tenga señal, permanecerá cerrada y por tanto la bomba no recibirá combustible impidiendo el aumento de presión en el interior del acumulador.

La throttle funciona debido a que le llega la señal de la unidad de inyección y del sistema de control, que después de recibir toda la información, manda la señal de actuar. De esta forma, el sistema de control determina el tiempo de actuación y la intensidad de corriente necesaria para accionar la throttle. Esta es una señal eléctrica que oscila entre los 0 Amperios y los 2 Amperios, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el dispositivo, debido a que, cuanto mayor resistencia ejerza el vástago, mayor intensidad será necesaria para su accionamiento.



Ilustración 3: Válvula Throttle

Fuente: Ilustración propia

1.2.2. Bomba de alta presión:

Las bombas de alta presión de los motores (*Ilustración 4: Bomba de alta presión, Tabla 4: Elementos bomba alta presión*), son el paso intermedio entre el circuito de media presión y el circuito de alta presión de combustible. De este modo, mediante ella, se consigue elevar la presión del combustible desde los 11 bares a la que se encuentra, hasta una presión en el acumulador de 1100 bares. Respecto a su posición en el motor, se encuentra sobre el árbol de levas, puesto que el accionamiento de la misma se lleva a cabo por medio de un balancín oscilante con rodillo, impulsado por la leva de carburante del árbol de levas. Mediante el accionamiento del balancín, conseguimos una compresión del combustible que se encuentra en el interior de la cámara de la bomba por medio de un cilindro que comprime el combustible y lo envía al acumulador.

La succión de estas bombas y, por tanto, el caudal de suministro de la misma, es regulado a través del sistema de control del motor, el cual es el encargado del accionamiento de la throttle, encargada de abrir el paso de combustible desde la tubería de admisión hasta la cámara de la bomba, de esta forma, limita la cantidad de flujo de combustible que necesita introducirse en el acumulador, en base a la relación potencia-velocidad a la que se encuentre el motor en cada momento.

El funcionamiento de la bomba depende de la incidencia de la leva de carburante sobre el balancín de la bomba, pero esto, únicamente, acciona el vástago del interior de la bomba, de manera que, si la válvula estranguladora de presión se encuentra cerrada, no se comprimiría combustible y no se aumentaría la presión del rail. Del mismo modo, se podría dar el caso de que la válvula estranguladora se quedase bloqueada en su posición de apertura, ocasionando de esta manera que la bomba accionada por el árbol de levas, no pare de comprimir combustible y de aumentar la presión dentro del rail, hasta la presión máxima admisible por los sistemas de seguridad, causando así una despresurización de la presión en el rail, suponiendo una parada de emergencia.

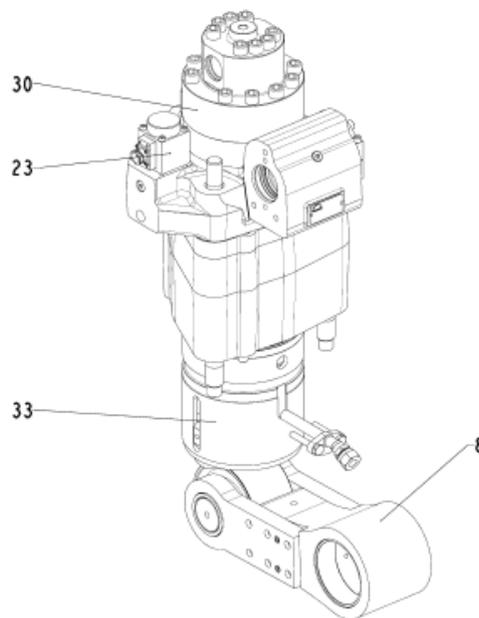


Ilustración 4: Bomba de alta presión

Fuente: Manual de Instrucciones L48/60CR

8	Balancín oscilante con rodillo	30	Bomba de alta presión
23	Throttle	33	Casquillo guía del empujador

Tabla 4: Elementos bomba alta presión

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

1.2.3. Acumulador:

El acumulador es un recipiente intermedio situado entre la bomba de alta presión y el inyector del motor. Estos varían en número en función de la cantidad de cilindros de los que se componga el motor, y se encuentran conectados ambos cabezales a un mismo recipiente, indicándonos así el número de acumuladores que son necesarios por motor. En este caso, se estudia un motor de 7 cilindros en línea y 4 acumuladores, puesto que cada acumulador puede suministrar a 2 inyectores (*Ilustración 5: Acumulador de dos cabezas*); pero al ser un número de cilindros impares, el cuarto acumulador encargado de alimentar al cilindro Nº 7, sólo dispone de una cabeza capaz de conectar únicamente una tubería de inyección, por lo cual este acumulador solo se puede emplear para este cilindro, y en caso de avería, no es posible sustituirlo por un acumulador con dos cabezales de conexión de tuberías de inyección.

Este elemento ha sido diseñado para soportar grandes presiones de trabajo y así mantener el combustible a una presión constantes de 1100 bares para su inyección. Se compone de una válvula de retención, situada en el interior de este, se encarga de evitar el paso del combustible una vez se haya inyectado la cantidad necesaria. Debido a ello y a las grandes presiones a las que se ve sometida es necesario cambiarla cada 30000 horas.

Durante el proceso de inyección de combustible a presión constante en la cámara de combustión, una parte de este permanece en el acumulador y no es descargada del todo, puesto que descargar por completo la presión, y posteriormente aumentarla hasta los valores nominales de funcionamiento, puede llevar a ocasionar golpes de ariete, que serían un efecto perjudicial para el sistema, es por ello que, el acumulador no se descarga completamente y así conserva presión y no sufre daños durante su recarga.



Ilustración 5: Acumulador de dos cabezas

Fuente: Ilustración propia

1.2.4. Válvula de mando (control):

Esta válvula es el elemento característico de estos motores y la podemos ver a continuación en la *Ilustración 7: Válvula 2/2 - 3/2*. Esta se compone de una válvula 3/2 accionada con la propia presión ejercida por el combustible, y por una válvula 2/2 accionada por una solenoide, que abre el paso de combustible al ejercer una fuerza de atracción sobre la bola que sirve de sello del circuito.

Tal y como podemos observar en la *Ilustración 6: Esquema válvulas 2/2 - 3/2*, en la válvula de la derecha, se observan las dos posiciones en las que se puede encontrar el pistón interno de control, de modo que permite el flujo de combustible hacia el inyector, desviando también el combustible hacia el conducto de desvío. Por otra parte, se encuentra la válvula 2/2, que permite el paso de combustible a través de un pequeño conducto interior de la válvula para aliviar la presión, conllevando el cambio de posición de la válvula 3/2. El funcionamiento detallado se estudiará en el siguiente apartado (*1.3. Principio de funcionamiento del sistema*

Common Rail), además, del motivo de su estudio, a raíz de su característico funcionamiento a causa de la válvula control.

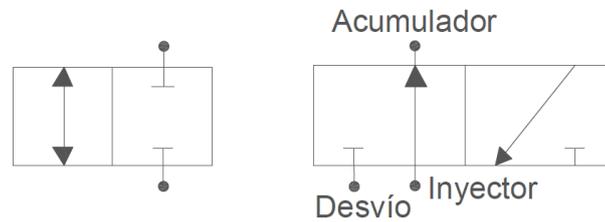


Ilustración 6: Esquema válvulas 2/2 - 3/2

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 7: Válvula 2/2 - 3/2

Fuente: Ilustración propia

1.2.5. Válvula de parada de emergencia:

Este elemento es una medida de seguridad en caso de que no se pueda llevar a cabo una parada normal del motor, accionando de manera electrónica las válvulas de control que detienen la inyección del combustible y por consiguiente detendría el motor.

En el apartado 4. *Detección de averías en el sistema de inyección* situado dentro del punto V. *Desarrollo/Resultados*, se expondrán las averías ocurridas a bordo que llevaron a la actuación sobre dicha medida de seguridad para llevar a cabo una repentina parada del motor y evitar por consiguiente un daño mayor en la instalación.

Su funcionamiento consiste en el vaciado del combustible presente en los acumuladores, a través de la tubería de retorno de combustible que lo deposita en el tanque

de sedimentación para posteriormente ser depurado y empleado, de este modo, evitamos la inyección del combustible en la cámara de combustión y, por consiguiente, romper el correcto ciclo de trabajo del motor, deteniendo su funcionamiento. Su accionamiento puede llevarse a cabo de dos maneras:

1. Automáticamente, al detectar que los parámetros de funcionamiento del motor no son los adecuados, producido por: altas presiones en el aceite, elevadas temperaturas en el agua de refrigeración...
2. Manualmente, tal y como se observan en las *Ilustración 17: Panel de operación remoto*, ya que los paneles de operación cuentan con interruptores de parada de emergencia que se accionan manualmente a voluntad del operario (*Guide et al., n.d.*).

1.2.6. Válvula de seguridad:

Este dispositivo se encarga de la protección contra sobrepresiones en la unidad acumuladora, evitando, de este modo, las posibles averías ocasionadas por un aumento de la presión por encima de los parámetros establecidos de 1850 bares. Una vez superado este umbral de presión y siendo inferior a 100 bares dentro de este rango, la válvula permanecerá cerrada como máximo 24 horas de funcionamiento, ya que ocasionaría daños en la propia válvula. Por el contrario, en caso de que la presión se eleve por encima de estos 1850 + 100 bares, la válvula automáticamente, aliviaría la presión en el acumulador despresurizándolo y ocasionando así una parada del motor y, por consiguiente, una parada de emergencia del mismo.

En casos excepcionales, dicha válvula ha sido dimensionada para soportar presiones máximas de 2150 bares, lo que nos permite tener un rango de acción para tomar medidas, en el caso, que la válvula no libere la presión de manera automática y, por lo tanto, sea necesario liberar la presión por otros métodos (*Guide et al., n.d.*).

1.3.Principio de funcionamiento del sistema Common Rail

Su funcionamiento consiste en la acumulación de combustible en un recipiente intermedio, a una elevada presión para posteriormente ser inyectado en la cámara de combustión. Es por ello que, comienza su funcionamiento desde la tubería del carburante,

encargada de transportar el combustible a una temperatura de 131°C con una presión de 11 bares. La tubería se encarga de abastecer de combustible a las cuatro bombas de las que se compone cada motor, su acoplamiento se realiza en serie con retenes de sellado, para evitar las fugas de las uniones.

Una vez el combustible ha llegado al acoplamiento de la bomba, es la throttle, que mediante su accionamiento, se encarga de controlar el paso de combustible a la bomba, mediante el accionamiento de la válvula. Seguidamente, la leva de combustible, incidiendo sobre el rodillo de la bomba, accionándola, permite aumentar la presión del combustible, y es enviado por la tubería de alta presión a la unidad acumuladora, donde es almacenado a una presión de 1100 bares.

El combustible permanece en el acumulador hasta que el sistema de control determina el momento indicado para la inyección del combustible a través del inyector correspondiente, para ello, actúa sobre la válvula de control de la inyección de la siguiente forma (*Diesel & May, 2007*):

1. La *Ilustración 8: Posición 1*, muestra la posición inicial de la válvula de control, donde no se encuentra la solenoide alimentada y por tanto, la válvula 2/2 está cerrada debido a que la bola se encuentra sometida a una fuerza descendente debido a un muelle interno. De igual modo, encontramos que el inyector permanece en posición cerrada a causa de la fuerza ejercida por su muelle.

Por el contrario, el vástago de la válvula 3/2 situado a la derecha y coloreado de verde, está ejerciendo una fuerza descendente a causa de que el combustible procedente del rail, asciende por el conducto interno del vástago y genera una fuerza descendente que supera a las fuerzas ascendentes y mantiene la válvula 3/2 en posición de cierre, a causa de la posición actual de la válvula 2/2.

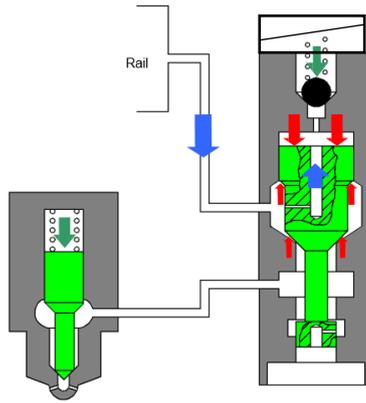


Ilustración 8: Posición 1

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

2. A continuación, tal y como se muestra en la *Ilustración 9: Posición 2*, se procede a la alimentación de la solenoide situada en la parte superior de la válvula de control, generando de esta forma, que la bola sea atraída y el flujo de combustible pueda pasar a través del conducto de la válvula 2/2, lo que genera una disminución de la presión en la parte superior del vástago de la válvula 3/2.

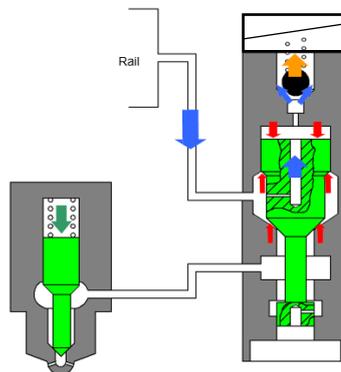


Ilustración 9: Posición 2

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

3. Una vez la presión de la parte superior del vástago ha sido aliviada, la fuerza del combustible procedente del rail, genera la fuerza suficiente para que el vástago ascienda y de ese modo, conseguir la apertura de la válvula 3/2 y permitir que el combustible circule por la tubería de inyección hasta llegar al inyector. Una vez ahí, este tiene que generar la fuerza suficiente para que la aguja venza la fuerza que ejerce el muelle y poder inyectar el combustible (*Ilustración 10: Posición 3*).

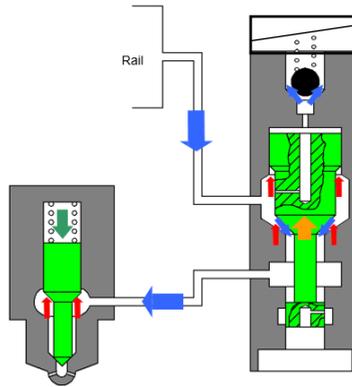


Ilustración 10: Posición 3

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

4. Cuando la presión en la aguja es lo suficientemente elevada, se produce la inyección del combustible, descrito en la *Ilustración 11: Posición 4*, ya que los orificios de inyección quedan abiertos a causa del movimiento ascendente de la aguja, permitiendo el paso del combustible a la cámara de combustión para continuar con el ciclo de trabajo del motor.

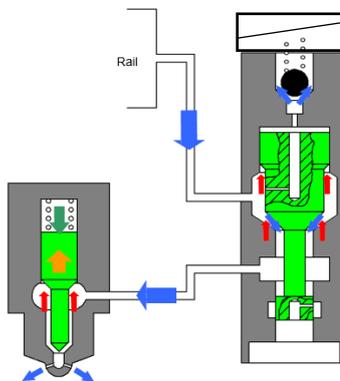


Ilustración 11: Posición 4

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

5. La duración de este periodo es controlada por la unidad de inyección, estipulando el tiempo máximo de apertura que ha de tener la válvula, para que se lleve a cabo una correcta inyección en función de los parámetros de presión del rail y la demanda del motor. Por ello, una vez alcanzado este tiempo, se cesa la alimentación de la solenoide, de modo que la bola regresa a su posición inicial y cierra la válvula 2/2, provocando de ese modo, que la presión sobre el vástago de la válvula 3/2 comience a

aumentar de nuevo. Mientras esta presión no sea suficiente para vencer la fuerza ejercida por el combustible, el proceso de inyección continúa. Como se puede ver en *Ilustración 12: Posición 5*.

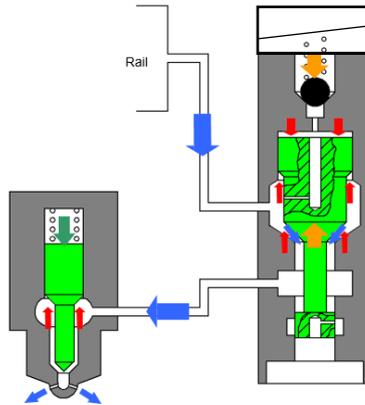


Ilustración 12: Posición 5

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

6. Una vez se haya alcanzado la presión suficiente en la parte superior del vástago, descenderá y cerrará la válvula, de modo que no continuará la entrada de combustible a la misma, como se observa en la *Ilustración 13: Posición 6*. Esto se debe, a que ya ha sido introducida la cantidad necesaria para realizar una correcta combustión, y de ese modo el acumulador vuelve a rellenarse para el siguiente ciclo de inyección.

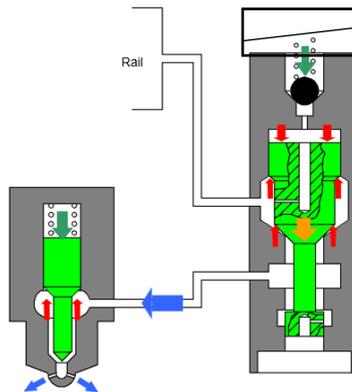


Ilustración 13: Posición 6

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

7. A causa de la falta de presión de combustible debido al cierre de la válvula 3/2, la presión del combustible presente en el interior de la tubería de inyección, no es suficiente para superar la fuerza ejercida sobre el muelle en la aguja del inyector. Es por ello, que el combustible sobrante de la inyección, recorre el conducto que ha dejado abierto la válvula 3/2 tras su cierre, y de ese modo, el combustible sobrante regresa al distribuidor por el conducto de desvío, y de ahí, es recogido en la tubería colectora de descarga para ser recirculado nuevamente. Como se puede ver en la siguiente imagen, *Ilustración 14: Posición 7.*

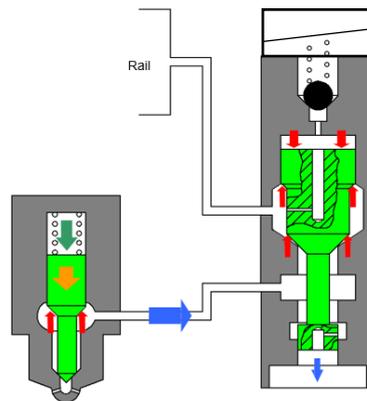


Ilustración 14: Posición 7

Fuente: Manual Training on Common-Rail for Crew. M/V Norwegian Jewel

2. Operativa del sistema Common rail

En este capítulo, elaborado a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR (*Guide et al., n.d.*) llevaremos a cabo una descripción del sistema de control y regulación de la carga del motor, así como del sistema de mando del motor principal y todos sus componentes.

2.1.Regulación de las revoluciones y la potencia en función de la carga

El sistema ante el que nos encontramos a bordo, permite llevar una regulación de velocidad y potencia del motor actuando directamente ante la admisión de combustible durante el periodo de inyección del mismo. De modo que, mediante el sistema de control y por medio del regulador de revoluciones del motor, se puede obtener el tiempo máximo de inyección de combustible y las presiones a las que se debe encontrar el sistema common rail,

para que una vez abiertas las válvulas de control durante el tiempo establecido, se inyecte la cantidad determinada de combustible, y así actuar en la admisión del mismo.

Mediante este proceso de corrección de las revoluciones, podemos ajustar las revoluciones reales del motor a las revoluciones de consigna establecidas previamente.

En el esquema siguiente (*Ilustración 15: Sistema de regulación de la carga*, explicado en la *Tabla 5: Elementos del sistema de regulación de la carga*), se pueden observar todos los elementos necesarios que se encuentran implicados en la acción de llevar a cabo una regulación de las revoluciones y la potencia, así como, los elementos de seguridad integrados en el circuito para evitar daños a la instalación.

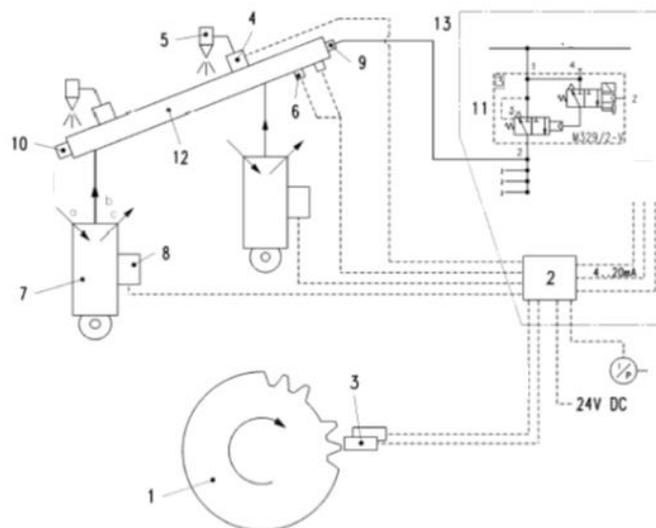


Ilustración 15: Sistema de regulación de la carga

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

1	Rueda de medición
2	Unidad de inyección
3	Capador de revoluciones/posición
4	Válvula de control
5	Válvula de inyección de combustible
6	Sensor de presión del acumulador
7	Bomba de alta presión
8	Válvula throttle
9	Válvula de parada de emergencia

10	Válvula de sobrepresión
11	Válvula de seguridad
12	Unidad acumuladora
13	Dispositivo de mando

Tabla 5: Elementos del sistema de regulación de la carga

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

2.2.Sistema de Control

A bordo nos encontramos ante un sistema de mando y control destinado a monitorizar todos los parámetros de los motores principales para una correcta operación del mismo, de este modo, dicho sistema, que en adelante será nombrado como SaCoSone, nos permite, mediante la información recibida por los sensores y unidades, disponer de información continua del estado del motor, su control, las alarmas activas y la seguridad. Dicho sistema ha de tener una alimentación eléctrica constante de 24 Voltios en forma de corriente continua. Este sistema de alimentación, también conocido como UPS (Uninterruptible Power Supply), se encuentra a bordo de este buque en dos grupos, con dos baterías de 12 Voltios conectadas en serie para obtener los 24 Voltios requeridos.

A continuación, veremos un esquema del sistema SaCoSone donde observaremos las partes de las que se compone, *Ilustración 16: Esquema Sistema SaCoSone:*

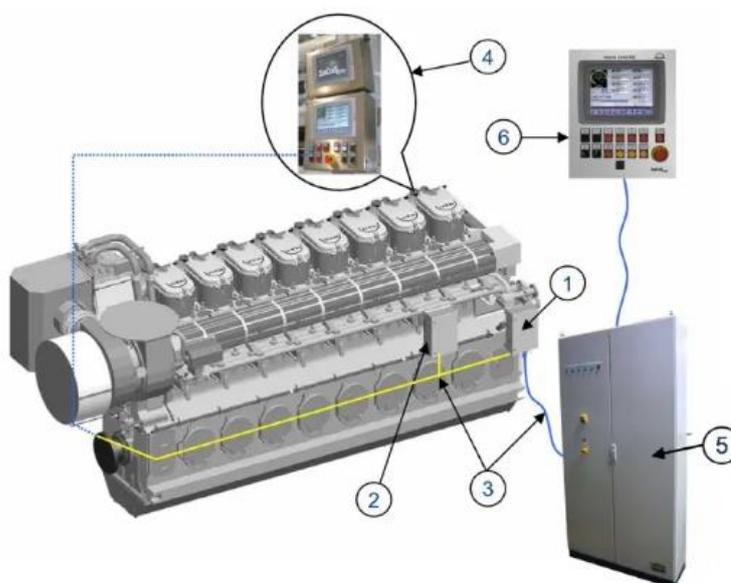


Ilustración 16: Esquema Sistema SaCoSone

Fuente: marine.man-es.com

1	Unidad de control	4	Panel de operación local
2	Unidad de inyección	5	Armario de interfaz
3	Bus del sistema	6	Panel de operación remoto

Tabla 6: Elementos del Sistema SaCoSone

Fuente: marine.man-es.com

Una vez visto el circuito donde se integra el sistema, podemos comenzar a desglosar este sistema referenciado en la *Tabla 6: Elementos del Sistema SaCoSone*:

- **Unidad de control:** como podemos observar en la *Ilustración 16: Esquema Sistema SaCoSone*, este dispositivo se encuentra adosado al propio motor y se encarga de controlar las funciones de seguridad y control del mismo, puesto que dispone de dos módulos que, de manera independiente, se encarga cada uno de llevar a cabo una de esas dos funciones, siendo completamente independientes entre sí y encargándose de la recopilación de información los parámetros del motor.

- **Unidad de inyección:** al igual que la unidad de control, observando la *Ilustración 16: Esquema Sistema SaCoSone*, se puede observar que la localización de esta unidad se encuentra en un lateral del motor. Puede estar formada por una única unidad o dos, en función de la disposición de los cilindros del motor, pudiendo ser motores en línea, los cuales solo poseen una única unidad de inyección, o motores en V, donde se encuentran dos de estas unidades de inyección. Dicha unidad es la encargada de llevar a cabo el control de las revoluciones a las que gira el motor, al igual que para realizar la apertura o cierre de las válvulas de inyección.

En el caso de encontrarse ante motores cuya disposición fuese en V, este segundo módulo se encargaría de salvaguardar el funcionamiento del sistema y actuar sobre la válvula de inyección, en caso de que el primer módulo sufriese cualquier tipo de avería.

- **Panel de operación local (LOP):** lo encontramos en la proa y en el lado de babor de los motores principales, con ellos se obtiene información constante de los parámetros recopilados a través de los sensores. De igual manera, mediante estos, se puede llevar a cabo cualquier maniobra necesaria con respecto al funcionamiento de los motores, como por ejemplo: la puesta en marcha, la parada

del motor de forma segura, o el accionamiento de la parada de emergencia como algunas de sus principales funciones.

- Panel de operación remoto: este panel se encarga de llevar a cabo las mismas funciones que las citadas anteriormente en el panel LOP, ya que simplemente permite operar las funciones del motor desde la sala de control de máquinas, siendo posible de este modo, una monitorización de todos los motores sin necesidad de tener que comprobar dichos parámetros en cada uno de los motores de forma física. En la *Ilustración 17: Panel de operación remoto* se puede observar estos paneles remotos.



Ilustración 17: Panel de operación remoto

Fuente: Ilustración propia

- Armario de interfaz: este dispositivo mostrado en la *Ilustración 16: Esquema Sistema SaCoSone*, se compone de canales de entrada y de salida, de ese modo es capaz de recibir la información por medio del bus del sistema y mediante sus dos módulos Gateway, permite la comunicación entre los diferentes sistemas, tratando así todas las señales que le llegan y generando una señal de salida con toda la información.

Dichos módulos además permiten la conexión de sistemas externos al motor, de tal modo que actúa como una interfaz entre ellos. Estos sistemas son: los sistemas automáticos de control del motor del buque, y el servicio de conexión

online. Con él, se puede llevar a cabo un seguimiento de todos los datos que circulan a través del armario de interfaz y actuar si fuese necesario.

- Bus del sistema SaCoSone: es el encargado de conectar todos los dispositivos de los que se compone el sistema, de tal modo que actúa como una autopista de transmisión de la información permitiendo así, el intercambio de datos entre los diferentes módulos y transportando la información de los diferentes sensores para su análisis y comparativa con los valores de consigna.

SaCoSone está conectado al sistema mediante el módulo de puerta de enlace o módulo Gateway. Este está equipado con canales descentralizados de entrada y salida, además de diferentes interfaces para la conexión a un sistema de automatización, el control remoto del panel operativo y el servicio en línea.

2.3.Funcionalidades del sistema SaCoSone

2.3.1. Funciones de seguridad

El sistema de control se compone de un sistema de seguridad cuya finalidad es la de conservar los equipos, de este modo, actúa de manera automática frente a cualquier situación inusual que se salga de los límites establecidos del correcto funcionamiento. Es por ello, que dispone del armario de interfaz donde todos los datos son analizados y en el caso de que los datos presenten una situación de avería o de riesgo para el sistema, da una señal de alarma. Además, en caso de no existir una supervisión por un operario y se presente una situación de emergencia, el sistema de seguridad actuará llevando a cabo una parada de emergencia del motor.

Por otra parte, una vez que los datos recibidos indiquen un fallo en el sistema y se requiera una disminución de la carga de trabajo de los motores, el sistema no podrá por sí mismo reducir la carga del motor, por tanto, será necesario que un sistema externo la realice.

Este sistema de seguridad es un medio de control de la instalación cuando no exista la presencia de un operario en la sala de máquinas, es por ello que dispone de una anulación manual con la que el sistema alerta al operario de los fallos detectados y el operario actúa en consecuencia de los datos recibidos. De este modo, el sistema de seguridad se activará

cuando el operario abandone la instalación y sea necesario disponer de un sistema que proteja a los equipos en caso de que sea imposible la llegada de este a tiempo.

2.3.2. Funciones de alarma

Esta función es una medida de seguridad del sistema de control, de manera que, mediante el empleo de señales acústicas y visuales, permite que el operario se alarme por la presencia de algún error en el sistema y sea necesaria su actuación para comprobar dicho suceso.

2.3.3. Comprobaciones automáticas

El propio sistema lleva a cabo tareas de detección de fallos mediante la comprobación de las señales recibidas por los sensores, por ello, en el supuesto caso de que el sistema detecte la existencia de un sensor en mal estado o una posible rotura de los cables de conexión, se informe de inmediato al operador del sistema mediante señales, ya sean digitales, indicando una alarma en el panel de operación, o sonoras, que deriven a la revisión del informe de alarmas del sistema.

2.3.4. Control de la velocidad

Dichas regulaciones de velocidad del motor se llevan a cabo mediante el Módulo de control y el Módulo de inyección, en ellos y mediante el análisis de los datos obtenidos por los sensores, se consigue averiguar la velocidad a la que gira el motor y la posición del cigüeñal. Esta información se obtiene debido a que en el extremo del cigüeñal se encuentra un plato mecanizado en su periferia, con diferentes tamaños y disposición de piñones, como se puede observar en la *Ilustración 18: Rueda de medición*. Estos piñones permiten al sistema detectar el punto exacto en el que se encuentra el cigüeñal y que proceso está llevando a cabo, mediante sensores de posición que analizan la disposición de los piñones en cada momento.



Ilustración 18: Rueda de medición

Fuente: Ilustración propia

2.3.5. Apagado del motor

Dentro de las funciones que se supervisan, encontramos una serie de parámetros y rangos de seguridad en los cuales puede operar el motor sin sufrir ninguna acción preventiva de seguridad. De esta manera, en caso de que dichos parámetros sobrepasaran los rangos de seguridad permitidos, ocasionaría la parada automática del motor. El sistema actuaría accionando la apertura de la válvula de seguridad, encargándose de aliviar la presión de combustible del sistema y de llevar a cabo el cierre de la válvula de inyección.

2.3.6. Protección contra sobrevelocidad

En el caso en el que se diese una situación de una sobrevelocidad, la unidad de control, mediante sus módulos, llevarían a cabo las acciones necesarias para la parada del

motor por medio de señales separadas que llegarían hasta el dispositivo de parada del motor, y este sería accionado.

2.3.7. Control de temperatura de medios

Debido a la delicadeza que presentan los motores frente a las elevadas temperaturas, el control de temperatura es uno de los factores más importantes dentro de la monitorización de los parámetros de los motores, es por ello que los módulos Gateway del armario de interfaz, se encarga de recopilar todos estos datos, y de esta manera, hace llegar al operario todos los valores de temperatura a los que se encuentra el motor. Este sistema de control se divide en tres bloques, siendo estos:

- Sistema de control de la temperatura del agua de refrigeración del motor, dentro del mismo se encuentra el circuito de refrigeración de alta temperatura y el circuito de refrigeración de baja temperatura. Estos sistemas disponen de una válvula automática que regula el caudal en función de la temperatura y los parámetros del motor.
- Sistema de control de la temperatura del aire de carga del motor, para ello se dispone de enfriadores de aire a la entrada de la admisión. Con ellos, mediante una válvula reguladora del caudal de agua del enfriador, se puede regular la temperatura del aire de carga en función de las necesidades y la carga del motor.
- Sistema de control de temperatura del aceite lubricante del motor, este sistema es muy importante, ya que un mal funcionamiento del motor o una sobrecarga imprevista, pueden llevar a un aumento de la temperatura del aceite y en casos extremos, el aceite puede perder sus cualidades e incluso desintegrarse, ocasionado así rozamientos entre las piezas y generando una avería mucho mayor.

2.4.Leyenda de alarmas

Dentro del listado de alarmas contempladas por el sistema de control de la instalación, es posible determinar cuáles son debidas a fallos en el sistema de inyección de los motores, por ello a continuación en la *Tabla 7: Alarmas Sistema inyección*, se han clasificado las alarmas destinadas al sistema de inyección. Estas se encuentran clasificadas en cuatro grupos, correspondientes a los diferentes motores del buque. A continuación, se expondrán

las averías del motor MP1 Br (motor principal 1 de babor), como ejemplo, ya que estas se presentan en los otros tres restantes.

CR Valv Seg .Abta	Válvula de seguridad del sistema common rail abierta
CR Perd.FO Bombas	Pérdida de Fuel Oil en las bombas del sistema common rail
CR Perd.FO Segmts	Pérdida de Fuel Oil en los acumuladores del sistema common rail
CR A.Pr.Segmentos	Alta presión en los acumuladores del sistema common rail
Te.FO Vv Flushing	Temperatura del Fuel Oil en la válvula de emergencia
A.Te.FO Vv.Flush.	Alta temperatura del Fuel Oil en la válvula de emergencia
Te.FO Vv Segurid	Temperatura del Fuel Oil en la válvula de seguridad
Alm.Ctrl.Inyecc	Alimentación al control de la inyección

Tabla 7: Alarmas Sistema inyección

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos durante mi embarque

Por otra parte, en la *Tabla 8: Alarmas derivadas*, hacemos referencia a aquellas alarmas que pueden ser causadas por un mal funcionamiento o una avería en el sistema de inyección, además de aquellas que presentan una amenaza para el sistema de inyección.

MP1Br Temp.Escap.Cil1	Temperatura gases de escape cilindro 1
MP1Br Temp.Escap.Cil2	Temperatura gases de escape cilindro 2
MP1Br Temp.Escap.Cil3	Temperatura gases de escape cilindro 3
MP1Br Temp.Escap.Cil4	Temperatura gases de escape cilindro 4
MP1Br Temp.Escap.Cil5	Temperatura gases de escape cilindro 5
MP1Br Temp.Escap.Cil6	Temperatura gases de escape cilindro 6
MP1Br Temp.Escap.Cil7	Temperatura gases de escape cilindro 7
Te.FO Entr.Motor	Temperatura de entrada del Fuel Oil al motor
Parada automática	
Reducc.Automática	Reducción automática
Parada Emerg.	Parada de emergencia
Sist.Seguridades	Sistema de seguridades
Canc.Paradas Auto	Cancelación de paradas automáticas
Sobrevelocidad	
Fallo Sens. Veloc.	Fallo en el sensor de velocidad
Fa.Sist.Paradas	Fallo en el sistema de paradas del motor
Fa.Sist.Control	Fallo en el sistema de control
Sobrecarga	

Tabla 8: Alarmas derivadas

3. Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento consta de una gran variedad de fichas para llevar a cabo las revisiones requeridas y estipuladas por el fabricante para un funcionamiento óptimo y una mayor vida útil. Es por ello, que se han seleccionado las destinadas al mantenimiento de los diferentes elementos del sistema de inyección, como se puede observar en las tablas siguientes: *Tabla 9: Mantenimiento del sistema de combustible, Tabla 10: Mantenimiento del accionamiento de control, Tabla 11: Mantenimiento de la bomba de alta presión de carburante, Tabla 12: Mantenimiento de la válvula de inyección de combustible, Tabla 13: Mantenimiento de la unidad acumuladora de alta presión para carburante*, obtenidas a través del Manual de Instrucciones L48/60CR (*Diesel, n.d.*).

3.1.Fichas de mantenimiento del sistema de inyección

	Mapas de trabajo (información detallada de los pasos a realizar)	Persona l necesario	Hora s de trabajo	Frecuenc ia de repetició n en horas de trabajo	Frecuencia de repetición según la necesidad/estado	Control de las piezas nuevas o recuperadas	Frecuenci a de repetición según prescripci ón del fabricante
Sistema de combustible							
Revisarla estanqueidad de los componentes del sistema (inspección visual)	Ningún mapa de trabajo necesario /existe	1	0,2	24			
Depósito de día: revisar el nivel de combustible; evacuar el agua del depósito de día y depósito de sedimentos	Ningún mapa de trabajo necesario /existe	1	0,2	24			
Comprobar el Viscosimat (medir comparativamente la temperatura)	Consulte las indicaciones de mantenimiento del fabricante	1	0,1	24			

Limpiar el filtro de combustible (en función de la presión diferencial)	Consulte las indicaciones de mantenimiento del fabricante	1	3				
Someter a revisión la bomba de combustible	Consulte las indicaciones de mantenimiento del fabricante	1	1				
Comprobar /limpiar el depósito de fugas de alta presión, fugas de ruptura y fugas permanentes	Consulte las indicaciones de mantenimiento del fabricante	1	0,5	24			

Tabla 9: Mantenimiento del sistema de combustible

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

	Mapas de trabajo (información detallada de los pasos a realizar)	Personal necesario	Horas de trabajo	Frecuencia de repetición en horas de trabajo	Frecuencia de repetición según la necesidad/es tado	Control de las piezas nuevas o recuperadas	Frecuencia de repetición según prescripción del fabricante
Accionamiento de control							
Comprobar las ruedas dentadas, medir los juegos de piñones	100.01	2	1	5000-6000			

Tabla 10: Mantenimiento del accionamiento de control

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

	Mapas de trabajo (información detallada de los pasos a realizar)	Personal necesario	Horas de trabajo	Frecuencia de repetición en horas de trabajo	Frecuencia de repetición según la necesidad/es tado	Control de las piezas nuevas o recuperadas	Frecuencia de repetición según prescripción del fabricante
Bomba de alta presión de carburante							
Comprobar (inspección visual) los rodillos y los balancines oscilantes de todos los accionamientos de las bombas de alta presión, así como las levas de carburante	201.01	1	0.5	1000-2000			
Desmontar todas las bombas de alta presión con accionamiento (sin balancín oscilante), desmontar las bombas de alta presión y comprobar. Renovar los elementos de bomba, portaválvulas y estranguladores de succión. Sustituir las piezas desgastadas	201.02 204.03 204.04	2	4	10000-12000			

Tabla 11: Mantenimiento de la bomba de alta presión de carburante

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

	Mapas de trabajo (información detallada de los pasos a realizar)	Personal necesario	Horas de trabajo	Frecuencia de repetición en horas de trabajo	Frecuencia de repetición según la necesidad /estado	Control de las piezas nuevas o recuperadas	Frecuencia de repetición según prescripción del fabricante
Válvula de inyección de combustible							
Desmontar las válvulas de inyección, sustituir los elementos de tobera y todos los anillos obturadores	221.01/221.02/221.03/221.04	2	3	5000-6000			

Tabla 12: Mantenimiento de la válvula de inyección de combustible

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

	Mapas de trabajo (información detallada de los pasos a realizar)	Personal necesario	Horas de trabajo	Frecuencia de repetición en horas de trabajo	Frecuencia de repetición según la necesidad /estado	Control de las piezas nuevas o recuperadas	Frecuencia de repetición según prescripción del fabricante
Unidad acumuladora de alta presión para carburante							
Comprobar la estanqueidad de los grupos de válvulas y de todas las conexiones de alta presión/baja presión (comprobación visual)		1	0,5	24			

Sustituir todos los grupos de válvulas (válvulas de mando)	437.05	1	0,5	5000 - 6000			
Sustituir la válvula de limpieza	437.03 /437.0 6	1	0,5				
Renovar la válvula limitadora de presión	437.06	1	0,5				
Sustituir la válvula de retención (limpieza)	437.02	1	0,5	1000 0- 1200 0			
Sustituir todas las válvulas de retención (desvío)	437.04	1	0,5	1000 0- 1200 0			

Tabla 13: Mantenimiento de la unidad acumuladora de alta presión para carburante

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR

4. Detección de averías en el sistema de inyección

Durante el periodo de embarque se observó que las averías más habituales no siempre se detectaban mediante el sistema de control del motor, sino que además, mediante los parámetros de este, se podía prever ciertas averías para anticiparse y llevar a cabo la sustitución del elemento en mal estado. En los siguientes apartados veremos cómo, mediante los sistemas de detección de fugas y el conocimiento de los parámetros de funcionamiento del motor, conocer la avería y actuar en consecuencia.

4.1. Detección de averías por fugas

4.1.1. Fuga en acoplamiento de la bomba de alta presión:

Durante una de las rondas de la máquina y comprobación de las cajas calientes del motor se observó una acumulación de fuel en el acoplamiento de la tubería de combustible

a la bomba de alta presión tal y como se puede ver en la *Ilustración 19: Conexión tubería de combustible a la bomba*. En consecuencia, y a causa de las condiciones de temperatura y presión de la línea, se optó por llevar a cabo la sustitución del retén de la tubería una vez el barco se encontrase en el muelle y permaneciese atracado en él durante un período de tiempo superior a 4 horas. Esto se debe, a que las tuberías se encuentran a una elevada temperatura, a causa del combustible que circula a 131 °C, además de ser necesario despresurizar la línea y esperar a que la temperatura de la tubería se encuentre en unas condiciones adecuadas para su manipulación.



Ilustración 19: Conexión tubería de combustible a la bomba

Fuente: Ilustración propia

Una vez desmontada la tubería se extrae el retén, y tal como podemos observar en la fila inferior de la *Ilustración 20: Retén*, se observan unos segmentos desgastados y endurecidos por las altas temperaturas y el paso del combustible, provocando que se partieran durante su extracción. Una vez limpiada la cavidad, se introduce el nuevo retén y se dispone el sistema para volver a presurizar la línea con el combustible y calentando de este modo la tubería paulatinamente.



Ilustración 20: Retén

Fuente: Ilustración propia

4.1.2. Fugas en el rail y comprobación de los tornillos de fugas:

Este sistema de detección de fugas nos permite identificar las posibles averías del acumulador o las tuberías de inyección y alta presión, para ello, tal y como se puede observar en la *Ilustración 21: Cabezal del acumulador*, los cabezales de los acumuladores disponen de dos tornillos ciegos.

Estos tornillos disponen de orificios de detección de fugas, de modo que, dependiendo del tornillo extraído y de si el orificio se encuentra manchado, se identifica una avería u otra. En el caso de extraer el tornillo indicado con la flecha naranja y encontrarse con el orificio manchado, se determina que existe una avería en la tubería de inyección de combustible. Por otro lado, extrayendo el tornillo señalado con la flecha verde y darse el mismo supuesto, se determina que existe una avería en la tubería de alta presión de combustible o en la válvula de retención del acumulador.

Mediante este método y el uso adecuado de las fichas de mantenimiento, se puede detectar el comienzo de las averías y actuar en consecuencia.

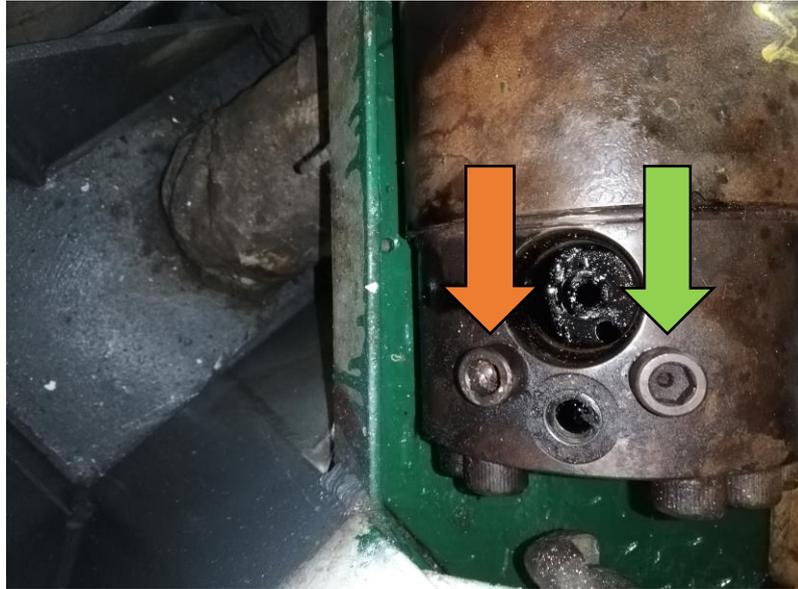


Ilustración 21: Cabezal del acumulador

Fuente: Ilustración propia

4.1.3. Sensores capacitivos para la detección de fugas:

Otra de las medidas de detección de fugas que se encuentran en el sistema de inyección, consiste en la colocación de sensores de tipo capacitivo, siendo estos capaces de detectar la presencia de fluido, de modo que, en el caso de existir un alto nivel de combustible dicho sensor enviaría una señal a la unidad de control, avisando al operario.

Tal y como se puede observar en la *Ilustración 2: Circuito common rail*, este sensor se encuentra insertado en un pequeño recipiente conectado entre la unidad acumuladora y la tubería colectora de descarga. De esta manera, el sensor es capaz de detectar la presencia de combustible una vez superados unos valores, ya que es habitual que se descargue una pequeña cantidad de combustible por esta tubería, pero tal y como vemos en la *Ilustración 22: Sensor capacitivo*, en ocasiones el nivel es muy elevado y esto provoca que el sensor emita la señal de alarma y sea necesario extraerlo para limpiarlo. Estas circunstancias siempre fueron a raíz de la obstrucción del combustible en el conducto que unía el recipiente del sensor con la tubería colectora de descarga, de manera que mediante la limpieza y desobstrucción del conducto el combustible se drenaba y se procedía a la colocación del sensor una vez haya sido limpiado.



Ilustración 22: Sensor capacitivo

Fuente: Ilustración propia

4.1.4. Tanque para la detección de fugas:

Este elemento de detección se encuentra dividido en dos tanques, situados en cada extremo del motor, siendo estos destinados a la detección de diferentes fugas, por medio de un sensor de nivel. Por un lado, en la proa del motor se encuentra el tanque de fugas de ruptura, mostrado en la *Ilustración 23: Tanque de fugas de ruptura*, este se encarga de recibir cuatro fugas diferentes del sistema:

- Fugas en la tubería de alta presión
- Fugas en las tuberías de inyección
- Fugas en las tuberías de desvío
- Fugas en los acumuladores



Ilustración 23: Tanque de fugas de ruptura

Fuente: Ilustración propia

Por otro lado, en el segundo tanque, situado en popa del motor, encargado de recibir todas aquellas fugas que se presentan en las cajas calientes de los motores, mediante unas canalizaciones, las fugas se unifican y se dirigen hacia este dispositivo, representado en la *Ilustración 24: Tanque de fugas de cajas calientes.*

Su funcionamiento consiste en un controlador de nivel mediante el uso de una boya, de modo que, el nivel de combustible en el caso de que existiese alguna fuga, aumente en el interior de cada sección del tanque, así el medidor flotante asciende a consecuencia del fluido hasta unos valores de consigna en los que genera una señal que es enviada a la unidad de control. Una vez la señal llega a la unidad de control es procesada, actuando en consecuencia, genera una señal de alarma para informar al operario de que existe un alto nivel de combustible en los tanques de fugas.

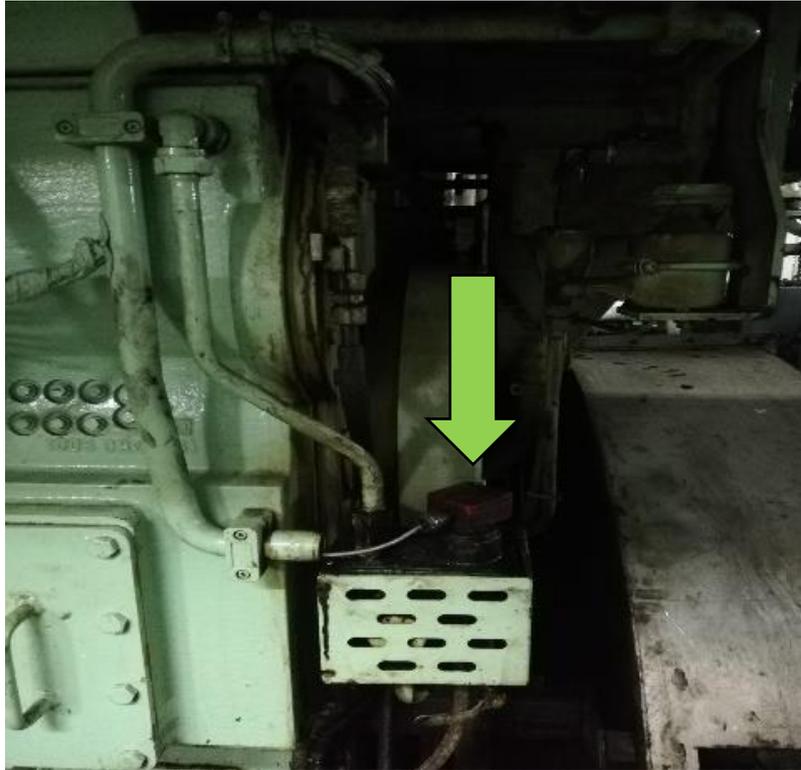


Ilustración 24: Tanque de fugas de cajas calientes

Fuente: Ilustración propia

4.2. Detección de averías por mal funcionamiento

4.2.1. Avería de la throttle:

Dicha avería es una de las más comunes a bordo y su causa es debida al combustible empleado, esto es así puesto que la cantidad de partículas insolubles en el combustible es muy elevada. De este modo, dichas partículas obstruyen la cavidad en la que se encuentra el actuador de la throttle, de manera que el sistema regula la intensidad de corriente que llega al dispositivo, ya que su rango de trabajo se oscila entre los 0 Amperios y los 2 Amperios. Así, al aumentar la intensidad se consigue una mayor fuerza en el actuador de la throttle y la colocación en posición de accionamiento y por tanto la imposibilidad de poder volver a su posición inicial por la obstrucción generada por el combustible.

La detección de esta avería se realiza mediante la observación de la presión del acumulador, ya que la bomba de combustible mantiene la alimentación al acumulador porque la throttle se encuentra accionada, permitiendo el paso de combustible al acumulador,

puesto que no se dispone de otra medida de control. Por ello siempre que permanezca la throttle accionada, la bomba continuará suministrando al acumulador y en consecuencia la presión del mismo aumentará.

Una vez comience el aumento de la presión pueden aparecer dos posibles situaciones:

1. La primera situación, depende únicamente de la obstrucción a la que se debe el auto accionamiento. Es por ello, que en algunos casos y de manera automática, a través de la regulación de la intensidad del dispositivo mediante el sistema de control, es posible que la throttle venza esa obstrucción y vuelva a su correcto funcionamiento. Aunque es recomendable que una vez ocurra esta situación sea sustituida por una nueva o reacondicionada.

2. El segundo caso que puede darse, es que el sistema no sea capaz de conseguir el normal funcionamiento del dispositivo, de tal modo que la presión en el acumulador aumente paulatinamente y sea necesario el accionamiento de la válvula de parada de emergencia, con la que detenemos el suministro de combustible y abrimos las válvulas de alivio por sobrepresión del acumulador. El aspecto negativo de llevar a cabo esta acción, es la completa parada del motor. Por ello, cuando se observa dicho aumento de la presión, se disminuye la carga de esa banda, para así en caso necesario de accionar la válvula de parada de emergencia, el otro motor sea capaz de soportar la demanda.

4.2.2. Avería en la válvula de control:

Tal y como se ha podido observar durante los apartados anteriores, el sistema de inyección de combustible, se lleva a cabo mediante unas válvulas automáticas encargadas de la inyección del combustible. Estas válvulas, debido a su construcción, son muy sensibles a las obstrucciones provocadas por las impurezas de los combustibles, es por ello, que disponen de una medida de anticipación ante una posible avería de la misma, es sumamente importante, ya que en el caso de avería ocasionaría una parada de emergencia del motor.

El funcionamiento de la válvula es controlado mediante la unidad de inyección. De este modo, la unidad controla la apertura y cierre de la misma, de tal manera que en el caso de que la válvula se encuentre parcialmente obstruida, esta unidad lo compensa regulando

los tiempos de inyección de la válvula. Por consiguiente, el motor permanecerá en funcionamiento hasta alcanzar la completa obstrucción.

A raíz de la regulación mediante la unidad de inyección, es posible detectar la válvula en mal estado, esto es gracias al análisis de las temperaturas de los gases de escape por cilindro. En condiciones óptimas, las temperaturas permanecerán semejantes en todos los cilindros, tal y como observamos en la gráfica de la derecha en la *Ilustración 25: Temperatura gases de escape*,. Por el contrario, una válvula en mal estado, provoca una mala inyección y por lo tanto, una combustión más pobre, reflejándose esto en la temperatura de los gases de escape, tal y como se observa en la gráfica de la derecha (el cilindro nº3 presenta una temperatura con unos valores muy por debajo de la media).

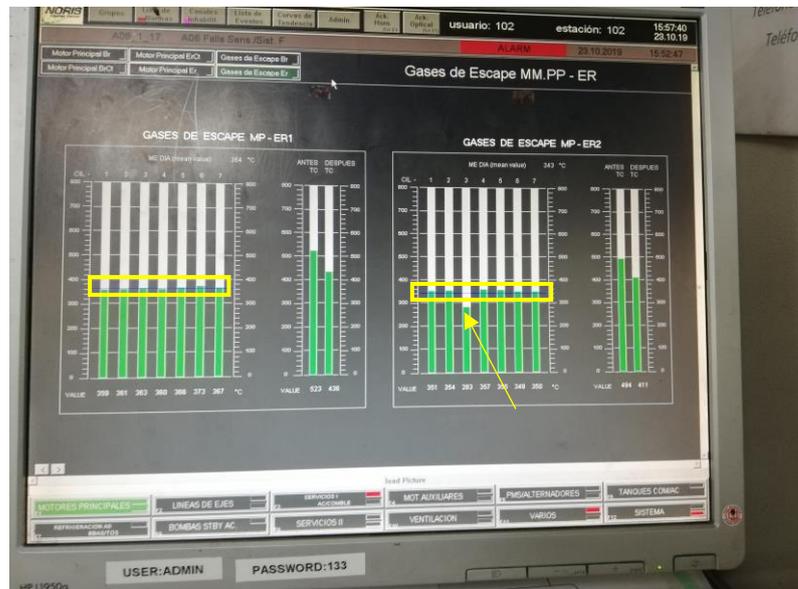


Ilustración 25: Temperatura gases de escape

Fuente: Ilustración propia

VI. Discusión

Con el fin de determinar qué sistema de inyección presenta un mayor número de aspectos positivos, en la *Tabla 14: Comparativa motores* se realizará una comparativa entre dos motores, cuyos sistemas de inyección difieren en su principio de funcionamiento.

Por un lado, nos encontramos el sistema common rail que hemos estudiado en este TFG (Trabajo Fin de Grado), frente a motores que emplean un sistema de bomba inyector (*Typ M25, 2003*). A continuación, se puede observar las peculiaridades que ambos presentan y con las que obtener un resultado del sistema más eficiente en cuanto a consumo, emisiones de NOx y averías se refiere.

	MAN 7L48/60CR	MAK 8 M 25	
Sistema de inyección	Common rail	Bomba-inyector	
Presión de inyección	1100	450	bar
Parámetros obtenidos al 100% de carga del motor			
Valor calorífico del Fuel	42077	42230	kJ/kg
Consumo combustible	187,5	198,7	g/kWh
NOx	11,6	9,6	g/kWh

Tabla 14: Comparativa motores

Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de Instrucciones L48/60CR y Manual de Instrucciones 8 M 25

Tras haber observado los datos descritos en la tabla anterior, desde mi punto de vista, se puede ver que los motores que emplean el sistema common rail presentan un menor consumo de combustible por kW/h, esto supone que los motores sean más rentables a largo plazo, debido a su uso ininterrumpido. Otro de los aspectos más importantes a tener en cuenta, es la existencia de un mayor número de elementos que componen el sistema. Por ello, estos motores presentan un mayor coste inicial y a causa de las presiones a las que se encuentran sometidos sus componentes, presentan un mayor número de averías y fatigas.

No obstante, a la hora de escoger entre estos sistemas de inyección, se debe de tener en cuenta las emisiones de monóxidos de nitrógeno resultantes de la combustión. Por ello, observando la tabla anterior, los motores que emplean un sistema de inyección bomba-inyector presentan un valor menor de NOx. Estos datos son solo un valor aproximado, puesto que los valores caloríficos de ambos combustibles difieren, por lo que para un mismo combustible los valores podrían oscilar. Esto se debe, a que los sistemas common rail generan una mayor homogeneización del combustible con el aire una vez inyectado, de modo que consigue una combustión más completa.

Por otro lado, los motores que presentan un mayor índice de averías son los estudiados en este trabajo, debido a las altas presiones de funcionamiento, a las que se ven

sometidos y a la singularidad del circuito que favorece la obstrucción de los orificios de la válvula de mando y de la Throttle. Además, nos encontramos ante unas válvulas de control que han de ser sustituidas cada 10000 horas de funcionamiento y las válvulas limitadoras de flujo de los acumuladores que tienen una vida útil de 30000 horas.

VII. Conclusión

La anticipación de las averías por medio de históricos, al igual que los mantenimientos establecidos por el fabricante y la experiencia de los propios oficiales a bordo, suponen una medida preventiva con la que evitar largos periodos de inoperancia de los motores a causa de las averías. Por ello, una interpretación adecuada de los datos obtenidos por el sistema de control y un correcto uso de los recursos, favorecen la detección de las averías en su lugar de origen.

La causa común de las averías en el sistema de inyección, se debe a la presencia de partículas insolubles en el combustible empleado, de modo que los orificios tarados de los diferentes elementos se obstruyen generando así averías en los mismos.

Los motores que emplean un sistema de bomba-inyector presentan un menor número de averías, al igual que un menor coste inicial a causa de su sencillez en el diseño. Por otro lado, este mismo sistema presenta un mayor consumo de combustible, pero menores emisiones de monóxidos de nitrógeno para estos modelos de motores. Mostrándose de manera esquemática en la siguiente tabla (*Tabla 15: Comparativa esquemática*): (color verde: favorable / color rojo: desfavorable)

	MAN 7L48/60CR	MAK 8 M 25
Averías		
Consumo combustible		
Emisiones NOx		
Coste inicial		

Tabla 15: Comparativa esquemática

Fuente: Elaboración propia

VIII. Conclusions

The anticipation of breakdowns using historical records, as well as the maintenance established by the manufacturer and the experience of the officers on board, are a preventive measure to avoid long periods of engine inoperability due to failures. Therefore, a proper interpretation of the data obtained by the control system and a correct use of resources favour the detection of failures in their place of origin.

The common cause of breakdown in the injection system is caused by the presence of insoluble particles in the fuel that has been used, so that the holes of the different elements are obstructed, generating breakdowns in them.

The motors that use a pump-injector system have a smaller number of failures as well as a lower initial cost, due to their simplicity in design. On the other hand, this system has higher fuel consumption, but lower emissions of nitrogen monoxides for these engine models. Schematically shown in the following table (*Tabla 16:Comparativa esquemática*Tabla 15: Comparativa esquemática): (green colour: favorable / red colour: desfavorable)

	MAN 7L48/60CR	MAK 8 M 25
Failures	Red	Green
Fuel consumption	Green	Red
Emissions NOx	Green	Red
Initial cost	Red	Green

Tabla 16:Comparativa esquemática (inglés)

Fuente: Elaboración propia

IX. Bibliografía

Azufre 2020: reduciendo las emisiones de óxidos de azufre. (n.d.). Retrieved May 17, 2020, from <http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>

Diesel, M. A. N. (n.d.). *Documentación técnica Motor Manual de instrucciones. 1(2).*

Diesel, M. A. N., & May, S. E. (2007). *Training on Common-Rail for Crew M / V Norwegian Jewel Training on Common-Rail for Crew M / V Norwegian Jewels Jewel Crew C / S Norwegian Arrangement of the training. May.*

El motor electrónico controlado por computadora. (n.d.). Retrieved May 20, 2020, from http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/electronic_engine.htm

Engine, F. D. (n.d.). *L+v48/60cr*.

Guide, P., Four-stroke, M., & Iii, I. M. O. T. (n.d.). *Man 48/60cr*. https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/4-stroke-project-guides/man-48-60cr-imo-tier-iii-marine.pdf?sfvrsn=dd734210_5

Inyección de combustible Common Rail. (n.d.). Retrieved May 20, 2020, from https://dieselnet.com/tech/diesel_fi_common-rail.php

Typ M25. (2003). 271292.