



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

“AVANCES TÉCNICOS EN MOTORES LENTOS NAVALES PARA EL EMPLEO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS”

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FEBRERO – 2022

AUTOR: JAVIER DIÉGUEZ CHEDA

DIRECTOR: FELIPE ANTELO GONZÁLEZ

TRABAJO DE FIN DE GRADO

“AVANCES TÉCNICOS EN MOTORES LENTOS NAVALES PARA EL EMPLEO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS”

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ENERGÍA Y PROPULSIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FEBRERO – 2022

AUTOR:

DIRECTOR:

Fdo: JAVIER DIÉGUEZ CHEDA

Fdo: FELIPE ANTELO GONZÁLEZ

RESUMEN

El uso de combustibles de menor impacto medioambiental es una de las herramientas para reducir las emisiones de diferentes contaminantes como los óxidos de azufre o los gases de efecto invernadero. Dadas las particularidades de estos combustibles, serán tratados de manera diferente en los sistemas que incluyan su uso y por ello vale la pena profundizar en el estudio de las tecnologías implicadas.

En este trabajo de fin de grado se hace un pequeño repaso sobre la evolución de los motores en la industria naval, la contaminación producida por los combustibles de origen fósil, las normativas anticontaminación, los combustibles alternativos y las técnicas de uso actual en motores que consumen combustibles convencionales de origen fósil. Además, se revisarán técnicas de suministro e inyección desarrolladas por las empresas fabricantes de motores de dos tiempos lentos navales para el uso de combustibles alternativos como el gas natural, etano, metanol, etanol y los gases licuados del petróleo. Estas técnicas engloban diferentes conceptos como la inyección de combustible gaseoso en motores de ciclo Diesel y ciclo Otto, o la inyección de gases licuados en motores de ciclo Diesel a través de los inyectores-bomba desarrollados para ese cometido. También se especifican las diferentes operaciones básicas que realizan los sistemas en la preparación del combustible y en términos de seguridad.

Como cierre del trabajo, se presentan distintas técnicas en desarrollo por los fabricantes de motores, como por ejemplo el uso de mezclas de diferentes combustibles como es el caso de la inyección estratificada, los inyectores flexibles para el uso de diferentes combustibles sin necesidad de diferentes inyectores, o los motores en desarrollo para el uso de amoníaco o hidrógeno.

RESUMO

O uso de combustibles de menor impacto medioambiental é una das ferramentas para reducir as emisións de diferentes contaminantes como os óxidos de xofre ou os gases de efecto invernadoiro. Dadas as particularidades destes combustibles, serán tratados de maneira diferente nos sistemas que inclúan o seu uso, e por iso paga a pena afondar no uso das tecnoloxías implicadas.

Neste traballo de fin de grao faise unha pequena revisión sobre a evolución dos motores na industria naval, a contaminación producida polos combustibles de orixe fósil, as normativas anticontaminación, os combustibles alternativos e as técnicas de uso actual en motores que consumen combustibles convencionais de orixe fósil. Ademais, revisaranse as técnicas de suministro e inxección desenvolvidas polas empresas fabricantes de motores lentos de dous tempos navais para o uso de combustibles alternativos como o gas natural, etano, metanol, etanol e os gases licuados do petróleo. Estas técnicas engloban diferentes conceptos como a inxección de combustible gaseoso en motores do ciclo Diesel e ciclo Otto, ou a inxección de gases licuados en motores de ciclo Diesel a través dos inxectores bomba desenvolvidos para ese cometido. Tamén se especifican as diferentes operacións básicas que realizan os sistemas na preparación do combustible e mais en termos de seguridade.

Como peche do traballo, preséntanse distintas técnicas en desenvolvemento polos fabricantes de motores, como por exemplo o uso de misturas de diferentes combustibles como é o caso da inxección estratificada, os inxectores flexibles para o uso de diferentes combustibles sen a necesidade de diferentes inxectores, ou os motores en desenvolvemento para o uso de amoníaco ou hidróxeno.

ABSTRACT

The use of fuels with lower environmental impact is one of the methods to reduce emissions of different pollutants such as sulfur oxides or greenhouse gases. Given the particularities of these fuels, they will be treated differently in the systems that include their use and for this reason it is worthwhile to study the technologies involved in depth.

In this final degree thesis we will review the evolution of engines in the shipbuilding industry, the pollution produced by fossil fuels, anti-pollution regulations, alternative fuels and the techniques currently used in engines that consume conventional fossil fuels. In addition, supply and injection techniques developed by naval two-stroke engine manufacturers for the use of alternative fuels such as natural gas, ethane, methanol, ethanol and liquefied petroleum gases will be reviewed. These technologies

include different concepts such as the injection of gas fuel in Diesel and Otto cycle engines, or the injection of liquefied gases in Diesel cycle engines through the pump injectors developed for this purpose. The different basic operations performed by the systems in fuel preparation and in terms of safety are also specified.

To close the thesis, different techniques under development by engine manufacturers are presented, such as the use of mixtures of different fuels as in the case of stratified injection, flexible injectors for the use of different fuels without the need for different injectors, or engines under development for the use of ammonia or hydrogen.

ÍNDICE GENERAL

OBJETIVO	1
1 EVOLUCIÓN MOTORES NAVALES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS.....	1
1.1 MOTORES DE GAS	1
1.2 MOTOR DIESEL	2
1.3 MOTORES DE 2T LENTOS	5
1.4 ÉPOCA MODERNA	6
2 CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR COMBUSTIBLES FÓSILES	8
2.1 INTRODUCCIÓN	8
2.2 GASES DE EFECTO INVERNADERO	9
2.3 ÓXIDOS DE AZUFRE (SO _x)	10
2.3.1 <i>Efectos sobre la salud de los SO_x</i>	11
2.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)	11
2.4.1 <i>Efectos sobre la salud y el medio ambiente de los NO_x</i>	11
2.5 PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN (PS)	11
2.5.1 <i>Efectos sobre la salud de las PS</i>	12
3 NORMATIVA ANTICONTAMINACIÓN	13
3.1 INTRODUCCIÓN	13
3.2 REGULACIÓN DE EMISIONES DE NO _x Y SO _x	13
3.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	15
3.3.1 <i>EEDI</i>	15
3.3.2 <i>SEEMP</i>	16
3.3.3 <i>EEXI</i>	17
3.3.4 <i>EEOI</i>	17
4 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS	17
4.1 INTRODUCCIÓN	17
4.2 BIODIESEL.....	17
4.3 GAS NATURAL LICUADO (GNL).....	18
4.4 GAS LICUADO DEL PETRÓLEO (GLP)	18
4.5 ETANOL.....	19
4.6 METANOL	20
4.7 HIDRÓGENO	21
4.8 AMONIACO	22
4.9 ETANO	24

5	SISTEMAS DE INYECCIÓN EN MOTORES DIESEL LENTOS	25
5.1	MAN B&W ME-C	25
5.1.1	<i>Fuente de energía hidráulica (HPS).....</i>	25
5.1.2	<i>Unidad hidráulica de cilindro (HCU).....</i>	26
5.2	WÄRTSILÄ RT-FLEX/ WINGDX	29
5.2.1	<i>Unidad de suministro</i>	30
5.2.2	<i>Unidad de conductos comunes.....</i>	31
5.2.3	<i>Unidad de control de la inyección (ICU)</i>	31
5.3	J-ENG LSJ.....	33
5.3.1	<i>Concepto Eco.....</i>	33
5.3.2	<i>Sistema de inyección de agua estratificada</i>	35
6	MOTORES NAVALES PARA EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS	36
6.1	MAN B&W ME-GI/GIE	36
6.1.1	<i>Sistema de suministro de combustible gaseoso (FGSS)</i>	37
6.1.2	<i>Tren de válvulas de gas (GVT).....</i>	38
6.1.3	<i>Bloque de control de gas.....</i>	39
6.1.4	<i>Válvulas de inyección de gas y combustible líquido.....</i>	41
6.2	MAN B&W ME-LGI	43
6.2.1	<i>Inyector-bomba hidráulico para gas licuado (FBVI-M y FBVI-P).....</i>	44
6.2.2	<i>Sistema de suministro de combustible líquido (LFSS)</i>	47
6.2.3	<i>Tren de válvulas de combustible (FVT).....</i>	48
6.2.4	<i>Resultados obtenidos por los motores LGIM y LGIP.....</i>	48
6.3	WINGDX-DF	50
6.3.1	<i>Concepto del motor X-DF.....</i>	50
6.3.2	<i>Sistema de suministro de combustible gas.....</i>	51
6.3.3	<i>Unidad válvulas de gas (GVU) o sistema de gas integrado (iGPR)</i>	52
6.3.4	<i>Sistema de combustible gaseoso en el motor</i>	55
6.3.5	<i>Sistema de inyección de combustible para llama piloto</i>	56
6.3.6	<i>Emisiones y rendimiento.....</i>	58
6.4	MAN B&W ME-GA.....	59
6.4.1	<i>Sistema de suministro de gas y unidad de válvulas de gas.....</i>	60
6.4.2	<i>Sistema de admisión de gas</i>	60
6.4.3	<i>Micro inyector-bomba de combustible piloto (MBIV).....</i>	62
6.4.4	<i>Recirculación de gases de escape</i>	62
7	TÉCNICAS FUTURAS.....	62
7.1	INYECTOR FLEXIBLE (FFI)	62

7.1.1	<i>Plataforma de pruebas</i>	63
7.1.2	<i>Motor de pruebas</i>	64
7.2	MOTORES 2T LENTOS PARA AMONIACO.....	65
7.2.1	<i>MAN B&W ME para amoniaco</i>	65
7.2.2	<i>WinGD X y X-DF para amoniaco</i>	67
7.3	J-ENG UEC-LSJ INYECCIÓN ESTRATIFICADA.....	67
7.4	J-ENG UEC LSGH	68
CONCLUSIONES		69
REFERENCIAS		72
ABREVIATURAS Y DEFINICIONES		80
ÍNDICE DE TABLAS		85
ÍNDICE DE FIGURAS		86
ÍNDICE DEL ANEXO		90

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es entender el porqué del desarrollo de motores cuyas técnicas se enfocan en el uso de combustibles alternativos. Debido a los problemas medioambientales provocados por los combustibles de origen fósil, el sector del transporte marítimo empieza a demandar motores que sean capaces de consumir combustibles con bajo o nulo contenido en carbono en su composición.

Para abordar este objetivo se realizará la revisión del estado del arte de las tecnologías para la combustión en los motores navales lentos de dos tiempos que utilizan combustibles de bajo impacto medioambiental, así como los elementos utilizados en los mismos para la preparación, suministro e introducción del combustible al motor.

Debido a la naturaleza limitada de este tipo de trabajo de investigación se intentará aportar información a nivel general sobre la evolución de las primeras técnicas utilizadas en el siglo pasado hasta convertirse en las utilizadas en la actualidad. De igual manera, los avances en la normativa que afectan al control de las emisiones a la atmósfera en el ámbito marítimo en relación a partículas contaminantes y ácidos derivados de los óxidos formados en la combustión. Finalmente, se esbozarán los fundamentos químicos y técnicos para la utilización de combustibles de bajo impacto medioambiental.

1 EVOLUCIÓN MOTORES NAVALES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

1.1 Motores de gas

El primer vestigio moderno de lo que hoy se conoce como motor alternativo de combustión interna (MACI) es la máquina diseñada por el ingeniero francés Etienne Lenoir, cuyo combustible fueron los gases derivados de la combustión parcial del carbón. En 1860 Lenoir patentó el método básico de la combustión interna a través de la introducción en un cilindro de una mezcla de aire y gas que, al proporcionarle energía de activación, resultaba en la explosión de la mezcla, la cual empujaba a un émbolo hasta el final de su carrera. Esto resultaba en tener una máquina donde se generaba y utilizaba el fluido propulsivo. El motor de gas de Lenoir se trataba de un motor de dos tiempos (2T), consistiendo así en una carrera de admisión de la mezcla a presión ambiente con su consiguiente explosión y la carrera de escape para volver a empezar [1]. La Figura 1.1.1 muestra la vista encorte del motor y su diagrama indicado.

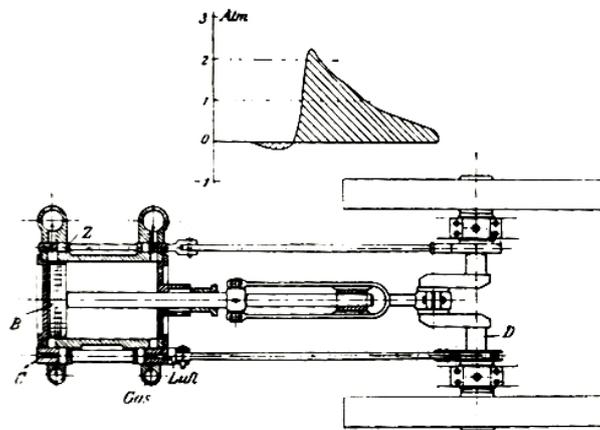


Figura 1.1.1. Motor de gas de Lenoir. [1]

Pocos años después, Alphonse Beau de Rochas y Nikolaus Otto, cada uno independientemente, inventan lo que se conoce como sistema de cuatro tiempos (4T). El sistema fue desarrollado únicamente por Otto, por lo que se nombró a este ciclo como ciclo Otto [1]. Este ciclo consta de una carrera de admisión de la mezcla tras la que se sucede una carrera de compresión. Con la mezcla de aire y gas comprimida en el punto muerto superior (PMS) se hace explotar la mezcla al principio a través de una llama que más tarde sería sustituida por una chispa. Tras la combustión sucede una carrera de expansión, donde los gases originados provocan el trabajo rectilíneo de un

émbolo. Una vez llegado el émbolo al punto muerto inferior (PMI), se abre la válvula de escape y empieza la carrera en la que se vacían los gases originados en la combustión. A partir de aquí se repite el ciclo.

El combustible utilizado eran los gases procedentes de la combustión parcial del carbón en un cilindro llamado gasógeno (generador de gas). Estos gases constaban de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) disociado de vapor de agua y oxígeno.

Como la marcha de los motores no era continua debido a la única carrera de trabajo y las presiones irregulares, resultó en el montaje de un volante con suficiente momento de inercia para hacer un giro más regular. Otra solución fue el montaje de varios cilindros con sus respectivos ciclos desfasados unos respecto a los otros.

De la mano de la empresa Deutz, la cual fue creada por Otto y Eugen Langen, vino el primer intento en la instalación de un motor a gas a bordo en el año 1884, pero debido a las fuerzas transversales el proyecto fue abandonado [1][2]. Tras el primer intento se decidió instalar los motores en posición vertical como se puede ver en la Figura 1.1.2.

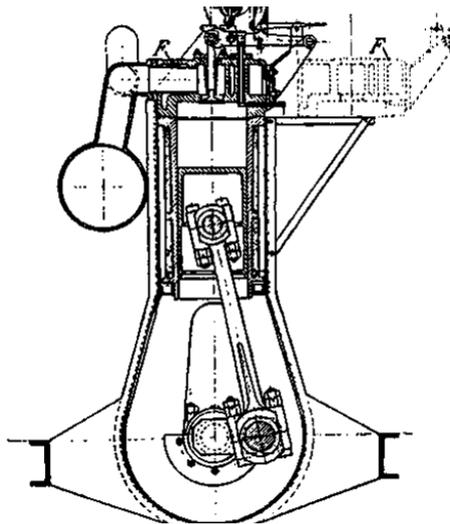


Figura 1.1.2. Motor naval a gas de Deutz. [1]

1.2 Motor Diesel

Debido a las características de la gasolina como combustible líquido con baja temperatura de evaporación y de inflamabilidad, se optó por utilizar otros combustibles con mayores temperaturas de inflamabilidad. Este combustible era el petróleo o queroseno pero, debido a los problemas para gasificarlo, se comenzaron a

desarrollar motores que a través de ciertas técnicas fueran capaces de inflamarlo. Dos de las ideas eran, en primer lugar, llegar a una compresión suficiente para alcanzar la temperatura de ignición y, en segundo lugar, disponer de encendido a través de un punto caliente [1].

No fue hasta el año 1893 cuando Rudolf Diesel, después de presentar sus ideas, construye en Augsburg el primer prototipo de motor por compresión, que se puede ver en Figura 1.2.1. Tras varios intentos para conseguir distintas cantidades de mezcla, Diesel se encuentra con que el problema es la calidad de la mezcla, con lo que desarrolla un sistema de inyección a través de unos mezcladores en la cámara de combustión dando lugar a una sola válvula común de admisión y escape [1]. En la Figura 1.2.2. se puede ver la cámara de combustión citada.

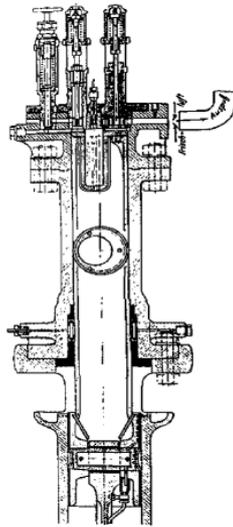


Figura 1.2.1. Primer motor ensayado por Rudolf Diesel. [1]

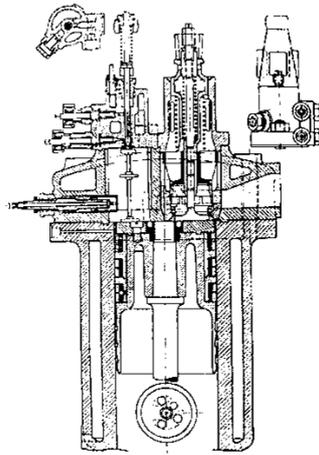


Figura 1.2.2. Cámara de combustión en la culata. [1]

En el año 1897, tras haber refinado el tipo de motor anterior aportándole dos válvulas separadas, cámara de combustión en el espacio entre la cabeza del émbolo y la culata, un émbolo hueco refrigerado por agua, segmentos en lugar de aceite a presión y lubricación del émbolo a través de una bomba, se consiguen consumos entre 238 y 278 gramos por caballo de vapor y hora (g/cv·h). Tras el exitoso consumo y la facilidad de arranque a través de aire comprimido, se unen las fábricas de Augsburg y Nuremberg con el nombre las dos de Maschinenfabrik, para formar la MAN para seguir trabajando en un motor comercial [1].

En 1898, debido a la experiencia en máquinas de vapor, Rudolf Diesel y la casa Sulzer se asocian para crear el primer motor diésel de la casa Sulzer [3][4]. En 1902, desarrollan en Sulzer un sistema de inversión de giro para motores de mayor potencia a través de un sistema de dos ejes de camones, uno para cada sentido de giro [1].

En 1898, la casa Burmeister & Wain (B&W) negocia con R. Diesel la fabricación de motores diésel en Dinamarca y, entre 1911 y 1912, el buque *Selandia*, con dos motores B&W de 1240 cv cada uno, fue entregado considerándose de los primeros buques que navegaban en alta mar propulsado por motores diésel [1][5]. Aunque existen registros que indican que ya existían buques propulsados por motores diésel, como el *Vandal* o el *Fritz*, este último con un motor MAN de doble efecto y 830 cv de potencia [1].

Debido a los problemas de la inyección neumática a carga reducida, se ideó el sistema donde una aguja que presionaba a una tobera por la acción de un resorte fuera capaz de abrir al recibir la presión de una bomba de combustible, siendo Akroyd-Stuart el inventor de ese sistema [1][6].

Robert Bosch diseñó una variante de bomba de inyección dotándola de un resalte o rampa helicoidal en el émbolo y permitiendo que la camisa de la bomba comunicase con la aspiración con el objetivo de poder regular el sobrante de combustible y, de este modo, el caudal enviado a la tobera [1]. Se puede ver el tipo de émbolo en la Figura 1.2.3, donde A es la ranura que comunica la zona de presión con la descarga a la aspiración, B es la sección donde se liberará el combustible sobrante y C es el resalte o rampa que regula la cantidad de combustible inyectado [6].

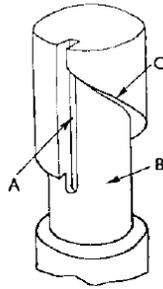


Figura 1.2.3. Émbolo de bomba de combustible. [6]

1.3 Motores de 2T lentos

Los combustibles de baja calidad, que son residuos de la refinación del petróleo, empezaban a ser utilizados por los armadores debido a su bajo precio. No es hasta los años 50 que, debido a la demanda de gasolina principalmente, se generaliza su uso. Los motores grandes de bajas revoluciones eran el principal propulsor para el fuelóleo pesado, debido a su capacidad de quemar casi completamente el combustible [1].

Ya desde los años 10 se incorpora en los motores el sistema de cruceta debido al aumento de la carrera y consecuente aumento del rendimiento mecánico [1][7]. Se puede ver en la Figura 1.3.1 que la construcción de motores lentos de 2T hasta los años '50 no han cambiado demasiado, a excepción de los motores de doble efecto.

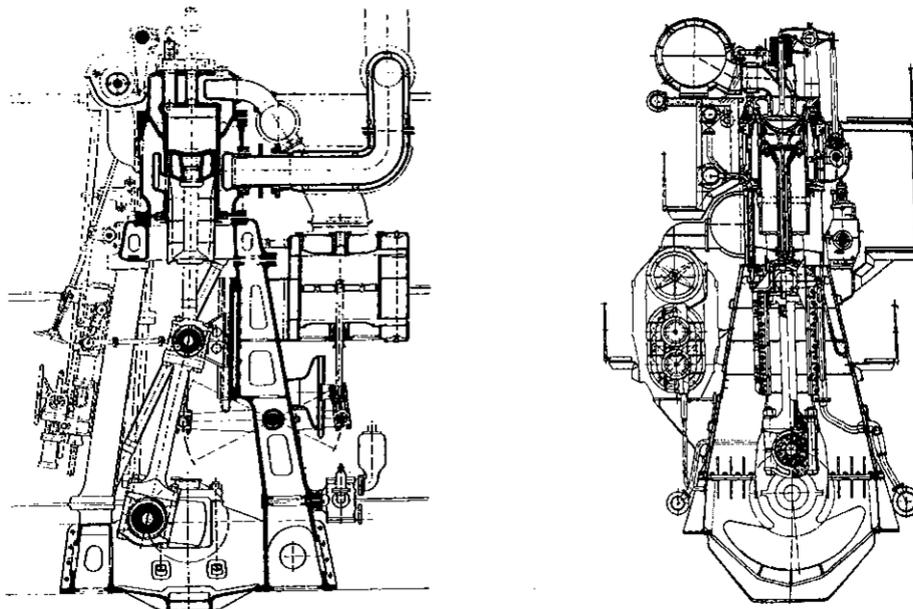


Figura 1.3.1. Izquierda: Motor de 2T para buque mercante de 1915, derecha: Motor B&W en 1955. [1]

Desde el punto de vista de la sobrealimentación, los motores de 2T que incluían para el barrido las soplantes tipo Roots pasaron a incorporar los turbocompresores mejorando

así el rendimiento debido a la utilización de la energía cinética de los gases de escape. El primer buque que montaba un motor B&W con este sistema fue el petrolero *Dorthe Maersk* en el año 1952 [1]. Con el paso de los años, los motores de 2T se fabricarían con mayor potencia debido a las prestaciones necesarias para la construcción de buques de mayor tamaño. Con la crisis del petróleo en la época de 1970, la importancia por reducir al máximo el consumo específico debido al precio del crudo hizo a los motores de lentos ganar amplio mercado frente a las turbinas de vapor [1].

1.4 Época moderna

A principios de los años 80, la compañía B&W es absorbida por MAN y, junto a Sulzer y Mitsubishi Heavy Industries, acaparan el mercado de los motores de grandes potencias en buques mercantes. Los motores de Sulzer de la serie RTA introducen la incorporación de la válvula de escape en la culata, como se puede ver en la Figura 1.4.1, mejorando el barrido gracias al sentido unidireccional del aire y dejando de utilizar las lumbreras de escape instaladas hasta ese momento [4].

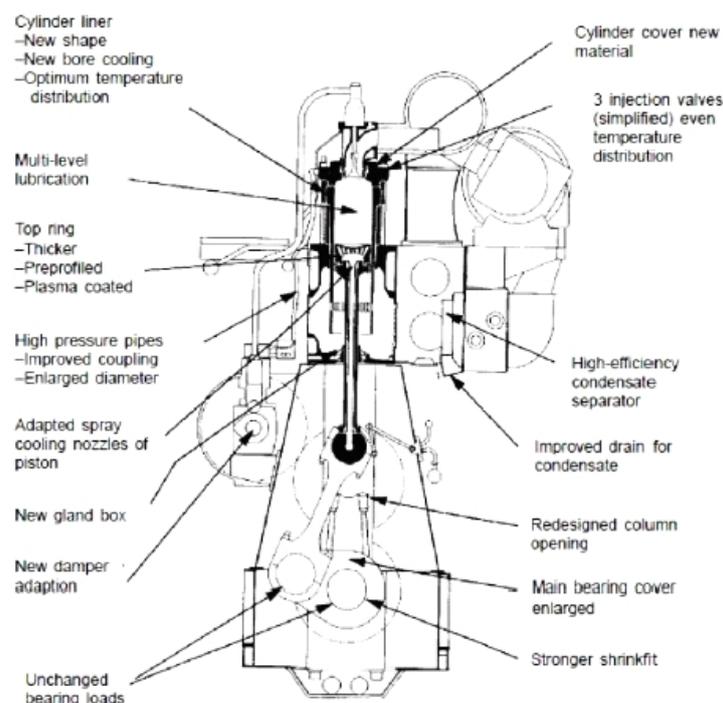


Figura 1.4.1. Motor Sulzer de la serie RTA. [4]

El fabricante de motores MAN B&W empezó a comercializar la serie MC, ver Figura 1.4.2, a partir de los años 80 y hasta mediados del año 2002, cuando presentan la serie

ME que controla electrónicamente la válvula de escape y el sistema de inyección [8][9]. En ese mismo año, Sulzer, que ya había sido absorbido por Wärtsilä, realiza un acuerdo junto a Mitsubishi Heavy Industries para trabajar en un motor con la serie RTA50 de base que contaría con control electrónico para la válvula de escape y el control de inyección basándose en el sistema de conducto común, más comúnmente conocido por “common-rail” y que se puede ver en la Figura 1.4.3 [4].

En el año 1994, en Japón se empezó a utilizar por la casa MAN B&W un concepto que se verá en capítulos posteriores, como es el de inyección de combustible gaseoso (GI, por sus siglas en inglés, Gas Injection), que se trata de una versión para la inyección tanto de combustible líquido como de gas en motores estacionarios. El uso del gas es debido a la utilización del *boil off gas* (BOG) en la propulsión de buques que transportan gas natural licuado (GNL) [10]. Sulzer en 1972 ya había lanzado el motor 7RNMD90, capaz de funcionar con gas natural (GN) en el buque *Venator* [11].

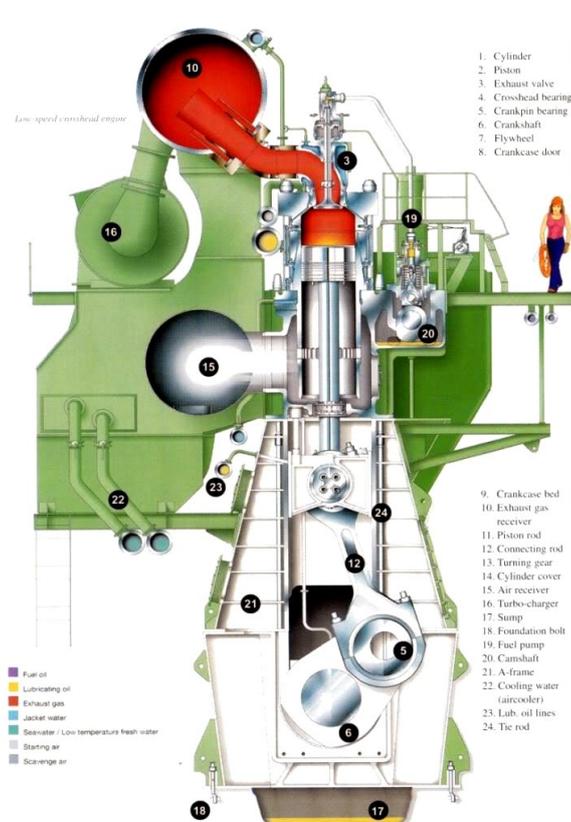


Figura 1.4.2. MAN B&W serie MC. [9]

A partir de las regulaciones de la Organización Marítima Internacional (OMI) y a través del Anexo VI de MARPOL, puesto en marcha en 2005 [12], los fabricantes empiezan a

desarrollar motores y sistemas para reducir los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2). Las mejoras sobre la eficiencia de los motores y el uso de combustibles alternativos de bajo contenido en carbono como pueden ser el GNL, el etanol o el gas licuado del petróleo (GLP), reducen la emisión de gases de efecto invernadero. En la actualidad este es el objetivo a conseguir por los fabricantes de motores navales.

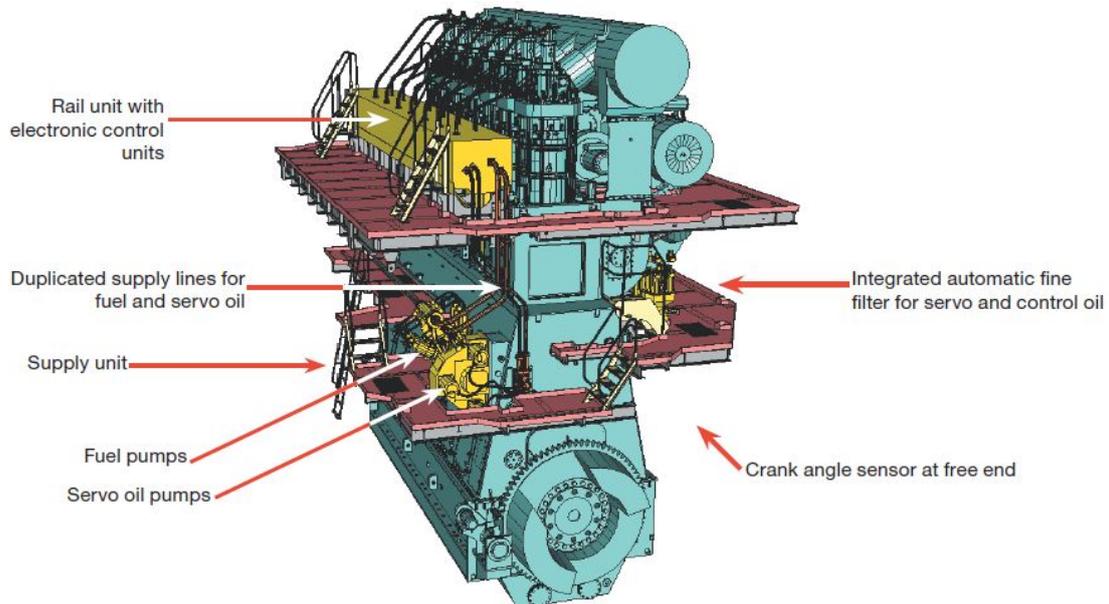


Figura 1.4.3. Principales elementos del sistema de conducto común Wartsilä-Sulzer serie RT-Flex. [13]

2 CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR COMBUSTIBLES FÓSILES

2.1 Introducción

La industria del transporte marítimo es responsable de entre el 2,5 % y el 3,5 % de las emisiones de CO_2 a nivel mundial. Siendo la OMI concedora de esta situación, ha elaborado diferentes escenarios para las emisiones de GEI de cara al año 2050, donde se prevé que el transporte marítimo sea responsable de entre un 50 % y un 250 % de crecimiento en comparación con el año 2008 [14][15]. Esto es normal debido al aumento de las necesidades de transporte de mercancías alrededor del mundo, siendo paralelo también al consumo de combustibles de origen fósil. Esto se puede ver en la Figura 2.1.1, donde el fuelóleo junto al gasóleo abarca casi al completo la demanda de combustibles para los buques.

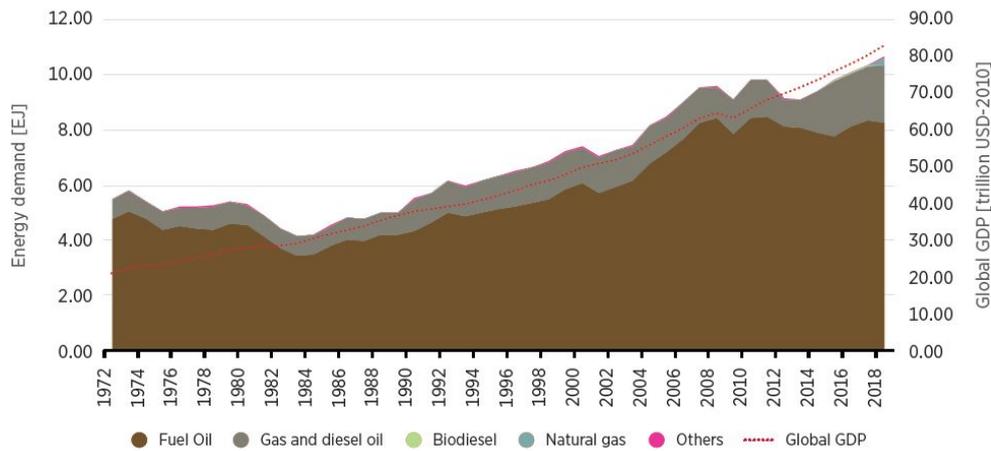


Figura 2.1.1. Demanda de energía en transporte marítimo mundial y producto interior bruto global. [14]

El transporte marítimo engloba alrededor de un 80% del intercambio mundial de mercancías, lo que lo hace esencial para el desarrollo de la sociedad. Este transporte se realiza a través de diferentes tipos de buques como pueden ser los portacontenedores o buques de carga a granel. En la Figura 2.1.2 se pueden comparar las emisiones de GEI producidas por diferentes tipos de buques, los cuales en su mayoría recorren grandes distancias para trasladar las mercancías que transportan. Este dato indica que las soluciones para este tipo de transporte deben ser eficientes, fiables, con autonomía suficiente para recorrer esas distancias y sin perjudicar los espacios de carga.

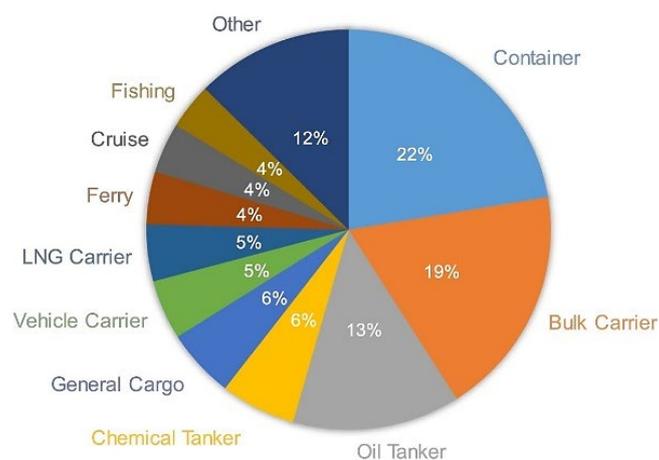


Figura 2.1.2. Emisiones de efecto invernadero por transporte marítimo a nivel global en el año 2015. [16]

2.2 Gases de efecto invernadero

El efecto invernadero producido por actividades humanas se produce debido a la emisión de gases a la atmósfera que afectan a la absorción, emisión y dispersión de la

radiación dentro de la tierra. El forzamiento radiativo o forzamiento climático indica la influencia de la alteración entre la radiación solar que incide en la tierra y la radiación infrarroja que emite la superficie a la atmósfera [17]. En la Tabla 2.2.1 se ve cómo el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) son los gases más nocivos en este sentido.

GAS	Vida media atmosférica (años)	Forzamiento radiativo (W/m^2) 1750-2005	Forzamiento radiativo (W/m^2) 1970-2000	Potencial de Calentamiento a 100 años
CO_2	Variable	1,66	0,67	1
CH_4	12	0,48	0,13	23
Óxido nítrico		0,16	0,068	296
CFC-11	45	0,066	0,053	4600
HFC-134a	14	0,004	0,004	1300
Pentano	0,010			
Etano	0,214			

Tabla 2.2.1. Contribuciones al forzamiento radiativo positivo de algunos GEI. [17]

El clima de la tierra depende enormemente del balance radiativo de la atmósfera, donde los GEI tienen la capacidad de absorber y reemitir las radiaciones de onda larga, las cuales son radiación infrarroja. El aumento de la temperatura terrestre se debe al ajuste del clima para contrarrestar los efectos de los GEI, dando lugar este aumento a otros cambios como la fusión del hielo polar, el aumento del nivel del mar y aumento de la frecuencia de eventos climáticos como huracanes o tormentas. Esto afecta en gran medida a la agricultura, a los ecosistemas o a la propia salud humana [17].

2.3 Óxidos de azufre (SO_x)

El grupo de lo que se conoce como óxidos de azufre lo conforman los trióxidos de azufre (SO_3) y los dióxidos de azufre (SO_2), siendo este último el más común. El dióxido de azufre se encuentra en forma de gas siendo incoloro, pero de un olor fuerte e incluso irritante.

Las fuentes antropogénicas de este gas provienen de las emisiones contaminantes de la combustión del carbón, petróleo o de los sectores de la metalurgia. El proceso que se lleva a cabo para la formación tiene lugar en las cámaras de combustión de los motores de combustión interna (MCI), reaccionando el azufre presente en los combustibles con el oxígeno aportado para la combustión, dando lugar al SO_2 [18].

2.3.1 Efectos sobre la salud de los SO_x

- SO₂ es un gas irritante y tóxico.
- Puede provocar ataques de tos, afectando a pulmones y tejidos mucosos.
- Irritación del tracto respiratorio, bronquitis, exacerbaciones asmáticas o paradas respiratorias tras la exposición a altas concentraciones.
- Si se combinan con otras partículas o humedad da lugar a ácido sulfúrico, provocando el efecto de la lluvia ácida con la consecuente destrucción de ecosistemas.

2.4 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

El grupo de los óxidos de nitrógeno está constituido por el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). El principal contaminante es el NO₂, un gas de color amarillento, tóxico e irritante. Es el precursor de la formación de nitratos y partículas en suspensión (PS) de diámetro inferior a 2,5 micrómetros.

Una de las fuentes de emisiones antropogénicas de los NO_x es la formación a altas temperaturas, sobre todo por encima de 1200 °C, en las cámaras de combustión de los motores de combustión interna. Se produce al oxidarse el nitrógeno y el oxígeno proveniente del aire. Otra fuente de formación es a través del nitrógeno contenido en combustibles como el fuelóleo y el exceso de oxígeno del aire[19][20].

2.4.1 Efectos sobre la salud y el medio ambiente de los NO_x

- Provoca enrojecimiento y quemaduras cutáneas graves.
- Edema pulmonar por exposición a elevadas concentraciones durante periodos cortos de tiempo.
- Efectos sobre el sistema inmunitario debido a largos periodos de exposición a altas concentraciones.
- Gran trascendencia en la formación de ozono por smog fotoquímico.
- Lluvia ácida tras la formación de ácido nítrico (HNO₃).

2.5 Partículas en suspensión (PS)

Las partículas en suspensión las categorizamos por ser corpúsculos sólidos o microgotas de tamaño reducido que se encuentran en el aire. La densidad de estas

partículas es mayor que la del aire pero, debido a efectos de cargas electroestáticas y su tamaño reducido, estas partículas no se depositan o tardan mucho en hacerlo [21].

Los tamaños se clasifican en PS10 o PS2,5 dependiendo de si son partículas de menos de 10 micras de diámetro o de menos de 2,5 micras. Se forman de manera natural a través de la rotura de materiales de origen mineral, actividad volcánica o polen. Las de carácter antropogénico, que son las más abundantes, se originan a raíz de las combustiones incompletas de los MCI, la combustión del carbón, la descomposición de neumáticos y otros fenómenos industriales.

2.5.1 Efectos sobre la salud de las PS

- Efectos sobre el sistema respiratorio.
- Las de menor tamaño llegan a la sangre pudiendo provocar dolencias cardiovasculares, cáncer de pulmón, ictus, etc.
- Reducción de la esperanza de vida debido a la exposición continua a altas concentraciones.

Se puede ver en la Figura 2.5.1.1 que, a causa de las PS2,5, la proporción media de defunciones en el año 2012 en España es del 10,7 % de las muertes totales y, en China, que es un país altamente contaminante, murieron en el 2012 casi 4 millones de personas por causas atribuibles a la contaminación por PS [22].

PAÍS	MUERTES TOTALES ANUALES	PROPORCIÓN MEDIA DE MUERTES (1)	Nº ANUAL DE MUERTES (2)
 España	418 063	10,7%	44 603
 Francia	562 481	17,3%	97 242
 Alemania	896 319	22,2%	198 569
 Estados Unidos	2 704 957	11,3%	355 483
 India	8 009 357	30,7%	2 458 384
 China	9 720 397	40,2%	3 910 916
 China (2018)	9 720 397	24,2%	2 355 579

(1) Atribuibles a la exposición a largo plazo a PM 2.5 generada por la quema de combustibles fósiles, promediada sobre el país o la región.

(2) Atribuibles a la exposición prolongada a PM 2.5 derivadas de la quema de combustibles fósiles.

Figura 2.5.1.1 . Muertes de personas >14 años por exposición a PS2,5 de combustibles fósiles (2012). [22]

3 NORMATIVA ANTICONTAMINACIÓN

3.1 Introducción

Las reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques entran en vigor el 19 de mayo de 2005 a través del Anexo VI del MARPOL. Estas reglas establecen los límites de las emisiones de SO_x y NO_x a través de los escapes de los buques. También se prohíben las emisiones de sustancias que puedan provocar un debilitamiento de la capa de ozono. Se incluyen zonas con mayor restricción como las *áreas de control de emisiones* (ECA, en inglés, Emission Control Area), donde se regulan a mayores las PS. En el año 2011, entra en vigor un capítulo que establece medidas técnicas y operacionales sobre la eficiencia energética en buques con carácter obligatorio. Estas medidas están dirigidas a reducir las emisiones de GEI [12].

3.2 Regulación de emisiones de NO_x y SO_x

La regulación de los SO_x viene dada por la cantidad porcentual de azufre en la composición del combustible, que para el fuelóleo pesado es del orden de 3,0 % y para el gasóleo marino es del orden del 0,1 % [23]. En el año 2020 ha entrado en vigor la regulación que restringe el contenido de azufre del combustible a nivel global a un valor inferior al 0,5 % mientras que ya era del 0,1 % en zonas ECA desde 2015. Los límites han variado en los últimos 25 años como muestra la gráfica de la Figura 3.2.1.

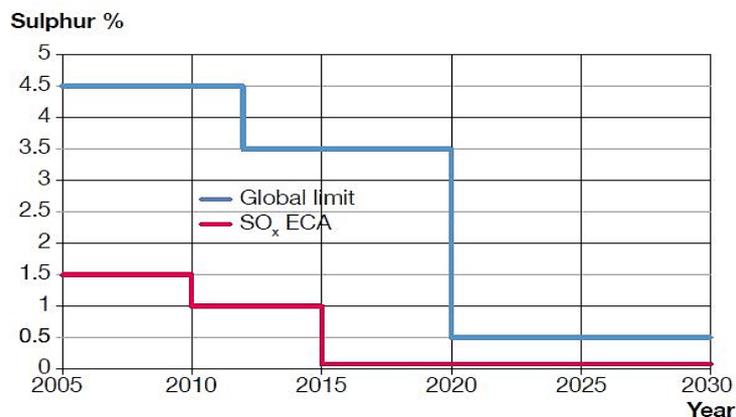


Figura 3.2.1. Límites para el contenido de azufre de los combustibles marinos. [23]

Otra solución, aparte del uso de combustibles con bajas cantidades de azufre en su composición, es el tratamiento de gases de escape en torres de lavado. Estos sistemas permiten el uso de combustibles con más azufre al retener los SO_x y las PS.

Los NO_x han sido regulados a través los niveles I, II, III (Tier). El nivel I fue puesto en marcha con la entrada del Anexo VI en 2005, aplicándose a buques con más de 130 kW de potencia instalados en o después del año 2000 con carácter retroactivo [24]. El nivel II entra en función para los buques construidos después de 2011 con aplicación a escala mundial a excepción de las zonas ECA, en las que se aplica el nivel III a partir del año 2016. Se puede ver la cantidad de emisiones en la Figura 3.2.2.

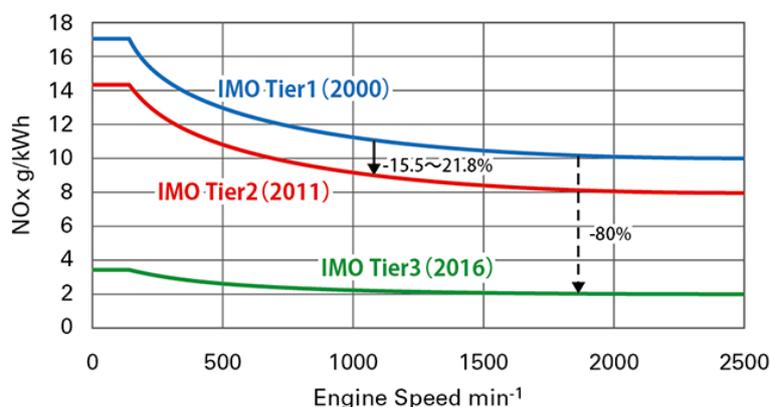


Figura 3.2.2. Niveles de regulación NO_x. [25]

Las zonas ECA, las fechas de adopción y los contaminantes se detallan en la Tabla 3.2.1.

Zonas Especiales	Contaminante	Adopción	Entrada en vigor	Con efecto desde
Mar Báltico	SO _x	26 sep 1997	19 may 2005	19 may 2006
Mar del norte	SO _x	22 jul 2005	22 nov 2006	22 nov 2007
Norteamérica	SO _x PS	26 mar 2010	1 ago 2011	1 ago 2012
	NO _x	26 mar 2010	1 ago 2011	2016
Mar del Caribe (EU)	SO _x PS	26 jul 2011	1 ene 2013	1 ene 2014
	NO _x	26 jul 2011	1 ene 2013	2016

Tabla 3.2.1. Zonas ECA y fechas de adopción, entrada en vigor y efecto. [26]

Para solucionar el problema de los NO_x, las empresas han optado por sistemas como la *recirculación de gases de escape* (EGR), o la *reducción catalítica selectiva* (SCR) [23].

La primera solución (EGR) se trata de un sistema que renueva con parte de los gases de escape el aire de barrido, lo que afecta a la capacidad calorífica de la zona de combustión, que como resultado disminuye la temperatura de la cámara provocando la disminución en la formación de los NO_x.

La segunda solución (SCR) se basa en la instalación de un postratamiento para los gases de escape que, a través de reacciones químicas con urea (CH₄N₂O), transforma los NO_x en agua (H₂O) y nitrógeno (N₂). Este proceso se puede ver en la Figura 3.2.3.

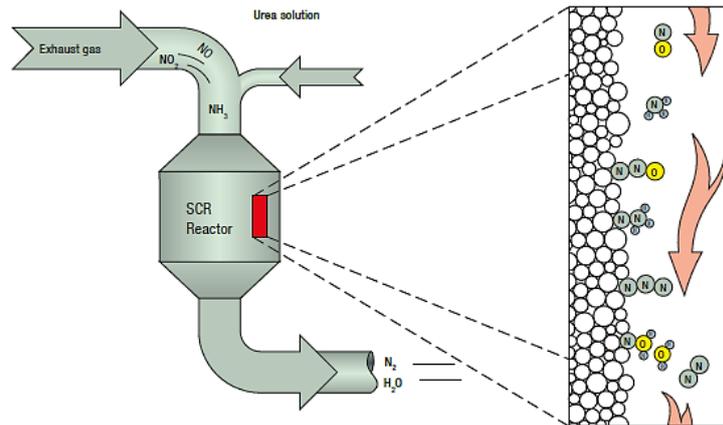


Figura 3.2.3. Reductor catalítico selectivo (SCR). [27]

3.3 Eficiencia energética

Para reducir la contaminación producida por los GEI, la OMI ha desarrollado unos mandatos como son el *Energy Efficiency Design Index* (EEDI), el *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP), el *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) y el *Energy Efficiency Operational Indicator* (EEOI)[14][23].

3.3.1 EEDI

La regulación sobre el EEDI se puso marcha en el año 2011, entrando su fase 0 en el año 2013 como se puede ver en la Figura 3.3.1.1. Este índice fue desarrollado para obligar a las empresas desarrolladoras de motores a diseñar motores con mayor eficiencia energética, además de aumentar la eficiencia en otro tipo de maquinaria utilizada en los buques. Los mínimos requeridos para diferentes buques se ven influidos por el tipo de buque y el tamaño de éste [14].



Note: Time period refers to 1 January of the starting year to 31 December of the end year.

Figura 3.3.1.1. Fases de EEDI, periodos de implementación y objetivos de reducción. [14]

Las reducciones están basadas en la comparación con la media de eficiencia de los buques construidos entre el año 2000 y el 2010, dando lugar así a una reducción progresiva en los buques construidos en cada fase. El EEDI se puede expresar como las

emisiones relativas de CO₂ entre los beneficios del transporte (tonelada y milla). Se puede aplicar la ecuación (3.3.1.1), más práctica que la real Figura 3.3.1.2 [23].

$$EEDI \approx \frac{CO_2}{\text{Beneficio del transporte}} \approx \frac{\sum P \cdot C_F \cdot SFC}{\text{Capacidad} \cdot V_{ref}} \quad (3.3.1.1)$$

MAIN ENGINE EMISSIONS	AUXILIARY ENGINE EMISSIONS	SHAFT GENERATOR / MOTOR EMISSIONS	EFFICIENCY TECHNOLOGIES
$\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{l=1}^{nME} P_{ME(l)} \cdot SFC_{ME(l)} \cdot C_{FME(l)} \right)$	$+ (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})$	$\left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{l=1}^{nFTI} P_{FTI(l)} - \sum_{l=1}^{nEff} f_{eff(l)} \cdot P_{AE(l)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)$	$- \left(\sum_{l=1}^{nEff} f_{eff(l)} \cdot P_{eff(l)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)$

Figura 3.3.1.2. Ecuación EEDI. [23]

Donde la P es la potencia, C_F es el contenido de carbono del combustible y el SFC (Specific Fuel Consumption) es el consumo específico de combustible. Estos parámetros se tienen que reducir para provocar una disminución en el índice. Los parámetros que se encuentran en denominador son la capacidad de carga y la velocidad del buque. La manera de reducir éste es a través de estas técnicas [23]:

- Combustibles alternativos con menos contenido en carbono
- Reducción de la velocidad del buque
- Reducción de la potencia requerida
- Disminución del consumo específico (generador de cola, recuperadores de calor residual, etc)
- Incremento de la capacidad de carga del buque manteniendo el desplazamiento total.

3.3.2 SEEMP

El SEEMP es un plan de medidas que otorgan herramientas a los armadores para ayudar a implementar de manera económicamente viable las medidas de aumento de la eficiencia en los buques [14]. Consta de cuatro etapas cíclicas, las cuales son:

- Planificación
- Implementación
- Monitorización
- Autoevaluación y mejora

3.3.3 EEXI

El EEXI es un indicador aplicable a los buques ya existentes que tendrá como objetivo implementar nuevas técnicas de mejora a nivel energético durante toda la vida útil del buque. Este indicador será la comparación del índice actual con el índice obtenido cuando el buque fue construido. La implementación de este índice se establece a partir del EEDI y la OMI tiene pensado que se aplique a partir del año 2023 [14].

3.3.4 EEOI

Este indicador fue introducido en el año 2013 con uso de carácter voluntario, siendo una herramienta indispensable para el SEEMP. Ofrece obtener información sobre la eficiencia sobre los combustibles a los operadores de los buques, y proporcionar indicaciones sobre diferentes operaciones que influyen en la eficiencia energética del buque. Un ejemplo de estas operaciones puede ser el de incrementar la frecuencia de la limpieza de la hélice o instalar recuperadores de calor residual. Este indicador se expresa en CO₂ por tonelada milla [14].

4 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

4.1 Introducción

Otra de las medidas para reducir las emisiones de GEI es la utilización de combustibles que o bien no contengan en su composición carbono, o su porcentaje sea menor comparado con combustibles como el fuelóleo. Además, es corriente que estos combustibles reduzcan las emisiones de otros contaminantes como los SO_x o NO_x.

4.2 Biodiesel

El biodiesel puede llegar a ser un buen sustituto de los derivados del petróleo, haciendo de puente para la transición energética debido a su origen. Procedente en su mayoría de origen vegetal, tal como la biomasa procedente de los árboles, es considerado como un combustible renovable debido a que se extrae de una fuente que se puede regenerar y es infinita [15].

Este combustible se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente, lo que lo hace fácil de transportar y almacenar. Entre otras características que lo hacen ideal

para sustituir eventualmente a los combustibles derivados del petróleo, es que no contiene azufres en su composición y puede ser usado por la mayoría de los motores que existen en la actualidad [28].

4.3 Gas natural licuado (GNL)

El gas natural licuado es un combustible que contiene alrededor de un 95 % de metano en su composición, que es el hidrocarburo cuya fórmula es CH_4 . Como se puede comprobar a través de su fórmula, emite muchos menos GEI al ser utilizado en la combustión [15]. Se puede obtener a partir de reservas fósiles o a través de residuos orgánicos a través de un proceso anaeróbico. Este gas se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente.

En la industria naval, se lleva utilizando durante décadas el BOG generado en el transporte de gas licuado que se encuentra a $-162\text{ }^\circ\text{C}$. Uno de los problemas que se genera con la utilización de GNL es el llamado “deslizamiento del metano” [29] consistente en la fuga de CH_4 no quemado en la combustión o liberado en el almacenamiento o línea de suministro al motor. Esto tiene su gravedad debido a su potencial de calentamiento global (PCG), que es de 23 comparado con el CO_2 .

La producción de gas natural sintético (GNS), aún muy escasa, puede resultar en una ayuda importante para combatir los GEI. A través de procesos de hidrólisis del agua y posterior “metanización” de CO_2 capturado, se obtiene el GNS. La energía necesaria debe ser proporcionada por fuentes de origen renovable [30].

4.4 Gas licuado del petróleo (GLP)

El GLP es un combustible formado por una mezcla de gases licuados derivados del petróleo, como son el butano y el propano en gran medida [31][32]. En el Anexo. 1 se pueden ver algunas de las propiedades del GLP, como la temperatura de licuefacción a presiones atmosféricas. También es almacenable a temperatura ambiente en tanques a presiones de 17 bar. La producción de GLP a nivel mundial en 2015 fue de 284 millones de toneladas, lo que lo hace un combustible con alta producción y suministro a nivel mundial [32].

En cuestión de emisiones, el gas licuado del petróleo tiene entre un 13 % y 18 % menos de CO₂ en comparación con los combustibles convencionales [33], un poco menos que el GNL pero, si tenemos en cuenta el “deslizamiento del metano”, el GLP iguala en GEI al GNL tras la combustión.

La densidad energética de este combustible es mayor que la del GNL y por tanto lo hace muy buen combustible para la industria naval, sin contar que debido a su índice de octano lo hace ideal para motores de ciclo Otto. Sin embargo, las diferencias de rendimiento térmico con el ciclo Diesel, de alrededor de un 30 %, hacen que su proyección este enfocada a los motores de combustible dual (DF) [31].

4.5 Etanol

El etanol o alcohol etílico es un combustible elaborado mediante la fermentación y la destilación de biomasa. Este combustible se conserva líquido a temperatura ambiente debido a su temperatura de ebullición de 78 °C. El poder calorífico del etanol es de 28 MJ/kg, un poco superior a la mitad del poder calorífico del GNL a temperatura de licuefacción a 1 bar, que es de 50 MJ/kg. Aunque la densidad energética del GNL sea superior, su volumen relativo de almacenamiento también es superior debido a los aislamientos para conservar la temperatura [34] como muestra la Figura 4.5.1.

La contaminación producida en el ciclo de vida del etanol producido de azúcar o maíz es menor que la producida por otros combustibles, como puede ser el gasóleo marino o el GNL con deslizamiento, debido a las fuentes de producción renovable, pudiéndose ver en la gráfica comparativa de la Figura 4.6.1.

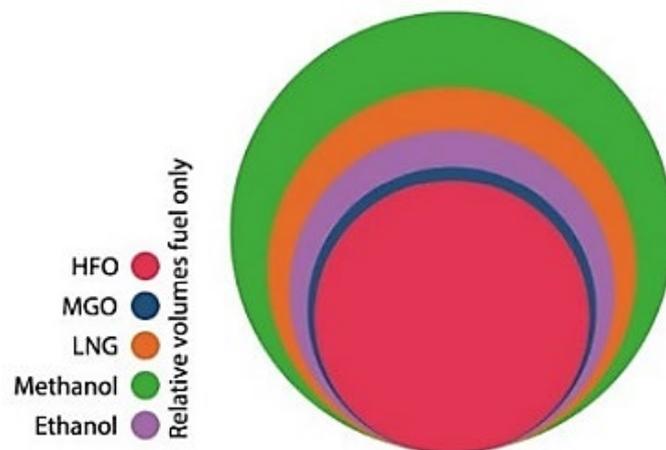


Figura 4.5.1. Volúmenes relativos de almacenamiento de combustibles según densidad energética. [34]

4.6 Metanol

El metanol o alcohol metílico, cuya fórmula es CH_3OH , está presente en vegetales, frutas y alimentos fermentados. Se utiliza como aditivo para gasolinas y para la producción de biodiesel. A temperatura ambiente y presión de 1 bar se mantiene en estado líquido y, junto a su baja viscosidad, lo hace un combustible fácilmente almacenable y transportable [15][34][35]. Es el combustible con mayor porcentaje de moléculas de hidrógeno por carbono en su composición, encontrándose en estado líquido en condiciones normales. El GNL también dispone de altos porcentajes de hidrógeno, pero se tiene que mantener a temperaturas criogénicas.

Las emisiones de CO_2 en su ciclo de vida se pueden ver en la Figura 4.6.1.

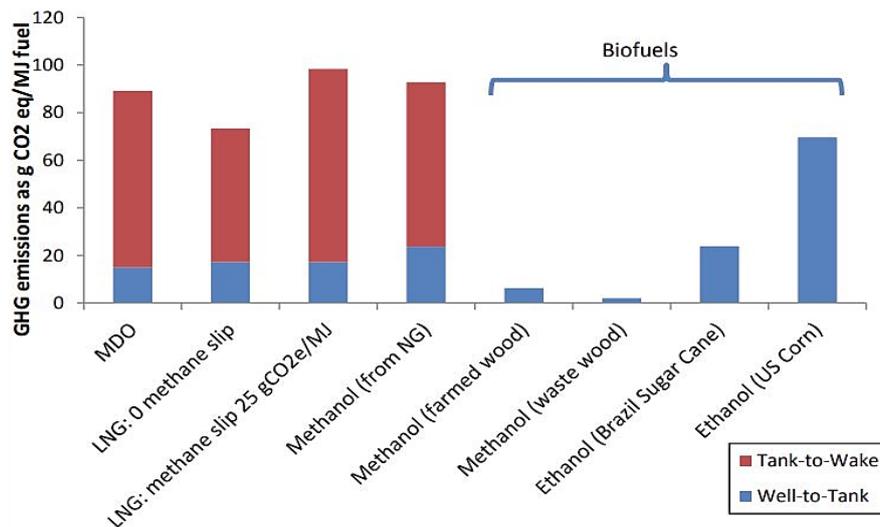


Figura 4.6.1. Emisiones de CO_2 en el ciclo de vida de distintos combustibles. [34]

Sus bajas temperaturas de combustión hacen que este combustible forme menos NO_x en los motores de ciclo Otto [15], con lo que los buques que lo utilicen pueden cumplir con las normativas de emisiones. La utilización de metanol en los motores 2T requiere de técnicas para reducir las temperaturas. La sociedad de clasificación American Bureau of Shipping (ABS) ha publicado una guía que proporciona criterios de clasificación para el uso de metanol y etanol a bordo del buque con el objetivo de reducir posibles riesgos para el buque, sus elementos y la tripulación a bordo [36].

Una de las desventajas más grandes reside en que actualmente la producción de metanol se realiza a través de la conversión catalítica entre el CO y el H_2 durante el reformado del gas natural o la gasificación del carbón, como se ve en la Figura 4.6.2.

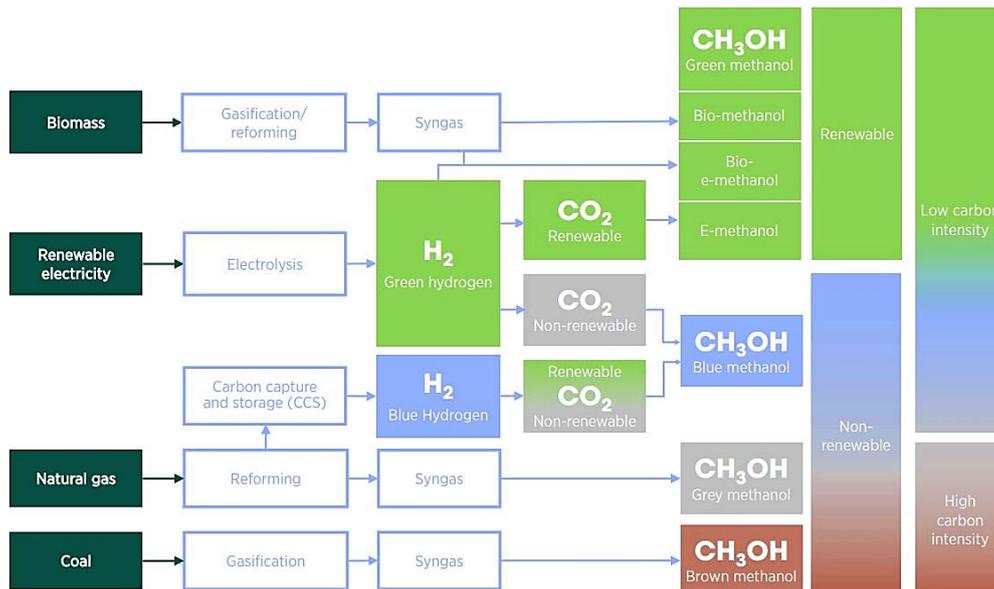


Figura 4.6.2. Métodos de producción del metanol. [35]

La solución más conveniente para este combustible es el E-metanol, que consiste en la síntesis del hidrógeno producido por electrolisis a través de fuentes renovables y el CO_2 capturado de muchos de los sectores industriales a nivel mundial [30].

4.7 Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento químico que forma una molécula diatómica que conocemos como H_2 . Este elemento lo podemos encontrar en todo el planeta formando la molécula de agua y en la mayoría de los compuestos orgánicos, donde se encuentra asociado a carbono.

La producción del hidrógeno se puede realizar por medio de diferentes procesos como puede ser la conversión química, que es la más utilizada para formar H_2 a partir del reformado del gas natural. También existen otros procesos como el de fermentación, termólisis, o electrolisis, siendo este último el que se realiza a través de fuentes de energía renovable para formar el hidrógeno verde [37].

El proceso de la electrolisis se basa en aplicar una corriente eléctrica sobre un seno de agua en fase líquida o fase vapor para disociar las moléculas de hidrógeno y oxígeno que componen la molécula de agua. Este proceso puede ser llevado a cabo a través de excedentes de energía eléctrica en fuentes de producción renovables como la eólica.

El hidrógeno directamente utilizado como combustible en motores tiene sus desventajas, como puede ser el almacenamiento a presiones o temperaturas extremas apreciándose en la Tabla 4.7.1, o la baja eficiencia gravimétrica. A pesar de ello, este combustible cuenta con dos ventajas: que genera emisiones nulas de CO₂ y que es un combustible que se genera a partir de agua.

Otra manera de utilizar el hidrógeno como vector energético es a través de la síntesis de e-combustibles, como el metanol y el amoníaco, ambos con procedencia del hidrógeno de fuentes renovables.

	Limitación	Eficiencia Energética	Eficiencia Gravimétrica	Eficiencia Volumétrica	T (°C)	p (bar)
Comprimido	Seguridad- Altas presiones	93%	5-10%	20 H ₂ kg/m ³	Temperatura ambiente	800
Licuada	Seguridad- Temperaturas criogénicas, pérdidas por evaporación, consumos de energía elevados	70%	8-25%	20-50 H ₂ kg/m ³	-252	1
Hidruros Metálicos	Pesados. Altos costes, tiempos de recargas	80%	2-7%	10 H ₂ kg/m ³	Temperatura ambiente	30
Líquidos orgánicos portadores de hidrógeno	Reusabilidad limitada por el tiempo de carga del líquido	70%	5-10%	30 H ₂ kg/m ³	Temperatura ambiente	30

Tabla 4.7.1. Diferentes formas de almacenamiento del hidrógeno. [38]

Diferentes empresas están desarrollando motores de 2T y 4T para la utilización de hidrógeno en ciclos Otto y ciclos Diesel.

4.8 Amoniaco

El amoníaco, de fórmula NH₃, contiene cero moléculas de carbono y de azufre. Por lo tanto, en la combustión del amoníaco no se emiten partículas de efecto invernadero. En el ciclo de vida del amoníaco proveniente de fuentes de energías renovables se generan también cero partículas de carbono [39].

Por lo general, la producción se realiza a través del proceso de Haber Bosch, que consiste en sintetizar moléculas de hidrógeno con moléculas de nitrógeno a través de un catalizador de hierro a altas presiones y temperaturas [15]. El nitrógeno se obtiene de la separación del aire y el hidrógeno de la electrólisis del agua si es de fuentes renovables. En el Anexo. 1 se pueden observar algunas de las características del amoníaco, como el almacenamiento a presiones de 1 bar y $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, o 8,6 bar y $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que lo hace almacenable y transportable fácilmente, teniendo en cuenta la corrosividad. La proporción de tamaño para un tanque de amoníaco es de 2,4 veces la que se necesitaría para un combustible como el gasóleo marino.

El amoníaco es un combustible que no genera explosiones debido a los rangos de inflamabilidad y su velocidad de llama es muy lenta, lo que lo hace muy seguro a nivel incendios, si bien hay que tener en consideración que es un combustible tóxico aunque fácilmente detectable a través del olor [15].

Los costes de producción que se prevén sobre el amoníaco se reflejan en la Figura 4.8.1, donde se puede ver que la proyección es de reducir los costes del amoníaco renovable hasta el rango de 125-75 USD/MWh, lo cual lo hace económicamente viable para gran parte de los armadores con el fin de alcanzar los objetivos de emisiones [14].

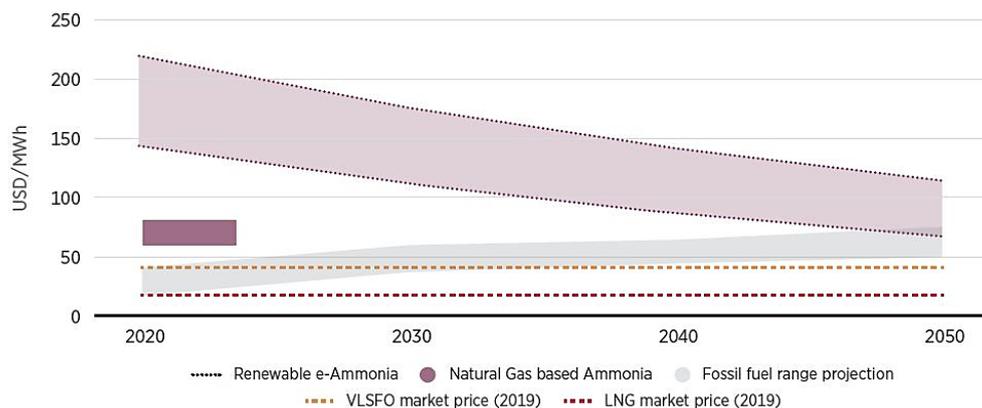


Figura 4.8.1. Previsión de los costes de producción del amoníaco. [14]

La producción del H_2 es más barata que la del amoníaco debido a los procesos llevados a cabo para la formación del segundo, pero si se tienen en cuenta los costes de transporte y almacenamiento, el amoníaco toma ventaja respecto a su competidor más cercano en lo que a niveles de carbono en su composición se refiere.

4.9 Etano

El etano, de fórmula C_2H_6 , se encuentra en estado gas a presión y temperatura ambiente y en estado líquido a temperaturas de $-88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ o inferiores. Se encuentra en el gas natural en proporciones que varían entre el 0,6 % y el 7,7 % en volumen, es decir, el segundo más abundante tras el metano. En muchas ocasiones el etano se desecha por su alta producción, como se ve en la Figura 4.9.1, usándose mayormente como etileno en plásticos [32][40].

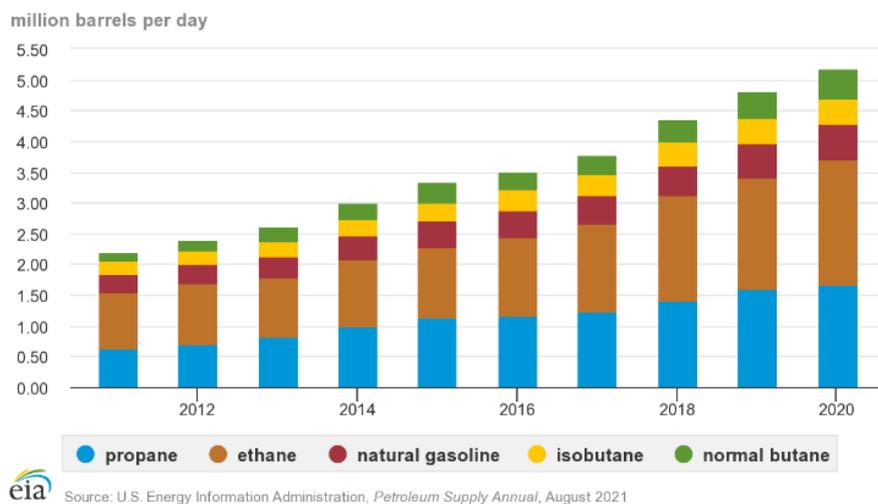


Figura 4.9.1. Producción en EE.UU de diferentes gases derivados del GN en el periodo 2011-2020. [32]

Está poco extendida la aplicación como combustible debido a su uso para la producción de etileno, pero el aumento de producción y su alta densidad energética (ver Anexo. 1) lo hacen un combustible a tener en cuenta en la industria del transporte marino. El buque *Navigator Aurora* de la Figura 4.9.2, fue adaptado para uso de gas etano licuado (GEL) en el año 2018, propulsado por un motor MAN B&W 6S50ME-C8.2-GI que ha iniciado la serie de motores de inyección de etano (GIE) [41] que se tratará en el apartado 6.2.



Figura 4.9.2. Buque "Navigator Aurora". [41]

5 SISTEMAS DE INYECCIÓN EN MOTORES DIESEL LENTOS

5.1 MAN B&W ME-C

El fabricante MAN B&W comenzó a comercializar la serie ME en el año 2002, que significa que se controla la inyección de forma electrónica para así mejorar la eficiencia, siendo la clase ME-C denominada como “compact”, donde se controla la válvula de escape también de forma electrónica. En esta serie de motores existen ciertos elementos hidráulicos necesarios para la inyección de combustible. Para los motores de las series ME-LGI, ME-GI y ME-GA también se necesitan estos elementos debido a la inyección de combustible piloto que inicia la combustión. En la versión 10 (mk10) se incorpora el inyector-bomba hidráulico (FBIV), que se comentará en el apartado 6.2.1 [42]. En la Figura 5.1.1 se listan los nuevos elementos de la serie ME.

- **Hydraulic Power Supply (HPS)**
- **Hydraulic Cylinder Unit (HCU)**
- **Engine Control System (ECS)**
 - Starting air valves
 - Start and Reversing sequences
 - Governor function
 - Auxiliary blowers
 - Electronically Profiled Injection (EPIC)
 - Exhaust valve actuation
 - Cylinder lubrication (ACC)
- **Exhaust valve**
- **Crankshaft position sensing system**
- **Local Operation Panel (LOP)**

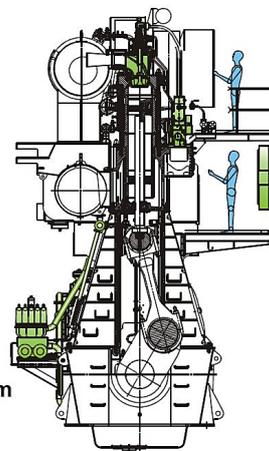


Figura 5.1.1. Componentes diferenciadores de la serie ME de MAN B&W. [43]

5.1.1 Fuente de energía hidráulica (HPS)

El sistema HPS proporciona la presión necesaria de aceite auxiliar o servoaceite para la inyección de combustible y para la actuación de la válvula de escape [8][44][45]. Este sistema se encuentra en la parte frontal o central del motor (según el número de cilindros) acoplado al motor a la altura de la bancada. Consta de estos elementos:

- Filtro de disparo automático de 6 micras
- Filtro auxiliar de apoyo de 25 micras
- Bloque de acumuladores hidráulicos
- Bombas hidráulicas de pistones acopladas
- Bombas hidráulicas eléctricas para el arranque

Se pueden ver en la Figura 5.1.1.1 los distintos elementos contenidos en el HPS.

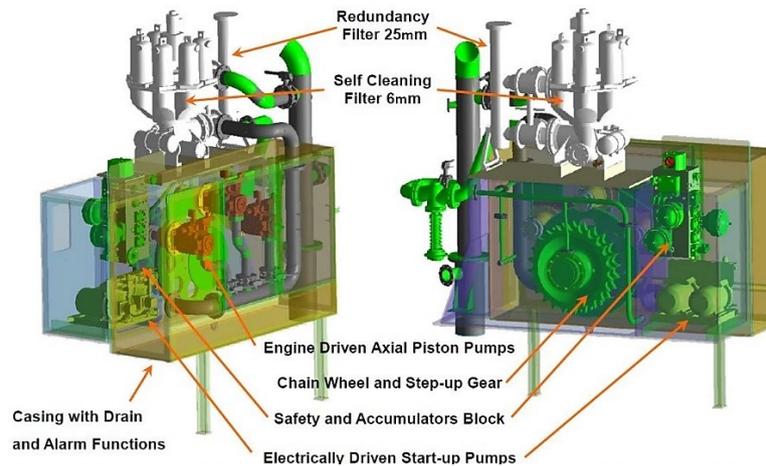


Figura 5.1.1.1. Fuente de energía hidráulico (HPS). [43]

Este sistema proporciona aceite hidráulico a la unidad hidráulica de cilindro (HCU) a través de tuberías de doble pared y presiones de más de 250 bar. La bomba de pistones está controlada por el sistema de control integrado, variando así el caudal de aceite.

5.1.2 Unidad hidráulica de cilindro (HCU)

Existe una HCU para cada cilindro compuesta por los elementos de la Figura 5.1.2.1:

- Bomba de inyección (elevadora de presión de combustible)
- Actuador de la válvula de escape
- Acumulador hidroneumático de membrana
- Lubricador de cilindro
- Bloque de distribución de aceite hidráulico
- Válvula de control para inyección y escape (FIVA)

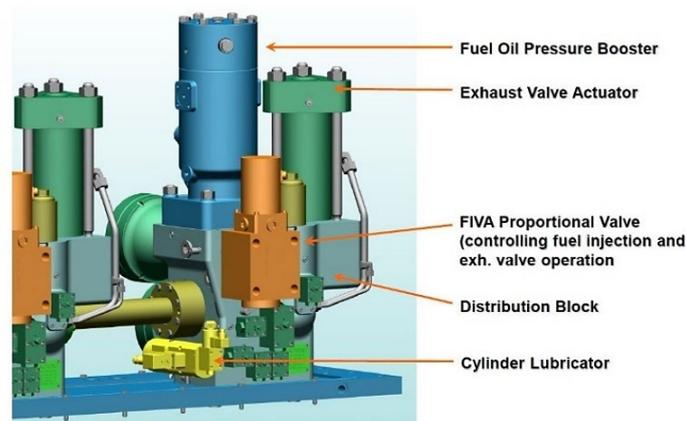


Figura 5.1.2.1. Hydraulic Cylinder Unit. [43]

La bomba de inyección (elevadora de presión de combustible) consiste en un émbolo que es empujado por el aceite hidráulico proveniente de la HPS. Su actuación está controlada por la FIVA o por la válvula electrónica de inyección de combustible (ELFI). Esta válvula proporcional de control electrónico es a su vez controlada por la unidad de control de cilindro (CCU) esclavo del sistema de control del motor (ECS) [44].

Con la ayuda de la Figura 5.1.2.2 se explica el funcionamiento del sistema HCU:

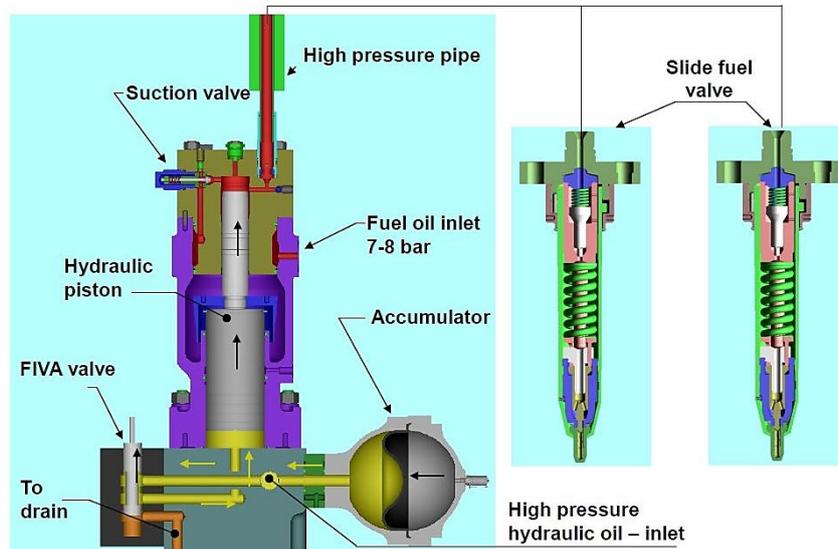


Figura 5.1.2.2. Bomba elevadora de presión de combustible y válvulas de inyección. [46]

- 1) En el acumulador de aceite hidráulico se alcanzan presiones de alrededor de 300 bar, siendo el acumulador necesario para suministrar presión a la bomba en los tiempos de inyección.
- 2) Con la ayuda del tacómetro que indica al ECS la posición del eje cigüeñal, la FIVA actúa abriendo o cerrando el paso al aceite hidráulico del acumulador.
- 3) La posición de la válvula FIVA está monitoreada igual que la posición del émbolo para que sea posible controlar los tiempos de inyección.
- 4) En la Figura 5.1.2.3 se puede ver cómo el 1 es el control de la posición de la FIVA y el 2 es la posición del émbolo, pudiendo controlar la duración de la inyección entre 50 y 100 milisegundos (ms).
- 5) La preparación de la inyección viene dada por la válvula de aspiración antirretorno que es la encargada de asegurar el relleno de combustible en la bomba, el cual proviene del sistema de suministro de fuelóleo o gasóleo a una presión de 7-8 bar.

- 6) Una vez el CCU alimenta a la válvula solenoide que controla la FIVA, el canal de la parte baja del émbolo se rellena de servoaceite a 300 bar lo que provoca que el émbolo presurice el combustible a inyectar hasta unos 1000 bar.
- 7) Cuando el émbolo se ve arrastrado hacia arriba, cierra el orificio de llenado de la bomba y presuriza al combustible para elevar la aguja de su asiento en la válvula de inyección, superando la presión ejercida por el resorte e inyectando el combustible por los orificios de la tobera que se atomiza rápidamente.
- 8) Una vez terminada la inyección de combustible, el CCU comanda la válvula solenoide que controla la FIVA y cierra el canal de entrada de servoaceite a la cámara baja del émbolo, redirigiendo el flujo hacia el canal de drenaje.
- 9) El émbolo por lo tanto se desliza hacia la parte inferior abriendo el canal de llenado de combustible, y el aceite hidráulico proveniente del HPS presuriza los acumuladores de membrana.

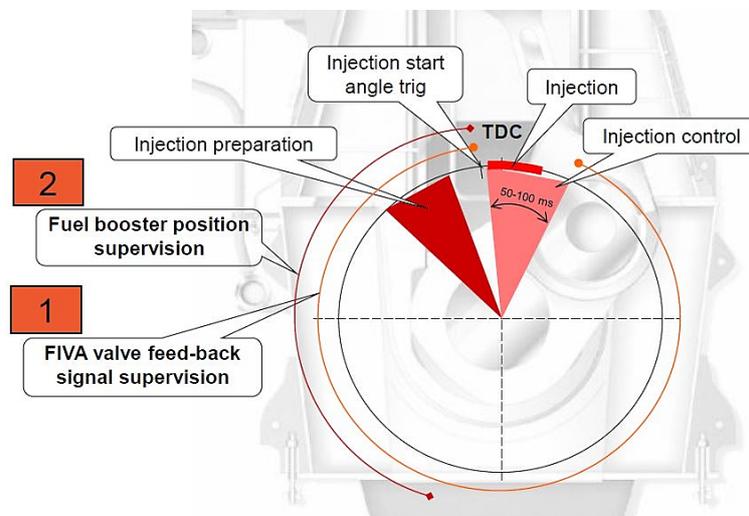


Figura 5.1.2.3. Supervisión y tiempos de actuación de la FIVA. [46]

Este sistema permite modificar los tiempos de inyección y la cantidad de combustible a inyectar en la cámara de combustión, lo que genera reducciones en el consumo de combustible a baja carga del motor, y posibilita una reducción de los NO_x al tener la posibilidad de inyectar en dos fases el combustible evitando generar grandes presiones en el cilindro que hagan aumentar la temperatura de éste. En la Figura 5.1.2.4 se puede observar que existen diferentes modos de operación dependiendo de si queremos navegar en zonas donde las emisiones de NO_x están restringidas, como las ECA, o en navegación en mar abierto para reducir los consumos específicos. [8][47]

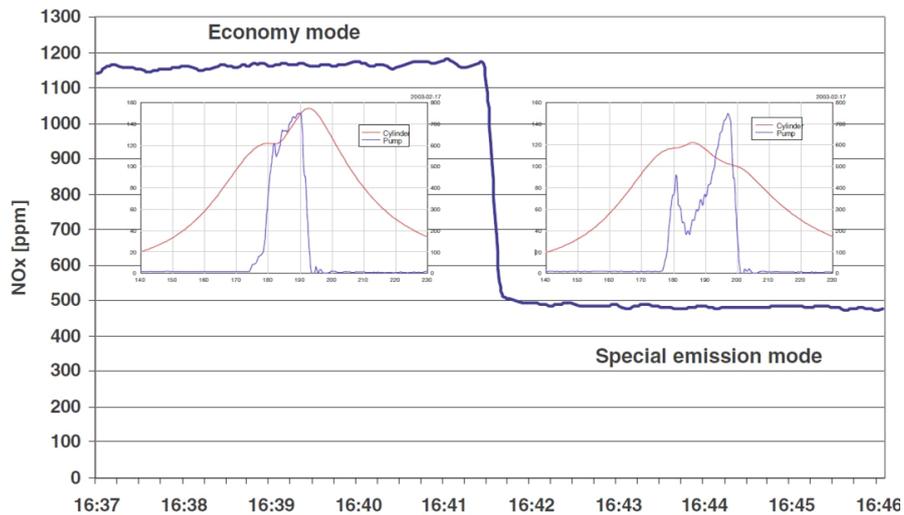


Figura 5.1.2.4. Diferentes modos de inyección en el motor MAN B&W serie ME.

Linea roja: Presión en el cilindro - Linea azul: Presión de inyección. [45]

5.2 Wärtsilä RT-Flex/ WinGD X

El sistema de combustible utilizado por los motores Wärtsilä con las series RT-Flex y WinGD X es un sistema de inyección de acumulador o conducto común (common-rail) que, gracias al control electrónico, es muy flexible a la hora de la inyección [13][48].

Existe una evolución desde los primeros sistemas hasta los últimos modelos en los sistemas de inyección de Sulzer, Wärtsilä y ahora Winterthur Gas & Diesel (WinGD).

Esto se puede ver en la Figura 5.2.1.

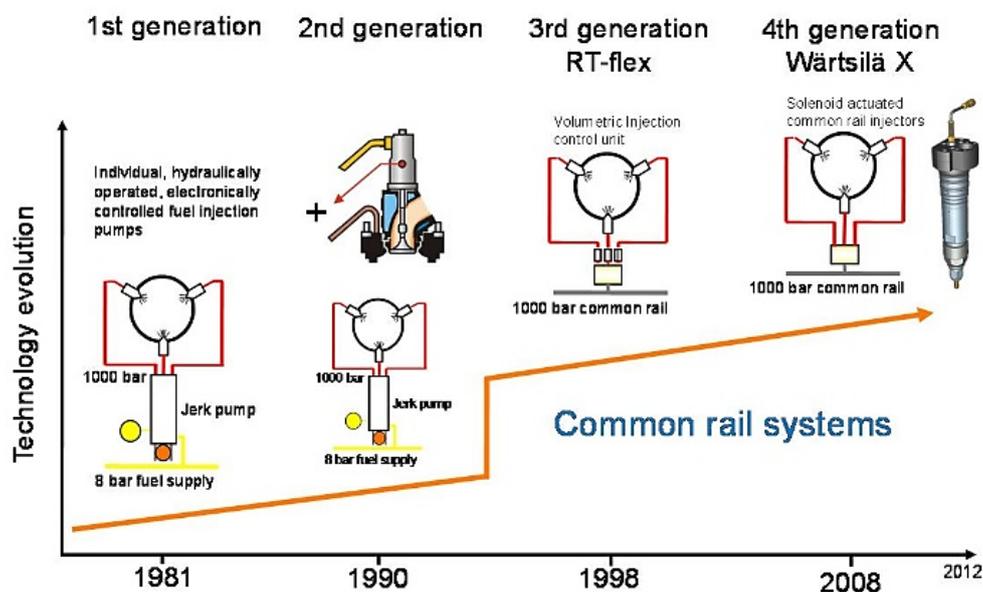


Figura 5.2.1. Evolución de los sistemas de inyección de Sulzer y Wärtsilä durante los últimos 30 años. [48]

Como muestra la Figura 5.2.1, existen diferentes elementos imprescindibles en el sistema de conducto común de los motores de las series RT-Flex, X, y X-DF, tales como:

- Unidad de conductos comunes (combustible, servoaceite, aire)
- Unidad de suministro de servoaceite y aceite de control
- Unidad de control para la inyección (ICU) del combustible
- Sistema de control electrónico integrado

En el sistema que se puede ver en la Figura 5.2.2 existe un conducto común de presión de combustible a 1000 bar de presión para el suministro a los inyectores y otro de aceite hidráulico a 200 bar de presión para el control de la válvula de escape y de las válvulas de control de la unidad de control de Inyección (ICU).

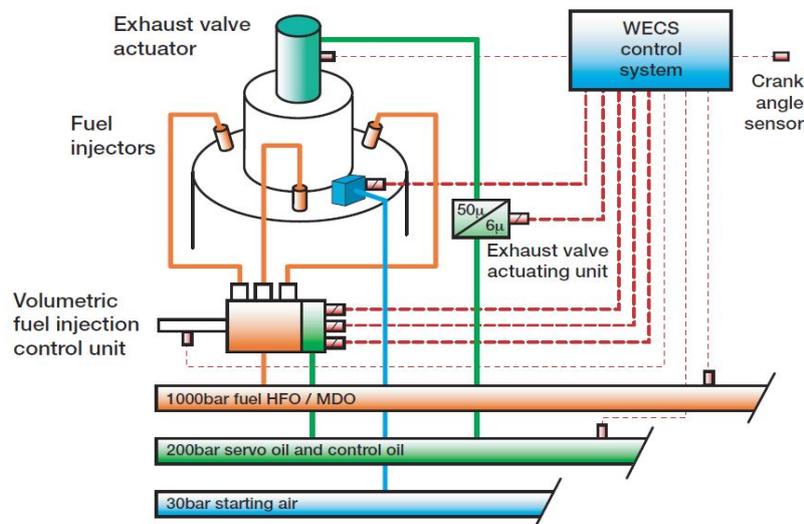


Figura 5.2.2. Esquema del sistema common rail en un motor Sulzer RT-Flex. [13]

5.2.1 Unidad de suministro

La unidad de suministro es la que se encarga de suministrar la presión de combustible y de aceite hidráulico a los conductos acumuladores correspondientes. Esta unidad está accionada por el motor a través de un tren de engranajes que acopla el eje de cigüeñales a un eje de camones. Estas bombas, que se pueden ver en la Figura 5.2., son del tipo Sulzer y están accionadas mediante los camones, levantando así la presión de combustible y de aceite hidráulico. Dependiendo del tamaño del motor, se tendrán más o menos bombas para suministrar el aceite y combustible suficiente para la operación estable y segura del motor en todas las condiciones de carga. [13]

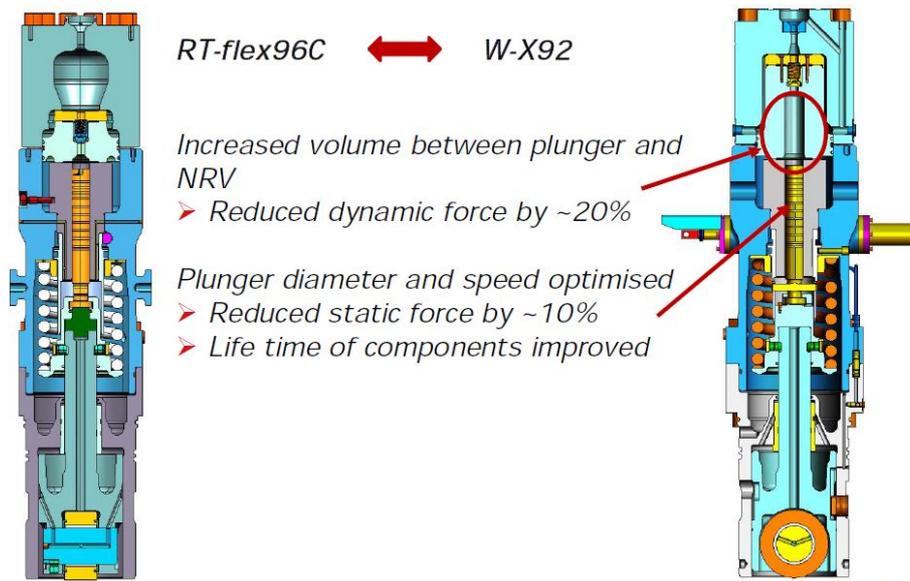


Figura 5.2.1.1. Comparación entre las bombas de combustible de alta presión RT-flex y X. [49]

5.2.2 Unidad de conductos comunes

El conducto común para el combustible se encuentra debajo de la plataforma de inspección de culatas y a lo largo de todo el motor. El cometido de esta unidad es proporcionar la presión de combustible necesaria a la ICU para la correcta inyección de combustible. El otro conducto necesario para la inyección de combustible es el de aceite de control que controla las válvulas en las versiones primitivas de la ICU.

5.2.3 Unidad de control de la inyección (ICU)

La ICU es la encargada de suministrar la cantidad de combustible y controlar el inicio de la inyección en función de las condiciones de operación del motor. A través de sensores de posición del émbolo, esta unidad de control se comunica con el sistema de control del motor de Wärtsilä (WECS), que es el encargado de dar señal a las válvulas solenoides de los tiempos de inyección. En el sistema que se puede ver en la Figura 5.2.3.1, las válvulas del conducto eran las encargadas de abrir el paso al aceite hidráulico para que éste desplazase un vástago en la válvula de control de inyección y así inyectar la cantidad de combustible que estuviera alojada en el cilindro. Con el nuevo sistema se compacta y se proporciona una fiabilidad mayor al eliminar posibles fugas de combustible causadas por las bajas viscosidades de los combustibles actuales, siendo el desgaste de la parte de sellado y las consecuentes pérdidas un fallo para la parada del motor. Este sistema se puede ver en la Figura 5.2.3.1 [50][51].

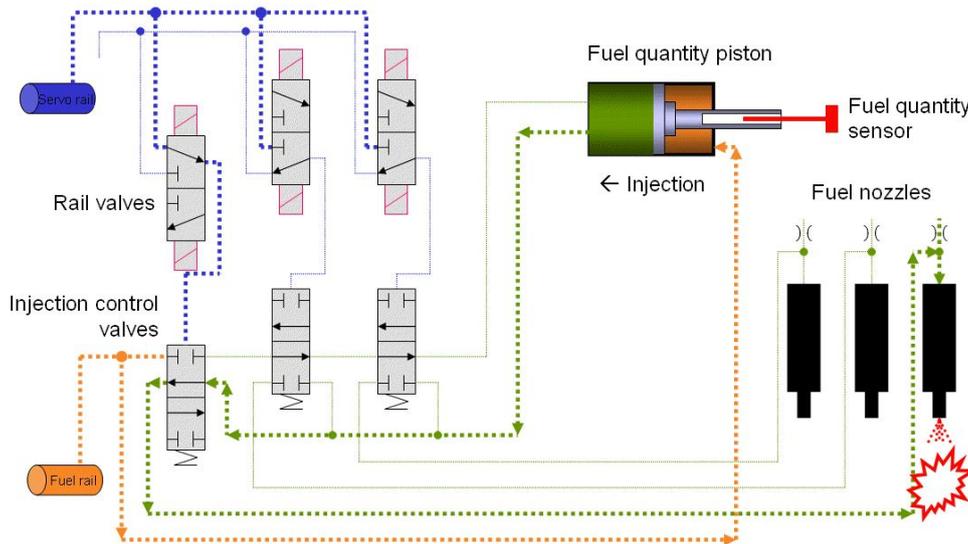


Figura 5.2.3.1. Esquema de inyección de la ICU. [50]

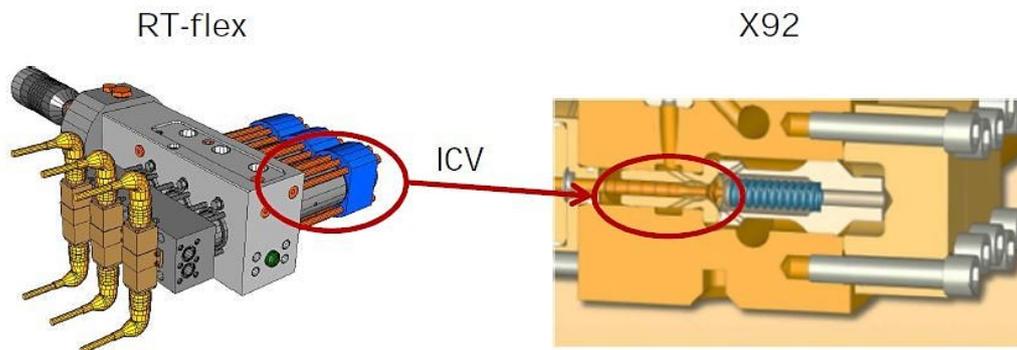


Figura 5.2.3.2. Izquierda sistema ICU anterior, Derecha: Sistema ICU actual. [49]

En el sistema de conducto común gracias a la unidad ICU se pueden activar las tres válvulas de inyección, dos o incluso una sola válvula dependiendo de la carga del motor. Así se consiguen muy bajas velocidades de giro con combustión estable sin formación de humo visible generada por la inyección de un mayor volumen de combustible de lo que es capaz de quemar un motor convencional en ese caso [13].

El uso de toberas de alto rendimiento (FAST) que constan con una aguja más prolongada y una boquilla atomizadora mejorada, reducen el volumen remanente del inyector (sac), disminuyendo la cantidad de combustible sin quemar dando lugar a un ahorro de combustible y, por lo tanto, menos emisiones de GEI, como se puede ver en la Figura 5.2.3.3. La producción de hollín que se acumulaba en las válvulas de escape y cabeza de pistón sobre el aro de fuego se ve también reducido notablemente [52].

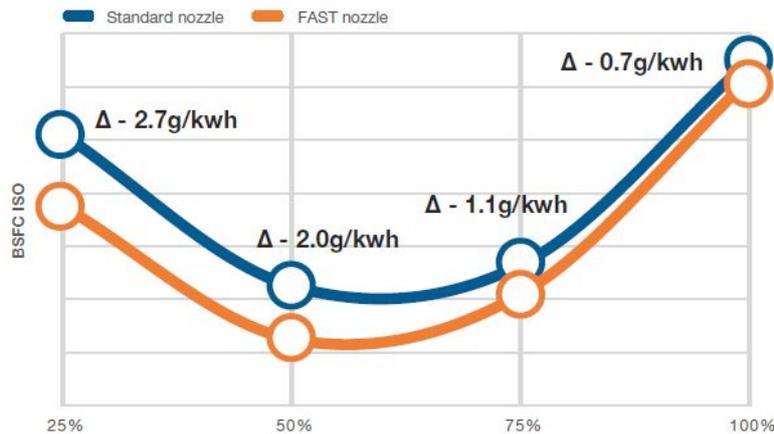


Figura 5.2.3.3. Comparativa del consumo específico de combustible al freno del tipo de tobera FAST y las toberas estándar en el motor de la serie RT-flex58T-D. [52]

5.3 J-ENG LSJ

La antigua división marina de *Mitsubishi Heavy Industries* (MHI) y *Kobe Diesel* se han consolidado como la *Japan Engine Corporation* (J-ENG), lanzando al mercado la serie de motores LSJ, un concepto de motor que únicamente consume gasóleo marino [53]. En este apartado se describirán algunos de los conceptos de inyección llevados a cabo por las series de motores ya desarrollados anteriormente por la MHI con el concepto Eco, que consiste en el control de la inyección de forma electrónica.

La serie LSJ de motores incorpora en su sistema de inyección de combustible la inyección de agua estratificada en la inyección principal. De esta manera, se reducen las temperaturas de la cámara de combustión y se logran objetivos de Nivel II de NO_x .

5.3.1 Concepto Eco

El concepto Eco de los motores de J-ENG es similar a los utilizados por los otros dos grandes fabricantes de motores marinos de 2T, la MAN B&W y WinGD, con sus series ME y la serie X respectivamente. El control electrónico de la inyección y de la válvula de escape otorgan flexibilidad en la operación de los motores, reduciendo los consumos específicos y la formación de gases contaminantes.

Se puede ver en la Figura 5.3.1.1 un esquema del sistema Eco, siendo la actuación del aceite hidráulico esencial para el funcionamiento de las válvulas de inyección de combustible. Este aceite proviene de dos bombas accionadas por motores eléctricos.

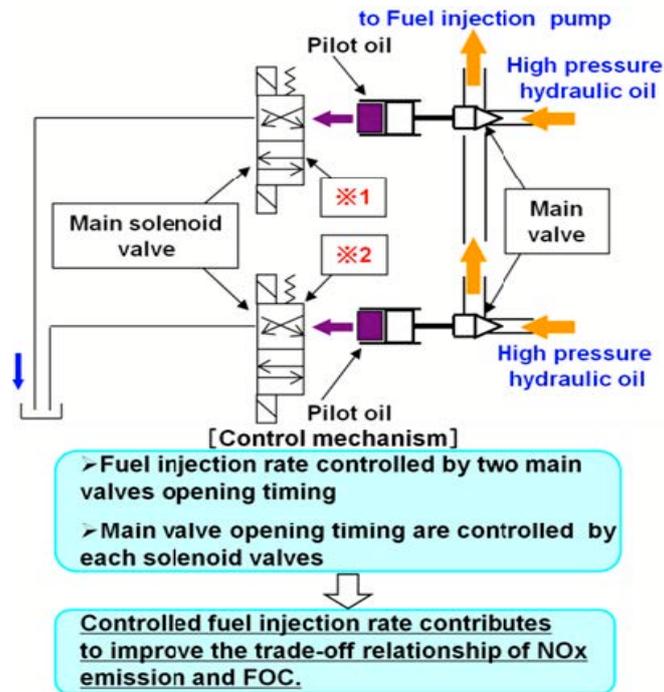


Figura 5.3.1.5.3.1. Esquema del sistema Eco para la inyección de combustible. [54]

En el sistema de inyección de combustible, presente en la Figura 5.3.1.1, constan:

- Válvula solenoide (2 por cilindro)
- Válvulas principales (2 por cilindro)
- Bomba de inyección de combustible
- Bomba de inyección de agua estratificada (2 por cilindro)
- Inyectores de combustible (3 por cilindro)

Las válvulas solenoides, que están comandadas por el sistema electrónico de control, abren el paso al aceite de control desalojándolo de su compartimento. Debido a que este aceite de control no ejerce presión sobre la válvula principal, ésta se abre dando paso al aceite hidráulico a alta presión, que se dirige hacia la bomba de inyección de combustible. El control de los modos de operación del motor viene dado por el desplazamiento efectuado por las válvulas principales y el momento, dando así a reducciones de los NO_x o del consumo, como se ve en la Figura 5.3.1.2 [54][55].

Las bombas de inyección de combustible aportan combustible presurizado a través de un émbolo que está accionado por el aceite hidráulico proveniente de las válvulas principales. Este tipo de bomba se parece bastante a las bombas empleadas en los motores de la serie ME de la casa MAN B&W. [56]

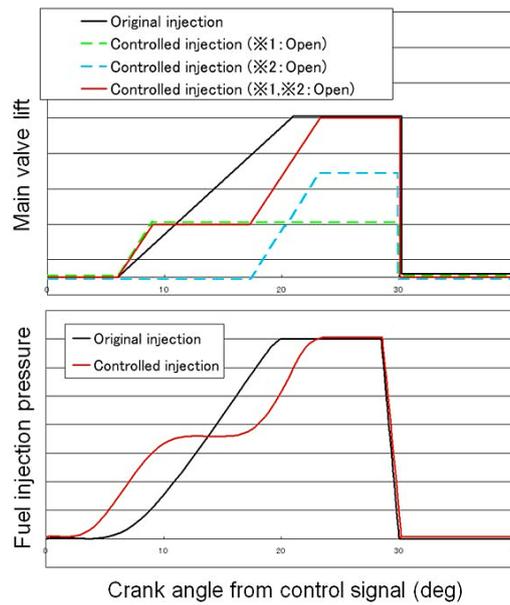


Figura 5.3.1.5.3.2. Control del caudal de inyección en el sistema Eco. [54]

5.3.2 Sistema de inyección de agua estratificada

En el sistema de inyección de agua estratificada hay dos bombas de agua que inyectan individualmente a dos posiciones distintas del canal de combustible en la válvula de inyección, siendo primero la inyección del canal superior y a continuación la del canal inferior, creando así capas de agua y combustible, como se ve en la Figura 5.3.. Una vez las capas han sido creadas, se inicia la activación de la bomba de inyección de combustible. Es importante destacar que la primera capa que se inyecta en la cámara de combustión es de combustible, por lo que no afecta a la inflamabilidad de la mezcla. Puede apreciarse el fenómeno de la estratificación en la Figura 5.3.2.2 [54].

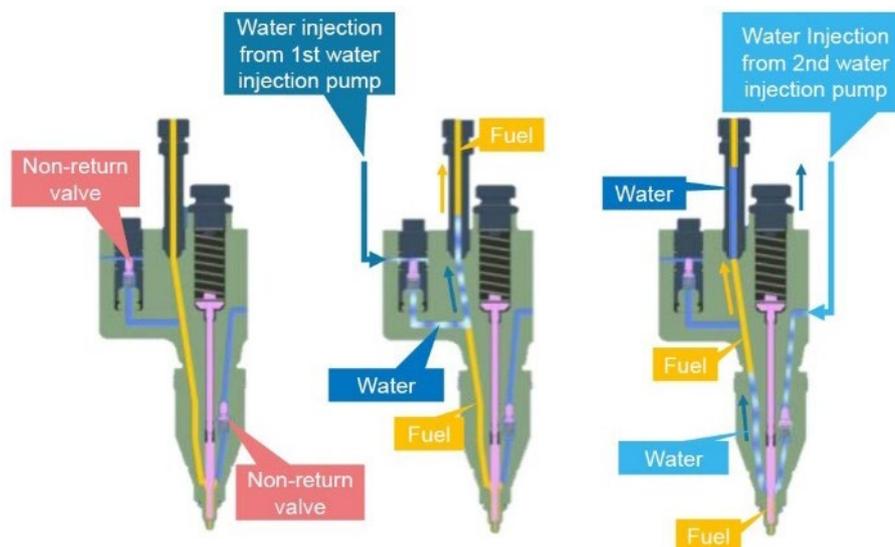


Figura 5.3.2.1. Válvula de inyección para la inyección de agua estratificada. [54]

La bomba de inyección de agua estratificada se impulsa por aceite hidráulico a través de un émbolo. La proporción agua/combustible es función de la carga del motor. [54]

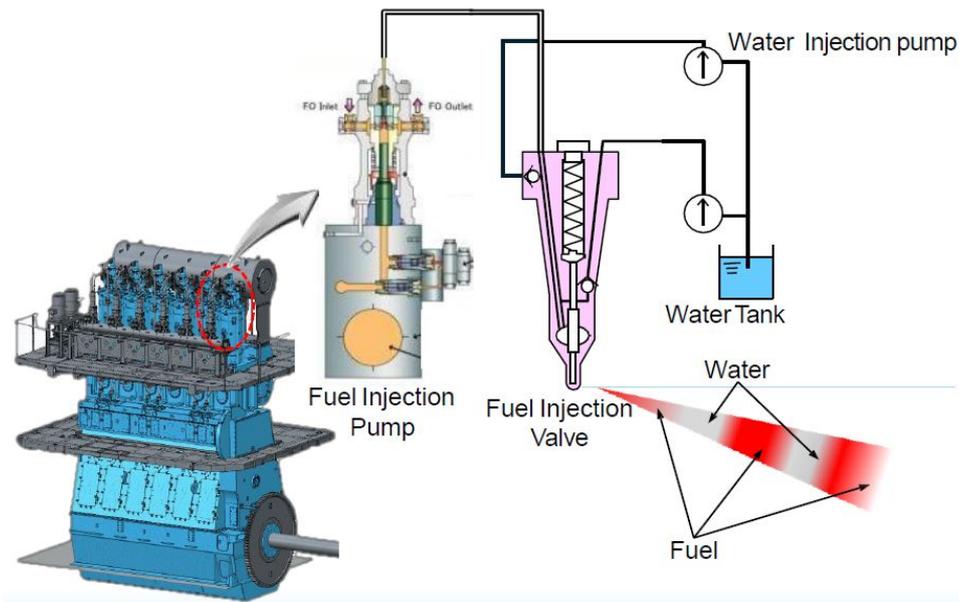


Figura 5.3.2.2. Esquema de sistema de inyección de combustible y agua. [57]

6 MOTORES NAVALES PARA EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

6.1 MAN B&W ME-GI/GIE

Los motores de la serie ME-GI proporcionan flexibilidad en el uso de diferentes combustibles como son el fuelóleo pesado, el gasóleo marino, GNL o etano en la novedosa serie GIE. Este concepto de inyección de combustible gaseoso se basa en el ciclo diésel, en el cual el combustible se inyecta sin premezclar en la cámara de combustión. Debido a las altas temperaturas de autoinflamación del GN y el etano, es necesaria la inyección de una porción de combustible que genere una llama piloto para iniciar la combustión y así alcanzar las temperaturas de ignición espontánea que no se conseguirían solo con la compresión del aire de barrido.

Los elementos para la preparación y seguridad del gas se pueden ver en la Figura 6.1.1.

A mayores hay que añadir:

- el bloque de gas
- las válvulas de inyección de gas.

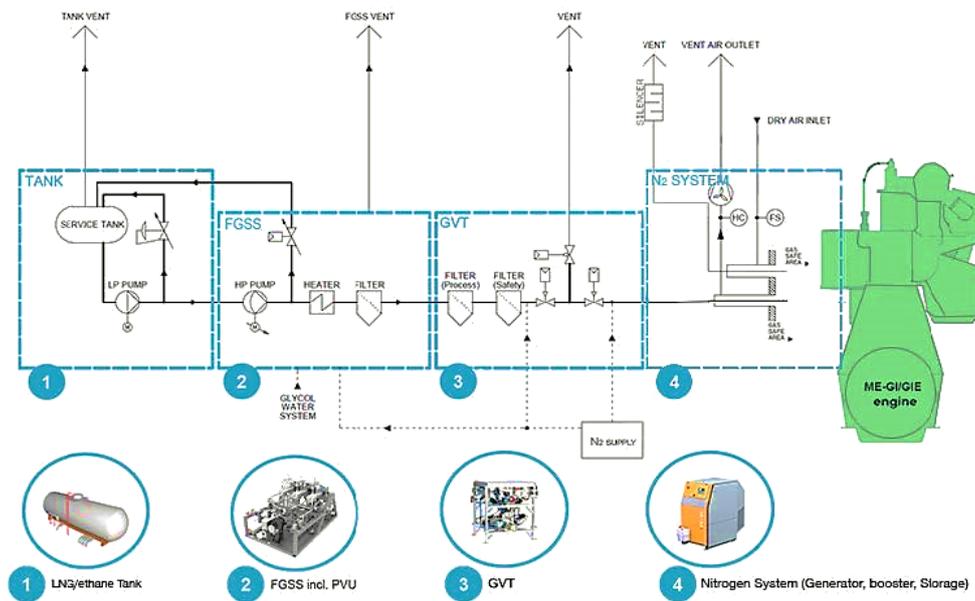


Figura 6.1.1. Elementos principales del sistema de gas del motor ME-GI versión 2. [58]

6.1.1 Sistema de suministro de combustible gaseoso (FGSS)

El *sistema de suministro de combustible gaseoso* (FGSS) es el encargado de proporcionar las condiciones de combustible al sistema de inyección del motor. Dependiendo del estado en que se encuentre el combustible a la entrada del sistema de suministro, se tendrán diferentes sistemas para la preparación del gas a consumir por el motor. En la Figura 6.1. se pueden ver diferentes formas de suministro de combustible dependiendo del planteamiento de la instalación:

- Para el consumo del BOG, que es el gas generado por la vaporización del GNL, se tiene un sistema con compresores de alta presión que suministran el gas a la presión correspondiente para la inyección, además de un enfriador.
- Para el consumo del gas directamente de los tanques de combustible presurizados también se dispone de compresores de alta presión y enfriador.
- Si la opción es la del consumo de GNL, se tendrá que instalar un sistema que contenga una bomba de alta presión criogénica y un vaporizador de alta presión. En el último caso, se utiliza el sistema llamado *unidad de bomba vaporizadora* (PVU). En cuestión de presiones el gas natural se suministra al motor a presiones de 300 bar, y el etano a 400 bar. [58][59]

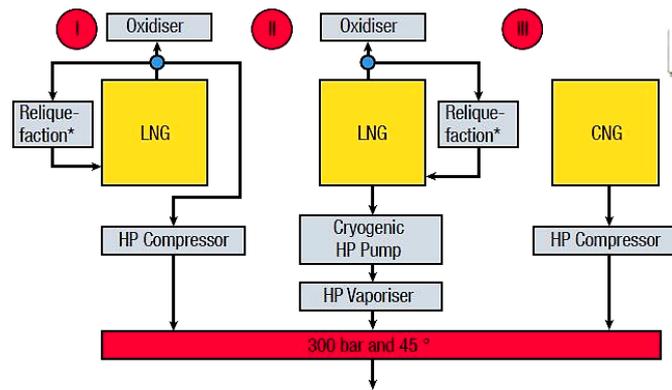


Figura 6.1.1.1. Diferentes formas de suministro de combustible gas al motor. [60]

6.1.2 Tren de válvulas de gas (GVT)

El *tren de válvulas de gas* (GVT) es una unidad que separa el sistema de suministro de combustible gas del motor para garantizar que durante las paradas del motor o durante la operación únicamente con combustibles líquidos no haya suministro de gas a la sala de máquinas. Esta unidad también se encarga de desalojar el nitrógeno de purga de las tuberías de gas.

Hay dos ubicaciones posibles para esta unidad. Puede estar en la cubierta, siendo preferible lo más cercano al motor o bajo la cubierta en un espacio próximo a la sala de máquinas. Si la unidad se encuentra en cubierta, las tuberías que conectan el FGSS y el GVT serán de pared única, pero si la GVT se encuentra bajo cubierta, será necesario el uso de tuberías de doble pared con detectores de fugas y ventilación en el espacio entre tubos, como se ve en la Figura 6.1. [59].

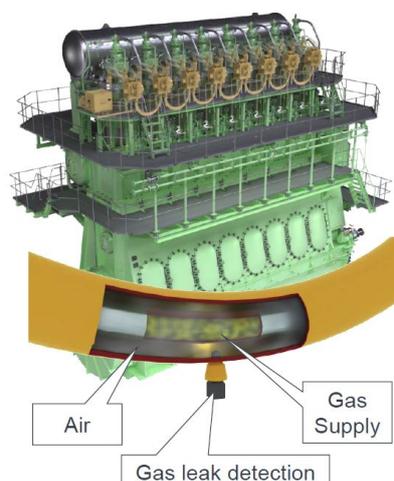


Figura 6.1.2.1. Tubería de doble pared con detección de gas. [61]

La versión 2 de este motor incorpora la purga de nitrógeno directamente al bloque de gas para purgar todo el sistema de inyección y la salida del nitrógeno a través de una tubería de doble pared que incorpora una sección para el nitrógeno de purga y la otra sección para el suministro de gas, reduciendo así la instalación como se puede ver en la Figura 6.1.2.2 [62].

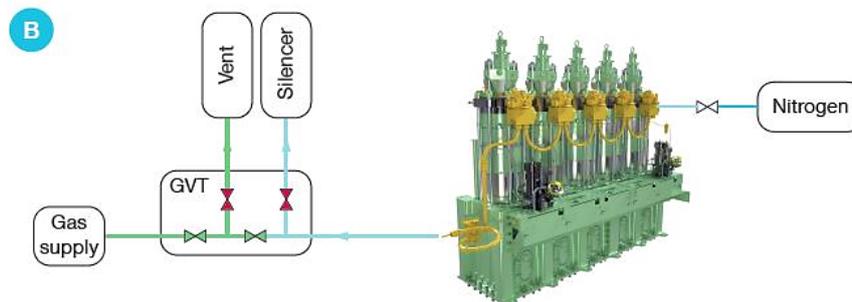


Figura 6.1.2.2. Esquema de suministro de gas y purga del sistema con N_2 . [62]

La GVT está controlada por el sistema de control del motor, pudiendo llevar a cabo operaciones de preparación de gas, suministro de gas al motor, y purgado de las tuberías de los sistemas de gas [63].

6.1.3 Bloque de control de gas

El bloque de control de gas se ha rediseñado para la versión 2 del motor, eliminando los conductos de aceite de sellado y de control que se encontraban por encima de la culata, para llevarlos por canales interiores. Además de esto, la unidad de válvulas y el acumulador de gas están separados como se ve en la Figura 6.1.3.1. La función de esta unidad es la de acumular en su interior gas a presión en un espacio interno y, a través de las válvulas de control, realizar el aporte de gas a los inyectores [64].

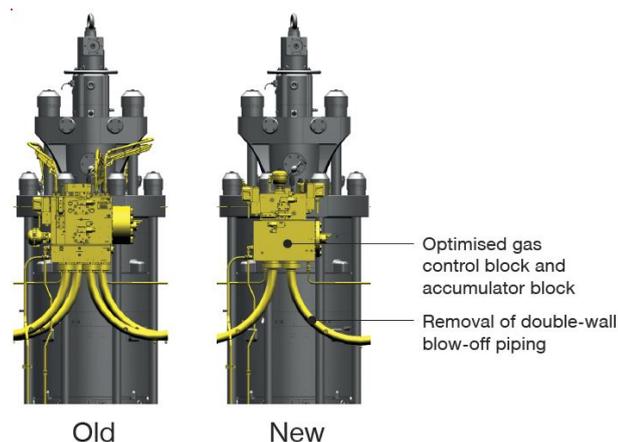


Figura 6.1.3.1. Comparativa entre la versiones 1 y 2 del bloque de gas del motor MAN B&W ME-GI. [64]

El funcionamiento de las válvulas de control de gas se explicará a continuación a través de la Figura 6.1.3.2 [61]:

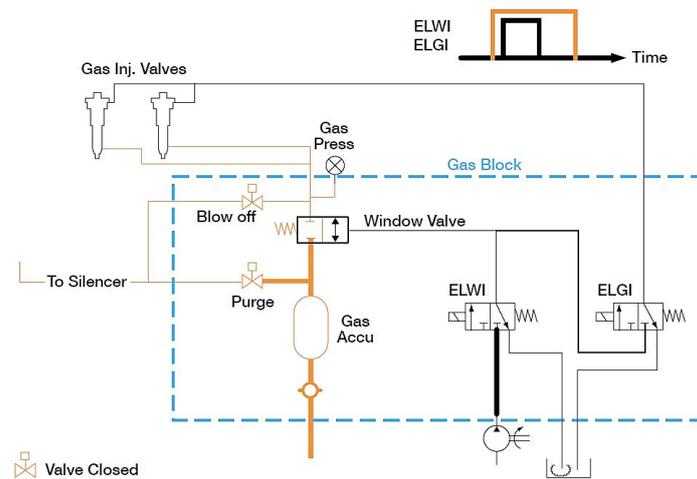


Figura 6.1.3.2. Sistema de inyección de motor MAN B&W ME-GI. [60]

1. Lo primero que hace el sistema es inyectar el combustible piloto para generar la llama que crea las condiciones de temperatura necesarias para la inflamación del gas posteriormente inyectado.
2. El gas se encuentra acumulado a presión y las válvulas solenoides comandadas por el sistema de control del motor se encuentran en su posición de reposo.
3. En el momento en el que la *electroválvula de paso de aceite control* (ELWI) se activa por orden del sistema de control, el aceite de control (línea negra) pasa a través de la válvula y desplaza la *válvula de paso de gas* (window valve), lo que provoca el paso de combustible gas a través de ella. Esto da lugar a la llegada de gas a presión a los inyectores de gas.
4. Tras un instante, se activa la *electroválvula de inyección de gas* (ELGI), lo que provoca el paso del aceite de control hacia los inyectores, donde éste elevará el vástago de la válvula de inyección para iniciar la inyección de gas.
5. Tras esto, el sistema de control deja de alimentar eléctricamente a la válvula ELGI, cerrando ésta el canal de aceite hidráulico hacia los inyectores de gas y purgando el aceite hacia el sistema de aceite lubricante.
6. Una vez cierra la válvula ELGI, el sistema deja de alimentar a la válvula ELWI, por lo que se cierra la *válvula de paso de gas* (window valve) y corta el suministro de gas a los inyectores.

Gracias a la nueva función de corte de un solo cilindro de la versión 2 que se puede ver en la Figura 6.1.3.3, el motor puede funcionar en modo gas en todos los cilindros y en modo combustible líquido en uno de ellos sin tener que pasar a todos los cilindros a modo combustible líquido como en la versión 1. Esto aporta una enorme flexibilidad a la hora de la operación manteniendo la carga del motor casi invariable [64].

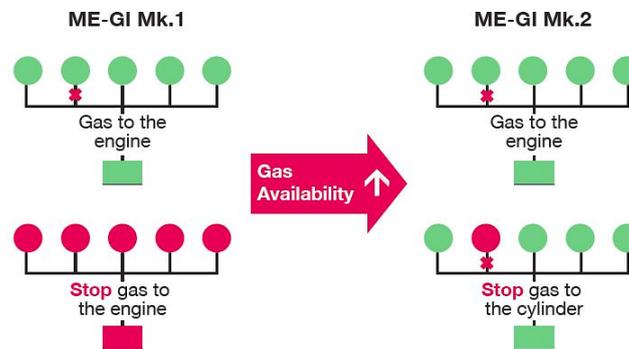


Figura 6.1.3.3. Corte de combustible gas en un cilindro. [64]

6.1.4 Válvulas de inyección de gas y combustible líquido

En el sistema de inyección de los motores DF es necesaria la utilización de válvulas para la inyección de gas y válvulas para la inyección de combustible líquido, tres de cada tipo por cilindro. Estas últimas se han rediseñado para lograr modificar la cantidad de combustible a inyectar dependiendo del modo de operación del motor [62]. Se puede ver en la Figura 6.1.4.1 la nueva válvula de inyección piloto, donde se suministra aceite hidráulico a través de un canal en la válvula para así elevar el vástago de la válvula de inyección para ajustar la sección a destapar en la tobera de la válvula, como se puede ver en la Figura 6.1.4.2.

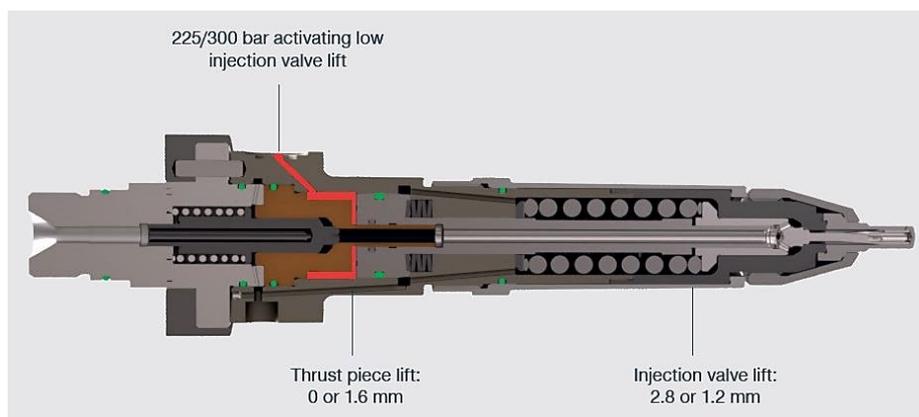


Figura 6.1.4.1. Sección de la nueva válvula de combustible piloto. [62]

Este tipo de tobera se puede adaptar a las válvulas de inyección tipo “slide valve” estándar o a los modernos inyector-bomba hidráulicos (FBIV) de los motores de la versión 10 (mk10). Gracias a esto se han reducido los consumos de combustible para llama piloto del 3,0 al 1,5 %, o incluso al 0,5 % en los motores MAN B&W G70ME-C-GI [62][63][64][65]. Hay que aclarar que esta reducción se computa dentro del total de energía aportada a la combustión por lo que el consumo específico total desciende.



Figura 6.1.4.2. Nuevo diseño de tobera para distintos modos del motor MAN B&W ME-GI. [62]

Las válvulas de inyección de gas se encuentran insertadas en la culata de igual modo que las válvulas de inyección de combustible líquido. Este tipo de válvula se puede ver en la Figura 6.1.4.3, habiéndose progresado en el diseño de las toberas acortándolas en longitud. También se ha mejorado el material empleado en las toberas, siendo éste de acero para herramientas (S40Cr5Mo1V) caracterizado por su tenacidad, resistencia al calor y al desgaste. En 2019, MAN puso en marcha ensayos para el uso de toberas con acero de tungsteno para aumentar la dureza y la resistencia al calor [66][67].

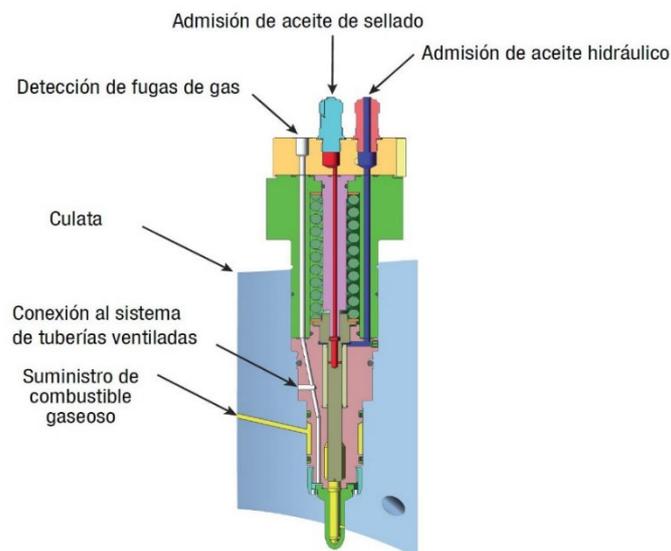


Figura 6.1.4.3. Válvula de inyección de gas en el motor MAN B&W ME-GI Mk.1. [68]

En el apartado 6.1.3, se describió el funcionamiento del bloque de gas hasta las válvulas de inyección de gas. En este apartado se describirán las acciones que lleva a cabo la válvula de inyección para introducir gas combustible a la cámara de combustión

1. Cuando abre la válvula de *paso de gas* (window valve) comandada por aceite hidráulico llega gas a alta presión a la parte inferior de la válvula de inyección llenando la cámara interior.
2. Desde el sistema de aceite se suministra aceite de sellado para impedir que se mezcle el combustible gas y el aceite hidráulico.
3. Cuando el sistema de control del motor alimenta a la válvula ELGI, llega aceite hidráulico a la válvula de inyección de gas y, debido a la presión ejercida por éste en torno a 300 bar, eleva la aguja y el gas a presión se inyecta en la cámara.

6.2 MAN B&W ME-LGI

El motor ME-LGI está especialmente diseñado para el uso de combustibles con temperaturas de inflamabilidad por debajo de los 60 °C. La tecnología de *inyección de gas licuado* (LGI), es de las últimas novedades en el catálogo de MAN B&W. Este concepto actualmente se utiliza para la inyección de combustibles como el GLP y metanol, pudiendo adaptarse a otros como éter dimetílico, amoníaco o etanol [69].

Partiendo de la experiencia de los motores lentos duales tipo ME-GI, MAN B&W han utilizado su experiencia de campo en motores DF para desarrollar este tipo de motor. En la Figura 6.2.1 se pueden apreciar los distintos elementos que componen este motor. Las válvulas de inyección de gas licuado utilizan el concepto llamado FBIV utilizado para combustibles líquidos convencionales y que se verá a continuación en el apartado 6.2.1. El principio de funcionamiento no es exclusivo de motores lentos ni del fabricante MAN B&W pero su aplicación a estos combustibles alternativos sí.

Los elementos utilizados para los motores DF que consumen metanol y GLP son muy parecidos a los utilizados para los motores ME-GI, como puede ser la doble pared en las tuberías, apreciable en la Figura 6.1.2.1, y la inyección de combustible para llama piloto. Evidentemente, los sistemas auxiliares para el suministro del combustible o el almacenamiento están debidamente enfocados a las características particulares de los combustibles a utilizar.



Figura 6.2.1. Elementos de inyección del motor MAN B&W LGI. [69].

6.2.1 Inyector-bomba hidráulico para gas licuado (FBVI-M y FBVI-P)

El concepto del inyector-bomba hidráulico FBIV trata tanto el aumento de la presión del combustible como la apertura de la válvula de inyección en un único elemento, eliminando por completo las altas presiones en las tuberías de suministro de combustible desde las bombas tradicionales hasta los inyectores. Este tipo de inyección se utiliza actualmente en los motores LGI y en la versión 10 (mk10) de los motores ME-C para el consumo de combustibles líquidos, denominada ME-C-10.5 [70][71].

Dentro de este concepto existen las variantes FBIV-M (metanol), FBIV-P (propano), y la FBIV para combustibles líquidos aceitosos convencionales. Las distintas variantes indican el tipo de combustible a consumir, dependiendo de la presión de vapor a la temperatura de 60 °C, como se puede ver en la Tabla 6.2.1.1.

Presión de vapor a 60 °C	
<1 atmósfera (Bajo)	>1 atmósfera (Alto)
Metanol, Etanol	GLP, Éter dimetílico

Tabla 6.2.1.1. Categorización dependiendo de la presión de vapor a 60 °C. [72]

La FBIV-M que se puede ver en la Figura 6.2.1.1, como ya se ha dicho, aúna la bomba de inyección junto con la tobera de diseño “slide valve” ya utilizadas en los motores estándar ME-C para reducir el remanente (sac). Se puede ver que a través de la parte superior entra en acción aceite hidráulico a presiones de 300 bar para empujar un émbolo que presuriza el metanol que previamente ha sido suministrado por el bloque de válvulas. El aceite hidráulico lo suministra el sistema visto en el apartado 5.1.1. La presión de inyección del metanol es de alrededor de 600 bar de presión y se ha delimitado el volumen máximo de la cámara donde se encuentra el metanol antes de ser presurizado para así no exceder la cantidad de combustible que pueda ser introducido en la cámara de combustión. Para eliminar cualquier riesgo de contaminación de una posible mezcla de aceite hidráulico y metanol, se ha incorporado un aceite de sellado que imposibilita la mezcla del aceite hidráulico y el metanol, drenándolo a un tanque separado para tratar posibles contaminaciones [70].

Añadido al consumo de metanol, se ha incorporado un sistema de inyección de agua para cumplir con las normas de contaminación de NO_x nivel III. Este sistema cuenta con una bomba que mezcla el agua con el metanol en el sistema de tren de *válvulas de combustible* (FVT) [70].

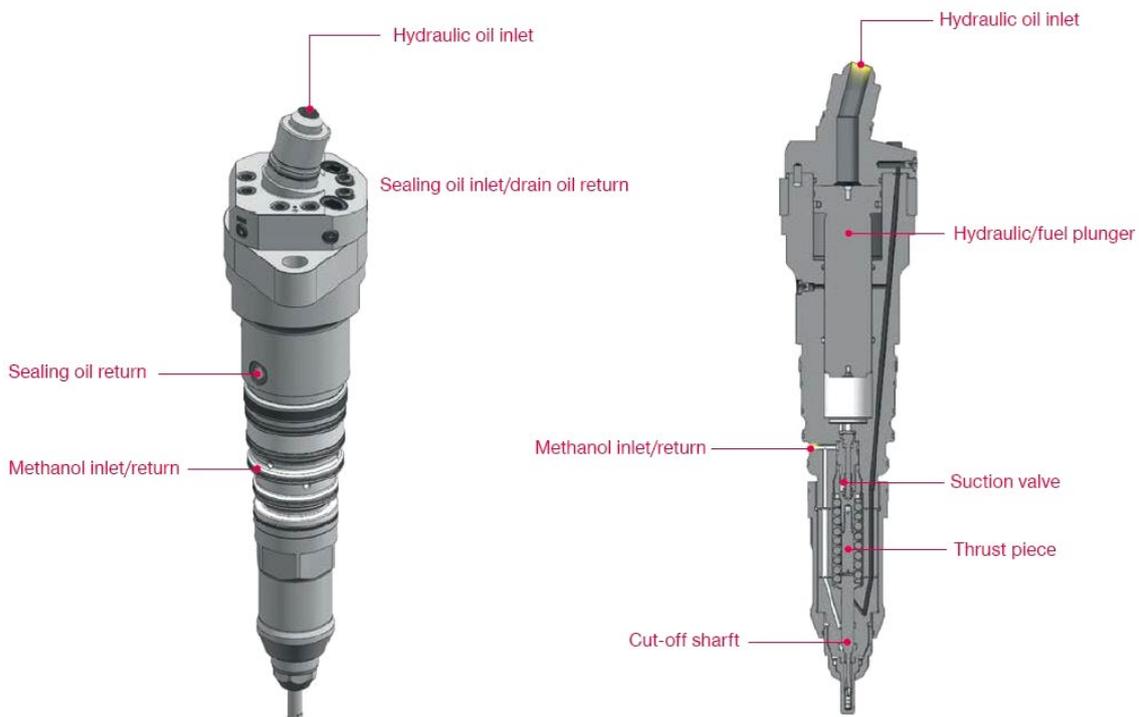


Figura 6.2.1.1. FBIV-M para metanol. [70]

La FBIV-P, apreciable en la Figura 6.2.1.2, ha sido desarrollada tras la experiencia con la inyección de metanol y, por lo tanto, es muy similar en diseño. El funcionamiento es similar, pero tiene algunas diferencias que se detallaran a continuación:

- La presión de inyección dada por el émbolo de la bomba debe ser de 700 bar.
- La válvula antirretorno se abre únicamente durante el proceso de presurización a una presión de 80 bar, para asegurar que no exista un suministro de GLP a la cámara de combustión.
- La presión de suministro de combustible hasta la FBIV-P es de 50 bar.
- El aceite de sellado se suministra a presiones de 80 bar para asegurar que no haya posibles mezclas entre el GLP y el aceite hidráulico, siendo este aceite quemado en la cámara de combustión, a diferencia del método utilizado en el metanol.
- Este sistema incorpora una válvula ELWI que es la encargada de abrir el paso al aceite hidráulico para presurizar el GLP proveniente del sistema de suministro.
- La otra electroválvula es la ELGI que es la encargada de abrir el paso al aceite de control y así levantar el vástago del inyector para realizar la inyección [73].

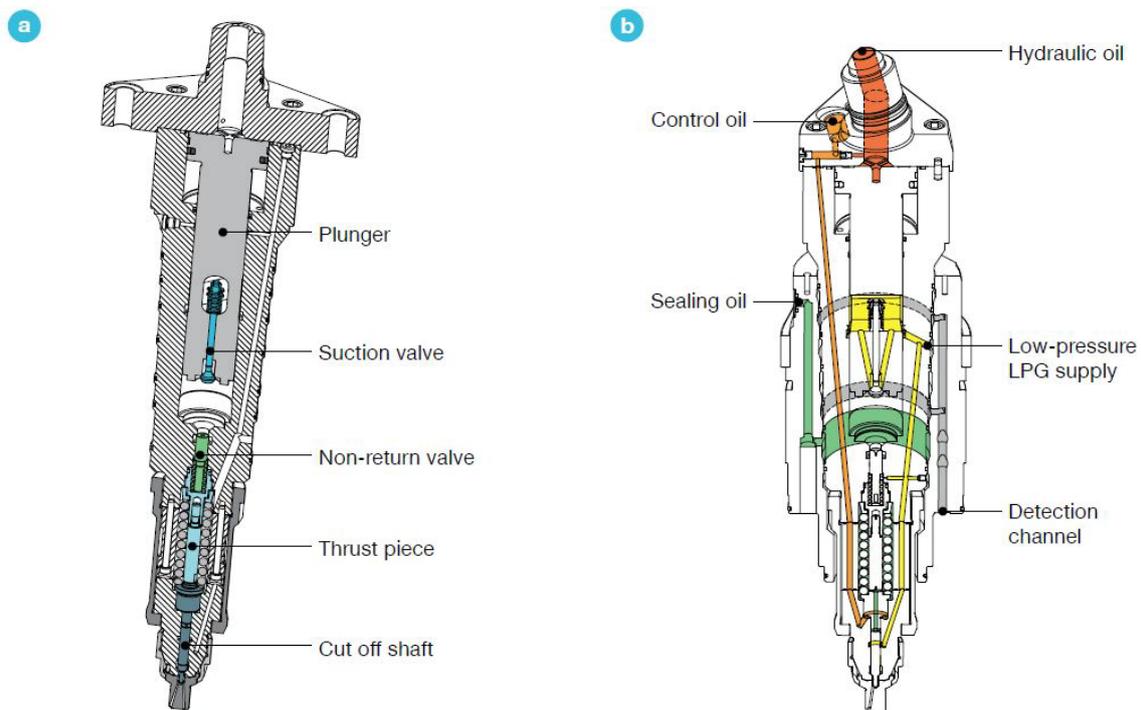


Figura 6.2.1.2. FBIV-P para propano licuado [73]

El sistema de inyección está comandado por el sistema de control del motor que actúa las electroválvulas ELWI y ELGI. Este método del control es similar al utilizado por el motor MAN B&W ME-GI, que se puede ver en el apartado 6.1.3. Por otra parte, decir que el sistema de control utilizado en las FBIV-M es casi idéntico al utilizado por los FBIV instalados en los motores para la inyección de gasóleo marino o fuelóleo pesado, siendo la válvula ELFI la que abre el paso al aceite hidráulico que presuriza al combustible y éste el que levanta la aguja del inyector para realizar la inyección [67].

El diámetro de los orificios practicados en la tobera del inyector de metanol debe ser más del doble debido al bajo poder calorífico inferior, comparado con el gasóleo marino y con los mismos tiempos de inyección [70]. Estos valores de poder caloríficos se relacionan en la tabla del Anexo. 1.

6.2.2 Sistema de suministro de combustible líquido (LFSS)

El sistema de suministro de metanol al motor consiste en una bomba que eleva la presión hasta 13 bar. Esta presión debe ser la correcta para mantener el metanol en estado líquido en todo momento y, junto a la temperatura, deben asegurar que no aparezca el fenómeno de la cavitación. Para mantener la temperatura del metanol se instala un intercambiador de calor en la descarga de las bombas [70][72][74].

Por otra parte, el sistema de suministro de GLP mantiene todos los elementos del sistema anteriormente descrito, a diferencia de la ya antes comentada presión de 50 bar. MAN B&W actualmente no tiene desarrollado un sistema para el suministro de GLP, pero otros fabricantes como Wärtsilä ya lo tienen disponible tanto para GLP como para amoniaco [75]. El esquema general simplificado a tener en cuenta para los astilleros sería el de la Figura 6.2.2.1.

Los sistemas deben estar diseñados para mantener las presiones y las capacidades de suministro en función del tamaño del motor, el combustible a utilizar y la carga del motor. Además de los sistemas para mantener el GLP y el metanol en las condiciones adecuadas, se deben instalar unos filtros para eliminar toda clase de impurezas en el combustible que puedan perjudicar el funcionamiento preciso del sistema.

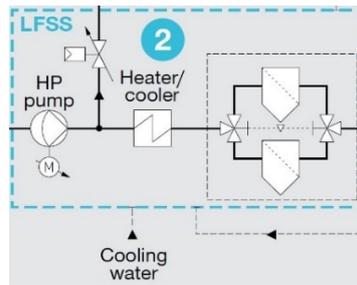


Figura 6.2.2.1. Esquema genérico de sistema de suministro de combustible. [73]

6.2.3 Tren de válvulas de combustible (FVT)

Como ya se ha comentado en el apartado 6.1.2, el tren de válvulas es el encargado de aislar la zona de suministro de combustible de la zona de la sala de máquinas, aumentando así la seguridad. Esta seguridad la proporciona una unidad de válvulas como la que se puede ver en la Figura 6.2.3.1. Este sistema también se encarga de llevar a cabo el purgado de las líneas del motor con nitrógeno [72][73].



Figura 6.2.3.1. Tren de válvulas de combustible de la marca Eltronic FUELTECH. [76]

6.2.4 Resultados obtenidos por los motores LGIM y LGIP

Los resultados obtenidos por los motores que consumen metanol han aportado conclusiones interesantes sobre la combustión de este combustible. En la Figura 6.2.4.1 se puede comprobar cómo la inyección de metanol se realiza unos grados antes que la inyección que se realizaría en un motor que utilice combustible convencional, para así imitar el comportamiento del ciclo. La liberación de calor del metanol es más lenta, y de ahí la necesidad de anticipar la inyección. De igual modo el calor liberado es menor y decrece rápidamente debido a alto contenido en oxígeno en el combustible.

Por estas razones el consumo de metanol es menor, ya que a nivel rendimiento interesa tener una combustión rápida liberando poco calor. *“Hay que tener en cuenta que la transferencia de calor influye directamente sobre las prestaciones, el rendimiento y las emisiones del motor, ya que una mayor transferencia de calor del gas hacia las paredes implica una menor energía disponible para producir trabajo mecánico (menor potencia) y, por tanto, un rendimiento menor”* [77]. Además, se reducen las emisiones de NO_x a través de la inyección de agua junto con la baja temperatura adiabática de llama, comparándola con la del fuelóleo pesado, de alrededor de unos 150 °C de diferencia [70][78].

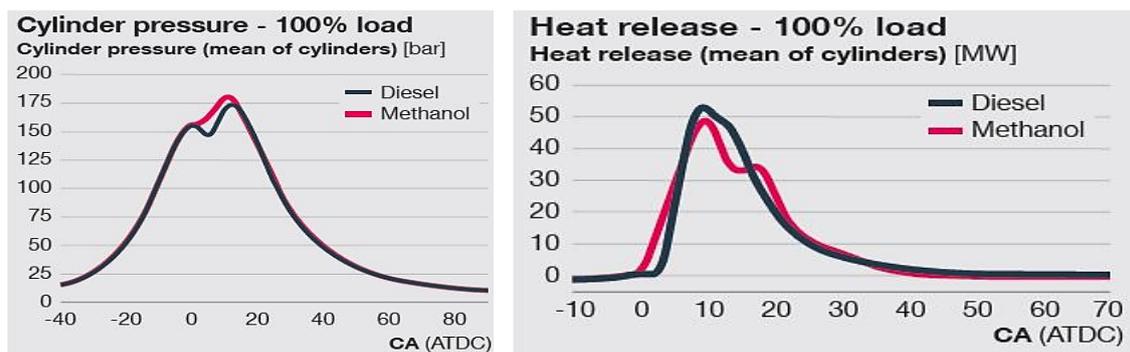


Figura 6.2.4.1. Presión en cilindro (izqda) y calor generado (dcha) en ME-LGIM a máxima carga. [70]

El consumo de combustible para llama piloto en el motor LGIM que consume metanol es de alrededor de un 5 % o más debido a la dificultad del metanol para mantener la combustión, comparado con el 3 % que utiliza el motor LGIP de GLP [70][79].

Como se ve en la Figura 6.2.4.2, la combustión del GLP a presiones normales, que rondan los 700 bar, tiene una inclinación menor que la de la curva de combustible diésel debido al comportamiento del GLP. Se observa que a medida que se aumenta la presión de inyección, esta inclinación aumenta, pudiendo lograr un comportamiento similar al descrito por el combustible diésel.

Lo anteriormente explicado quiere decir que la combustión del GLP es más lenta que la de un combustible convencional, teniendo que adelantar la inyección. Una ventaja anteriormente mencionada en el LGIM es que al final del ciclo de combustión el calor liberado es menor, por lo que teóricamente debería mejorar el rendimiento [73].

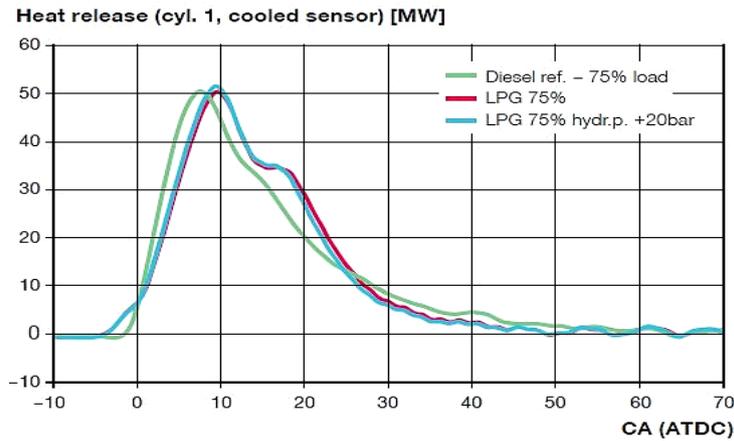


Figura 6.2.4.2. Diagrama p- α comparando el calor liberado a 75 % de carga Combustible diesel (verde), GLP (rojo), y GLP a alta presión (Azul). [73]

En cuestión de emisiones, los motores con el concepto de combustible dual de MAN B&W han reducido considerablemente con NO_x , SO_x , PS, y CO_2 en relación a los motores de combustibles convencionales, como se puede ver en la Tabla 6.2.4.1.

Reducción en emisiones de nuevos combustibles				
	NO_x	SO_x	PS	CO_2
GNL	20-30%	90-99%	90%	24%
GLP	10-15%	90-100%	90%	18%
Metanol	30-50%	90-97%	90%	5%

Tabla 6.2.4.1. Reducción de emisiones de los ME-GI y ME-LGI de MAN B&W en relación a ME Tier II [79]

6.3 WinGD X-DF

El desarrollo de los motores que pueden consumir combustibles alternativos fue marcado en la agenda de la compañía WinGD debido a las normativas a cumplir en los años venideros. Esto se tradujo en el desarrollo de motores que trabajan bajo el principio de mezcla pobre en la combustión bajo ciclo Otto, siendo el año 2011 el que marcaría el inicio. Desde el año 2011, este tipo de motor estuvo en desarrollo, siendo en 2016 cuando entró en operación la primera unidad de la serie RT-flex50DF [80].

6.3.1 Concepto del motor X-DF

Los motores duales del fabricante WinGD pueden consumir combustibles convencionales o consumir cualquier gas inflamable trabajando en modo dual. Este modo de consumo de gas es a bajas presiones logrando la mezcla del combustible gas

con el aire durante la carrera de compresión. Este concepto se basa en el ciclo Otto, donde teóricamente la combustión es a volumen constante. En este motor es necesario el aporte de una fracción de energía que comience la combustión, siendo la inyección de combustible para llama piloto el encargado de esta tarea [80][81].

El dosado permite controlar las características de la combustión como la combustión anticipada, la formación de encendidos superficiales que no constituyen el frente de llama (picado), o los frentes de llama con velocidades excesivas (detonación). Sin embargo, a medida que el motor necesita más carga de combustible debido a la potencia demandada, el dosado se acerca a valores donde sea difícil evitar el autoencendido de la mezcla [81]. Se puede ver en la Figura 6.3.1.1 cómo se inyecta gas a baja presión en el cilindro que se enciende gracias a la llama piloto cerca del PMS.

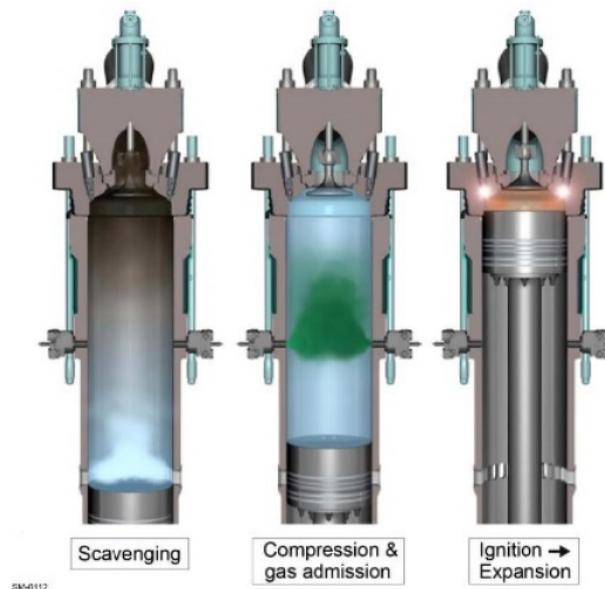


Figura 6.3.1.1. Concepto de premezcla de los motores RT-flexDF y X-DF de WinGD. [81]

6.3.2 Sistema de suministro de combustible gas

Aunque el concepto del motor de combustible dual anteriormente descrito indica que se puede utilizar cualquier gas inflamable hay que remarcar que, para mantener unas condiciones de operación, es necesario que el combustible gaseoso cumpla con una serie de requisitos. Estos requisitos pueden ser, por ejemplo, el poder calorífico inferior o el porcentaje en H_2 [82]. Esto es principalmente debido a que este motor está diseñado para el uso de GNL en los buques que transporten éste y por ello se tomará de referencia este motor con uso de GN como combustible.

Debido a las bajas presiones de admisión del gas para su consumo en el motor, el sistema de suministro de combustible gas tiene bajas demandas de energía para el acondicionamiento del GNL. Esto implica mayor eficiencia de acuerdo con el EEDI (3.3.1.1). El GNL se almacena a temperaturas criogénicas. Por lo tanto, debe instalarse o bien una unidad vaporizadora en el caso de que se utilice GNL, o bien a través de la preparación del BOG mediante compresores, teniendo en cuenta que el BOG debe siempre alimentar la demanda del motor principal y de los motores auxiliares si éstos fuesen duales [82]. En la Figura 6.3.2.1 se puede comprobar cómo el sistema de suministro de combustible cuenta con una planta de relicuación de manera opcional, siendo este sistema utilizado principalmente para buques de transporte de GNL.

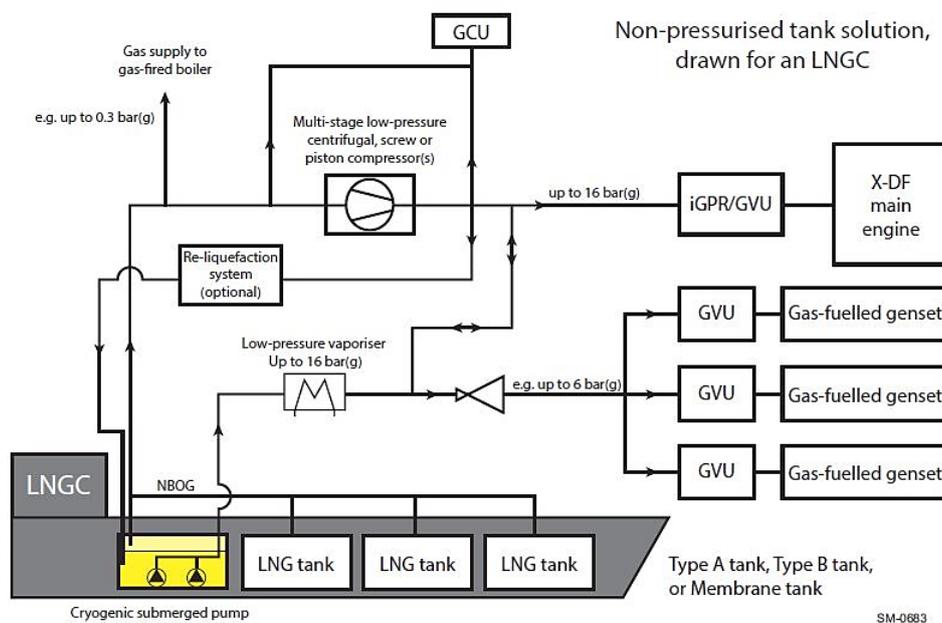


Figura 6.3.2.1. Esquema de un sistema de suministro de GNL a los consumidores. [82]

También hay que decir que todas las tuberías que pasen por espacios cerrados desde los tanques de almacenamiento hasta la sala de máquinas deben tener doble pared, siendo el espacio entre las paredes ventilado permanentemente y comprobado a través de un detector de fugas de gas [81].

6.3.3 Unidad válvulas de gas (GVU) o sistema de gas integrado (iGPR)

Dadas las condiciones de admisión, es esencial tener un control preciso sobre la presión del gas en las válvulas de admisión. Para este cometido de regulación, WinGD ha desarrollado un *sistema de regulación de gas integrado* (iGPR) dentro del motor al

contrario que la *unidad de válvulas de gas (GVU)*, que estaría instalada bien en una zona aislada si la GVU no está contenida en una carcasa, o bien dentro de la sala de máquinas si ésta dispone de la carcasa presente en la Figura 6.3.3.1 [81][82].

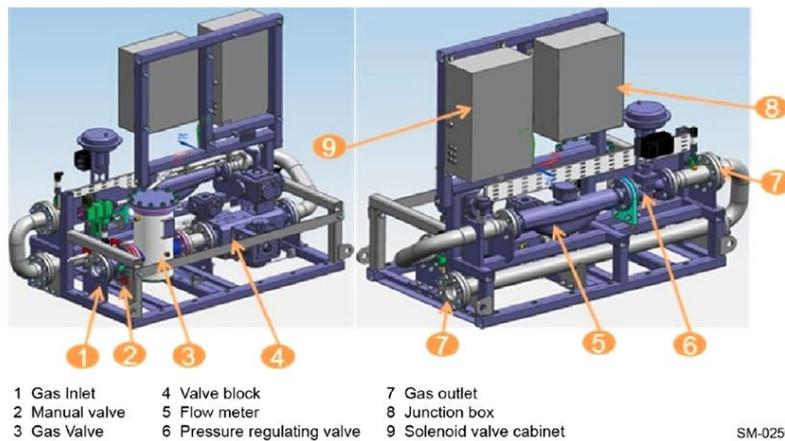
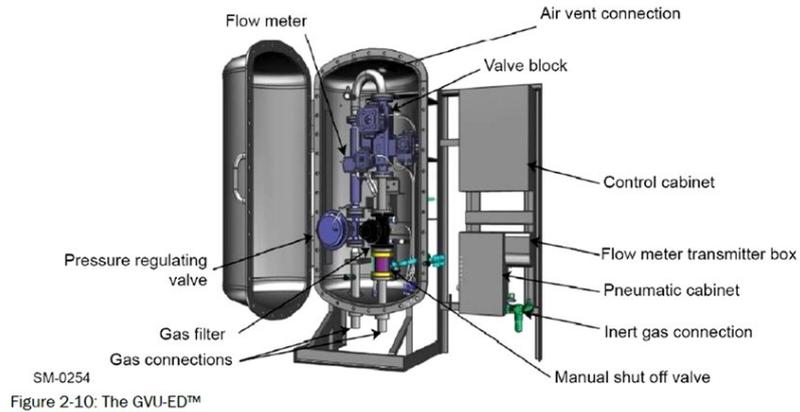


Figura 6.3.3.1. GVU con diseño con carcasa (arriba), y sin carcasa (abajo). [81]

Las principales funciones de la GVU serían:

- Ejercer la función de barrera de seguridad entre el sistema de almacenamiento y preparación de GN y el de suministro al motor
- Regular la presión del gas de acuerdo con la carga del motor
- Detectar pérdidas de gas
- Purgar las líneas de gas cuando el modo gas no está en uso
- Controlar la temperatura del gas

El sistema de regulación interna, que sería la otra opción, sería el regulador de presión de gas integrado (iGPR), que se puede ver en la Figura 6.3.3.2. Este sistema integra todas las funciones de la GVU pero incorporado en el propio motor.

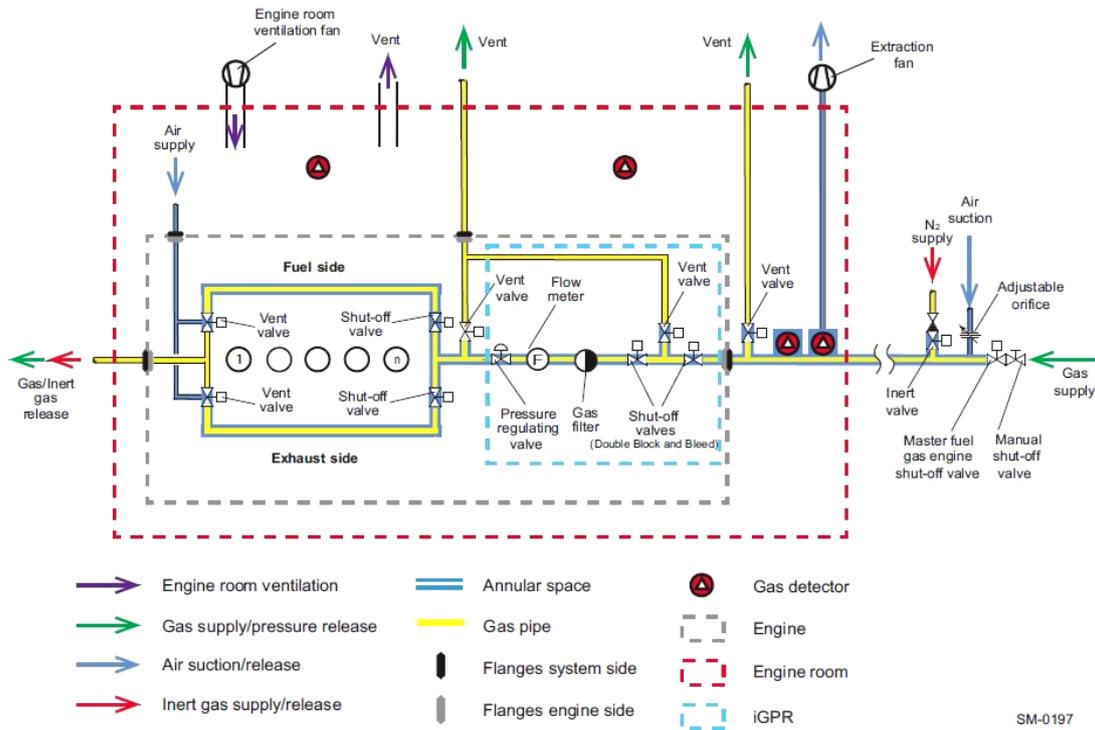


Figura 6.3.3.2. Sistema de suministro de combustible con iGPR. [82]

La presión de admisión de gas, que es regulada por el iGPR o GVU, depende del poder calorífico inferior del combustible gas, de la carga del motor y del rango de potencias del motor. Por ejemplo, para el motor X52DF el rango de presiones de admisión varía entre 6,0 bar y 13,3 bar dependiendo de las características antes descritas en la Figura 6.3.3.3 [82]. La aplicación desarrollada por WinGD llamada GTD proporciona información de ciertas características de diferentes motores de 2T.

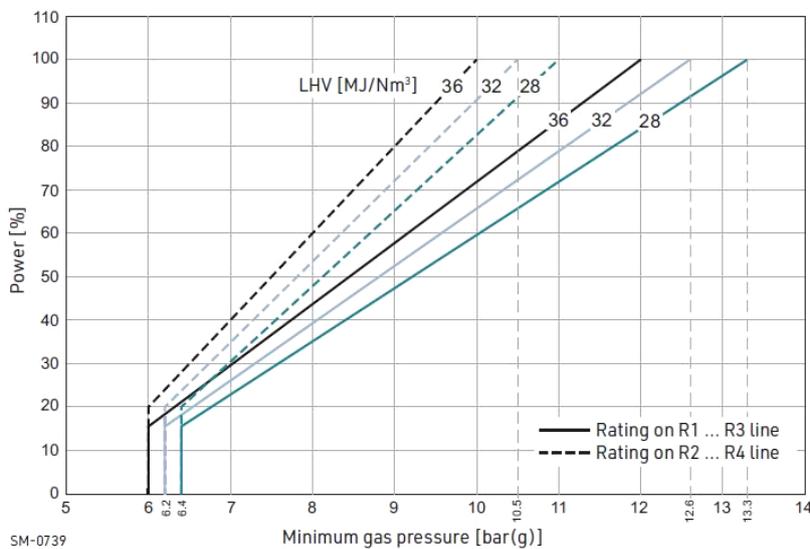


Figura 6.3.3.3. Presiones necesarias para el suministro de gas. [82]

6.3.4 Sistema de combustible gaseoso en el motor

Tras pasar por el iGPR, el gas se distribuye a través de sendos colectores por babor y estribor. Esto se puede ver en la Figura 6.3.4.1, donde en cada cilindro se dispone una válvula de corte que es la encargada de parar el suministro de gas a cada cilindro individualmente. También se disponen válvulas de venteo para asegurar la evacuación del gas cuando el motor no está en modo gas, como se ve en la Figura 6.3.4.1.

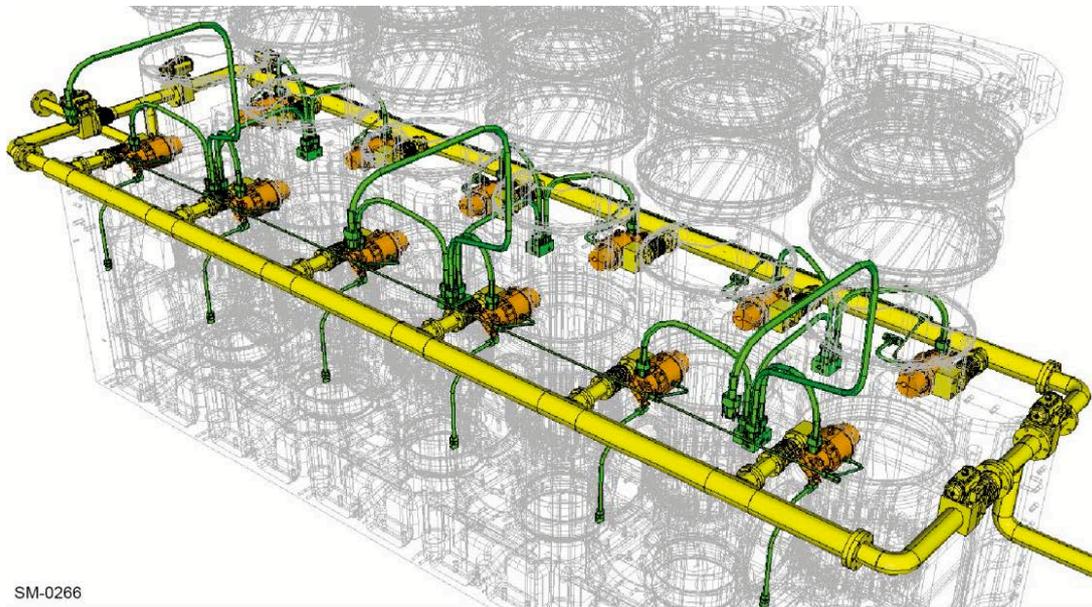


Figura 6.3.4.1. Colector de doble pared con las válvulas de corte y las válvulas de venteo. [81]

Cada cilindro cuenta con dos *válvulas de admisión de gas (GAV)* que introducen el gas a presión en el cilindro antes de que comience la compresión. Las GAV están controladas por el sistema de control del motor, el cual determina a través de unas sondas lambda la cantidad de gas a suministrar. Gracias al sistema de RGE montado en la versión 2 de los motores DF se consiguen mayores relaciones de compresión, debido a que al mezclar gases inertes en el aire de barrido, estos disminuyen la capacidad de que la mezcla de aire/gas entre en detonación por autoencendido [81]. Este aumento en la capacidad de compresión afecta directamente al rendimiento térmico según la ecuación (6.3.1.1), donde r es la relación de compresión volumétrica y γ es el cociente de calores específicos (coef. adiabático) que para un gas perfecto es constante [77].

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (6.3.1.1)$$

La válvula de admisión, que se puede ver en la Figura 6.3.4.2, presenta un émbolo que es accionado por aceite hidráulico cuando el sistema de control del motor acciona la electroválvula. El sistema de control del motor monitoriza los posibles fallos de estanqueidad de las válvulas a través de un sensor de alzada que indica si la posición de la válvula es correcta en el momento de su cierre. La manera para poder mitigar esos fallos de sellado es a través del cierre de las válvulas de corte [80][81].

Las válvulas de admisión de gas cuentan con aceite de sellado que es inyectado a través de unos canales interiores para lubricar el vástago de la válvula y separar el aceite hidráulico del gas a suministrar, eliminando así el riesgo de posibles fugas de gas al sistema de aceite hidráulico [80].

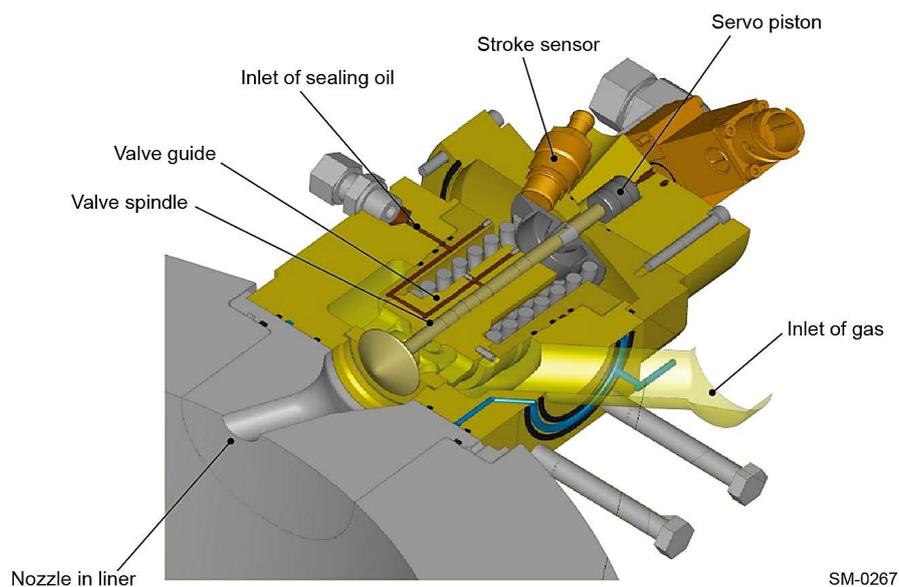


Figura 6.3.4.2. Válvula de admisión de gas (GAV) de asiento esférico. [81]

6.3.5 Sistema de inyección de combustible para llama piloto

El sistema de combustible para llama piloto o, sencillamente, de combustible piloto en los motores X-DF es un sistema aparte de la inyección de combustible convencional. El sistema de combustible convencional sigue siendo el descrito en el apartado 5.2, con tres inyectores por cilindro. Sin embargo, dado que este motor necesita una pequeña energía de activación, se han instalado dos inyectores de combustible piloto.

El sistema que lleva a cabo la inyección del combustible piloto está comandado por el sistema de control del motor, abriendo y cerrando las electroválvulas que dan paso al combustible presurizado por la electrobomba de combustible piloto. Esta bomba

consiste en una serie de pistones radiales que en su movimiento alternativo provocado por un lóbulo que gira elevan la presión de combustible para acumularla en un colector que alimenta a todas las válvulas de combustible piloto. Este sistema se muestra en la Figura 6.3.5.1 en donde se puede ver el accionamiento eléctrico de la bomba.

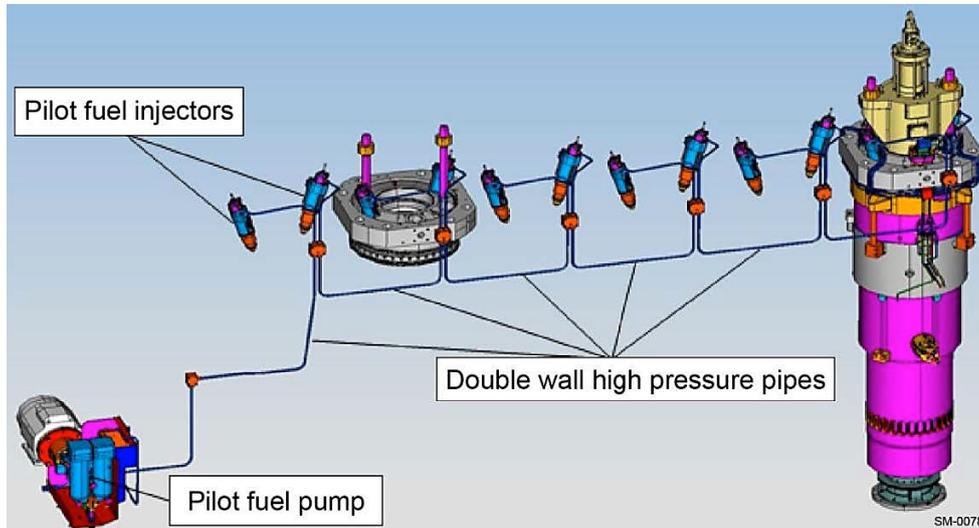


Figura 6.3.5.1. Sistema de combustible piloto. [81]

Los inyectores de combustible piloto, de la Figura 6.3.5.2, están instalados en la culata del motor dando lugar al inicio de la combustión de la mezcla de aire y gas. El sistema de inyección principal podría completar la función antes descrita, pero tendrían un gasto considerable de combustible debido al diseño de los inyectores y toberas, que están concebidos para realizar inyecciones de grandes volúmenes de combustible.

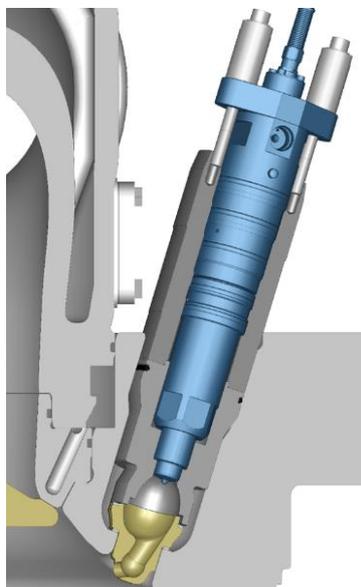


Figura 6.3.5.2. Inyector de combustible piloto y precámara. [80]

Para reducir la cantidad de combustible líquido consumido en modo DF, WinGD ha ideado un sistema de precámara donde se inyecta el combustible piloto creando una intensa y rápida combustión, produciendo así una llama piloto que penetra en el cilindro proporcionando la energía necesaria para la combustión de la mezcla. El combustible piloto representa menos del 1 % del combustible total involucrado en cada combustión, pero tiene un inconveniente, que es la necesidad de realizar inyecciones cada cierto tiempo en modo combustible convencional para eliminar depósitos de la precámara [80][81].

6.3.6 Emisiones y rendimiento

Debido a las menores presiones medias indicadas en el cilindro de este motor respecto a los motores que trabajan a con ciclo Diesel como el ME-GI (6.1), se consiguen menores potencias, lo que genera menores rendimientos indicados. Esto lo demuestran las ecuaciones (6.3.6.1) y (6.3.6.2) [77].

- P_i : Se trata de la potencia indicada
- i : Se trata del tipo de ciclo ($i=1$ por ser 2T)
- n : Son los ciclos llevados a cabo por segundo
- p_{mi} : Es la presión media indicada
- z : Número de cilindros
- V_D : Cilindrada total
- η_i : Rendimiento indicado
- \dot{m}_f : Caudal másico del combustible
- PCI : Poder calorífico inferior

$$P_i = i \cdot n \cdot p_{mi} \cdot z \cdot V_D \quad (6.3.6.1)$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{\dot{m}_f \cdot PCI} \quad (6.3.6.2)$$

Aunque el rendimiento indicado del motor sea inferior, se deben tener en cuenta los costes energéticos de mantener a presiones elevadas del sistema de gas que necesitan los motores de inyección de gas a alta presión.

Debido a las bajas presiones en el cilindro, este motor tiene bajas emisiones de NO_x , pero a nivel emisiones de GEI se tienen que ir solventando los problemas del deslizamiento del metano. En la Figura 6.3.6.1 se observa una comparativa de las distintas emisiones sobre las distintas tecnologías en uso, notándose como bien se ha dicho antes que el deslizamiento de metano es un campo a trabajar por las empresas fabricantes de motores que consumen GN. Con el sistema iCER añadido a la serie 2 de los motores X-DF se recirculan los gases de escape, pudiendo quemar el metano que no se quemó en la combustión anterior, reduciendo así el deslizamiento de metano.

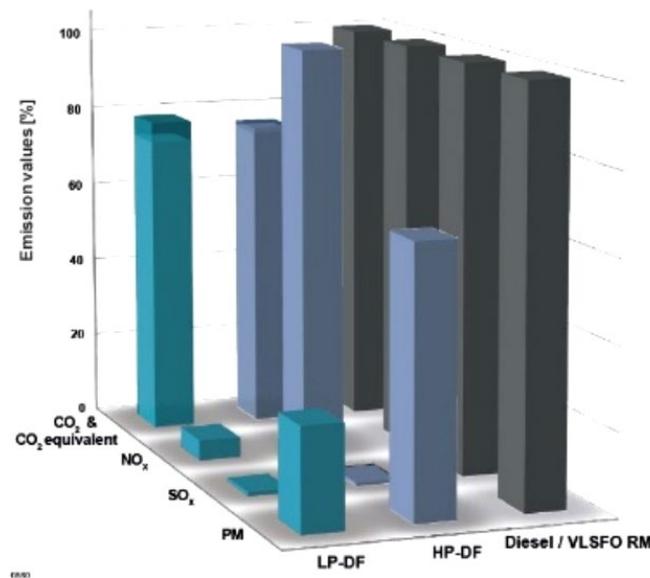


Figura 6.3.6.1. Emisiones de motores DF a baja (LP) y alta presión (HP) y motor diésel con VLSFO. [83]

6.4 MAN B&W ME-GA

Los motores de gas a baja presión (GA, Gas Admission) del fabricante MAN B&W trabajan bajo el mismo principio que los motores X-DF de la casa WinGD, como se puede ver en la Figura 6.4.1. Sus principios fueron descritos en el apartado 6.3. Esta serie de motores se ha estado desarrollando durante los últimos años para suplir el mercado con motores de 2T de bajo coste de operación (Low OPEX), siendo la competencia directa del antes mencionado X-DF. Se entregará el primer motor en el año 2022 según Wayne Jones, jefe de ventas de MAN Energy Solutions [84]. De acuerdo con lo dicho de los motores X-DF, la serie ME-GA está diseñada para consumir GNL, aunque puede modificarse para ser capaz de consumir cualquier tipo de gas inflamable, lo cual es una gran ventaja para futuros fletes.

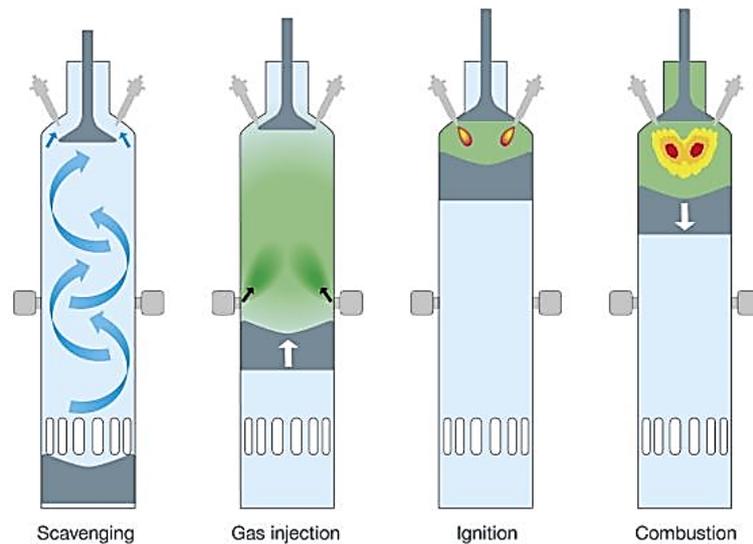


Figura 6.4.1. Fases sobre la combustión en el motor MAN ME-GA. [85]

6.4.1 Sistema de suministro de gas y unidad de válvulas de gas

En la Figura 6.4.1.1 se pueden ver ejemplos de sistemas de suministro. En comparación con los sistemas descritos en la Figura 6.1.1.1, se observa un consumo inferior de energía debido a las bajas presiones de suministro de gas al motor en la serie GA [86].

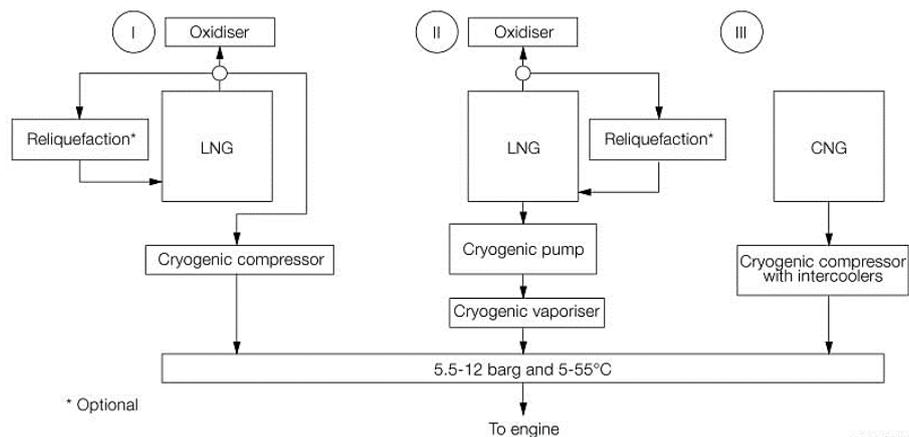


Figura 6.4.1.1. Ejemplos de sistemas de suministro de combustible gas para el motor ME-GA. [86]

El tren de válvulas de gas (GVT) es similar al utilizado en los motores ME-GI pero con diferente presión de trabajo. Se puede ver en el apartado 6.1.2.

6.4.2 Sistema de admisión de gas

A partir del GVT, existirá una doble pared en la tubería de suministro de gas al motor [85], contando en su interior con un sistema semejante al descrito en el apartado 6.1.2.

Como se puede comprobar, muchos de los conceptos añadidos a este motor son los ya implementados en otras series.

Uno de los elementos desarrollados exclusivamente para esta serie de motores es la *válvula de admisión de gas segura (SGAV)*, que incorpora una válvula de bloqueo en su interior para proporcionar una doble seguridad contra fugas de gas [87][88]. Estas válvulas son las encargadas de la introducción del gas en el cilindro y están posicionadas diametralmente opuestas, una a cada costado del motor, como se puede apreciar en la Figura 6.4.2.1. Según dice *The Royal Institution of Naval Architects (RINA)* en [88], la válvula de bloqueo consta de dos electroválvulas controladas independientemente para así proveer de una doble seguridad.

Dentro de las SGAV, existen elementos controlados a partir de aceite hidráulico que suministra la HPS (5.1.1). Existe, asimismo, un aceite de sellado para evitar fugas de gas al sistema de aceite hidráulico [86]. Un sistema similar se vio en el apartado 6.3.4.

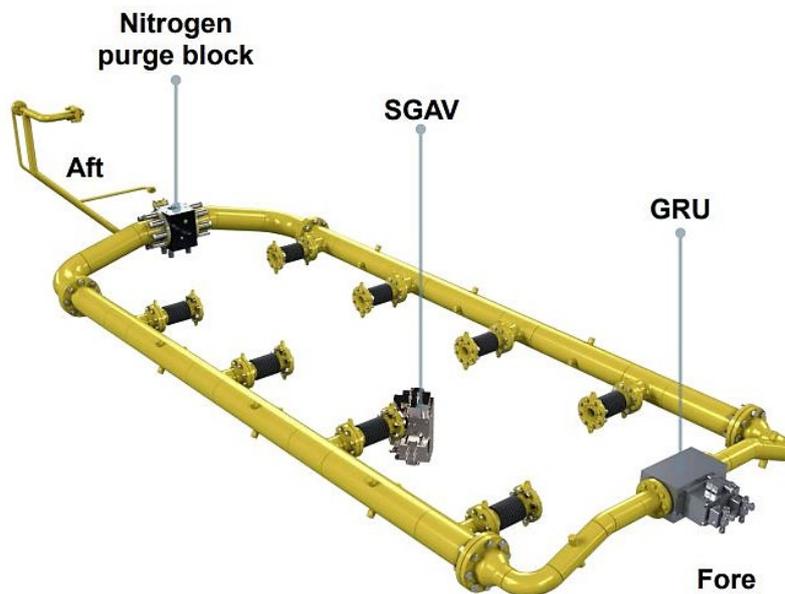


Figura 6.4.2.1. Colector de gas y elementos de admisión del motor ME-GA. [85]

Otra de las incorporaciones es la *unidad de regulación de presión del gas (GRU)* posicionada a proa y que se puede ver en la Figura 6.4.2.1. Esta unidad depende jerárquicamente del sistema general de control del motor y realiza las tareas de despresurizar el colector y regular la presión de admisión del gas, siendo este parámetro de vital importancia en este tipo de motor [87].

6.4.3 Micro inyector-bomba de combustible piloto (MBIV)

Se ha diseñado para esta serie de motores una válvula de inyección exclusiva para el combustible piloto denominada MBIV. Esta válvula está basada en el concepto de la FBIV [86] pero, a diferencia de estas últimas, el tamaño se ve reducido debido a la cantidad de combustible a utilizar durante el modo de operación dual. Se logran cantidades de 0,5 % de combustible piloto respecto al total de combustible consumido.

6.4.4 Recirculación de gases de escape

Anteriormente ya se ha explicado el concepto de *recirculación de gases de escape* (EGR) en el apartado 3.2 y en el 6.3.6. Por los principios apuntados y por la recuperación de energía de los inquemados, la recirculación de gases en los motores de la serie ME-GA llega a reducir el consumo específico de combustible hasta 6,8 g/kWh en modo gas y 7,4 g/kWh en modo combustible líquido. Esto sucede gracias a la posibilidad de operar el motor a mayor presión y al aprovechamiento del metano no quemado en el ciclo anterior. Adicionalmente, se reducen las emisiones de NO_x [85].

7 TÉCNICAS FUTURAS

7.1 Inyector flexible (FFI)

Debido a la creciente necesidad de utilizar combustibles alternativos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, WinGD mediante el proyecto HERCULES 2, ha desarrollado un sistema de inyección que facilitará la evaluación del comportamiento de los combustibles alternativos para así poder seguir mejorando la tecnología de inyección [89].

Este sistema está enfocado a poder realizar la inyección de combustibles convencionales, contando con realizar también la inyección de combustibles alternativos líquidos sin perder la eficiencia en los motores de ciclo Diesel. Muchos de estos combustibles alternativos tienen poderes caloríficos bajos en comparación con los combustibles convencionales, y por ello la cantidad de combustible a inyectar debe de ser mayor. Debido a esto, el inyector se ha desarrollado para que sea flexible pudiendo variar el área de inyección en la tobera cambiando entre tres posiciones: una

en la que la aguja tapa completamente los orificios de inyección, otra que tapa parcialmente los orificios y la última que abre todos los orificios [89][90]. Estas tres posiciones se pueden ver en la Figura 7.1.1, dando lugar así a diferentes cantidades de combustible inyectado sin depender del tiempo de inyección. Para realizar el encendido del combustible alternativo se tiene un inyector de combustible piloto que, en el caso de estudio, es el mismo del sistema RT-flex convencional.

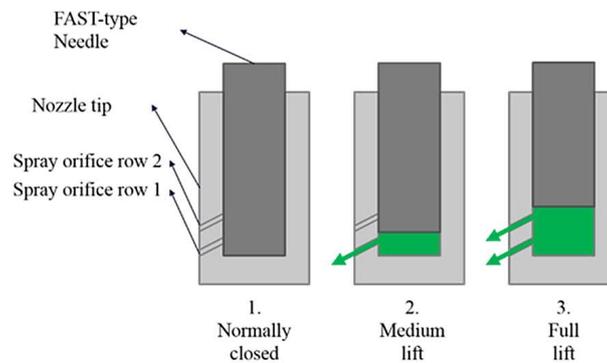


Figura 7.1.1. Diferentes alzadas de la aguja en la tobera en un inyector flexible [90]

Este sistema es muy parecido al utilizado en la última versión del motor ME-GI que utiliza toberas ajustables en los inyectores de combustible piloto, dando lugar a mejoras en la capacidad de inyección de diferentes cantidades de combustible. Este tipo de inyector se puede ver en el subapartado 6.1.4.

7.1.1 Plataforma de pruebas

Las pruebas de inyección se realizaron con metanol y etanol, comparándolas en el banco de pruebas en referencia al fuelóleo ligero. Éstos fueron algunos resultados [90]:

- La presión se incrementa más rápidamente con los combustibles alternativos debido a la volatilidad y rápida mezcla de aire combustible. Ver Figura 7.1.1.1

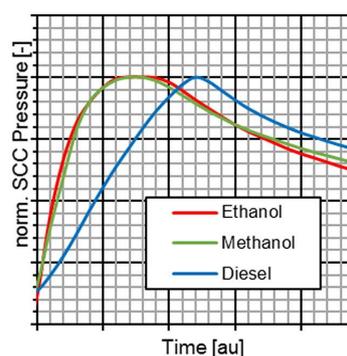


Figura 7.1.1.1. Comparación de presión-tiempo de los diferentes combustibles. [90]

- El calor liberado por los combustibles alternativos se incrementa más rápidamente que el combustible convencional, debido al motivo de la evaporación. Ver Figura 7.1.1.2.

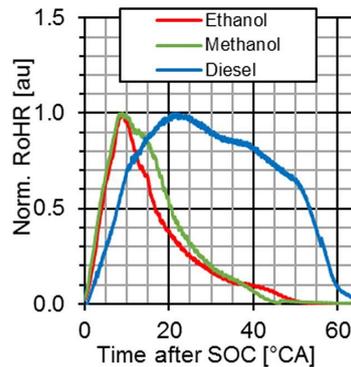


Figura 7.1.1.2. Comparación del calor liberado-grados de los diferentes combustibles. [90]

- Se prueban diferentes tiempos de inyección de combustible piloto para el etanol, dando lugar a una mejora en la combustión cuando la inyección de etanol ocurre antes que la del combustible piloto, para darle tiempo así al etanol a premezclarse con el aire.
- El cambio de una posición a otra de la aguja de inyección en la tobera produce oscilaciones en la presión y distribución del combustible.

7.1.2 Motor de pruebas

El inyector flexible en el motor RTX-6 se monta, como se puede ver en la Figura 7.1.2.1, junto al sistema RT-flex para poder intercambiar entre los dos sistemas de inyección. Es importante señalar que el sistema de inyección piloto instalado en el motor no es más que el propio sistema RT-flex, por lo que no está optimizado para esa tarea [90].

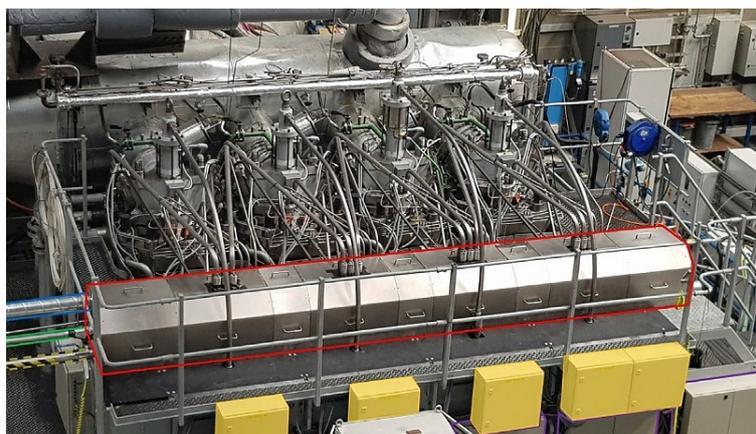


Figura 7.1.2.1. Motor de pruebas RTX-6 dotado de inyectores flexibles FFI. [89]

Algunos de los resultados obtenidos en la prueba con el motor se incluyen a continuación [90]:

- Las revoluciones del motor en el cambio de sistemas de inyección se reducen hasta en un 15 %.
- La liberación de calor del combustible convencional en el sistema de inyección flexible alcanza una menor liberación y dura unos grados más.
- El comportamiento en el uso de etanol y el combustible convencional es muy similar, siendo estable a cualquier carga del motor. Ver Figura 7.1.2.2.

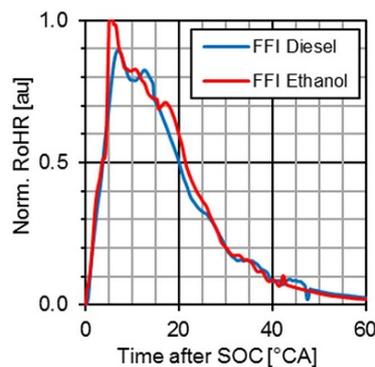


Figura 7.1.2.2. Liberación de calor con varios combustibles con el FFI en el motor RTX-6. [90]

7.2 Motores 2T lentos para amoniaco

Debido al interés creciente por los combustibles alternativos, el fabricante MAN ha ido desarrollando y ofreciendo diferentes soluciones para los múltiples combustibles a consumir, dando lugar a diferentes adaptaciones de su plataforma ME. El amoniaco ha sido puesto sobre la mesa como uno de los combustibles alternativos mejor posicionados para descarbonizar el sector marítimo. Por ello, en MAN B&W, en WinGD y en J-ENG han estado probando motores para su uso. El desarrollo de estos motores aún no ha concluido y se espera que el primer motor que se entregue sea en el año 2024 por parte de MAN y en el año 2025 por parte de WinGD y de J-ENG [39][91].

7.2.1 MAN B&W ME para amoniaco

El motor de amoniaco de MAN B&W se basará en los motores ya introducidos en el mercado como son los ME-LGIM y ME-LGIP, usando el sistema de inyección del LGIP que se muestra en la Figura 7.2.1.1. Tras la realización de pruebas para determinar y

optimizar la combustión del amoniaco, se ha resultado que la presión de suministro debe ser de alrededor de 70-80 bar y la presión de inyección en la cámara de combustión debe de ser entre 600 y 700 bar [39][92].

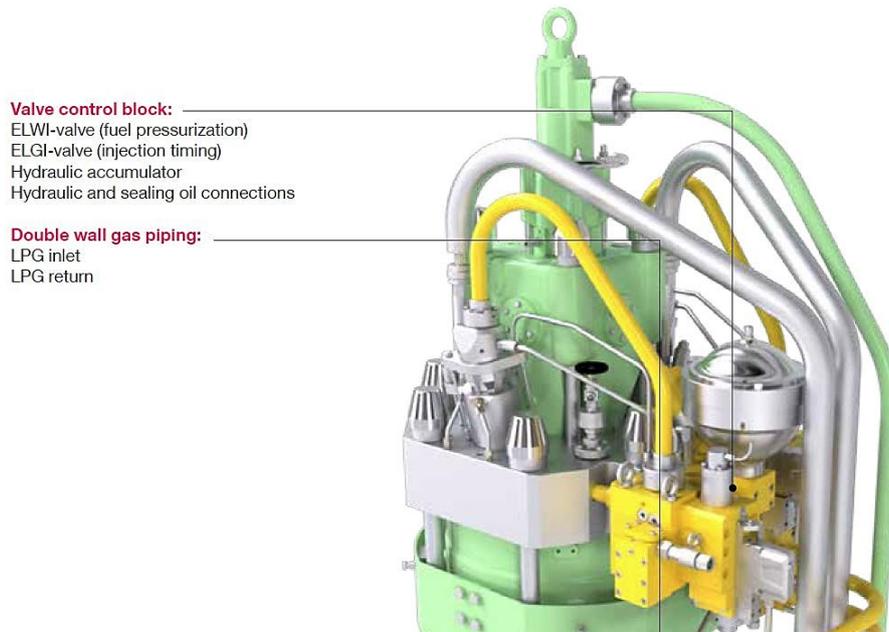


Figura 7.2.1.7.2.1. Sistema de inyección de GLP en el cual se basa el motor de amoniaco. [92]

Los sistemas de suministro de amoniaco no diferirán del sistema de suministro del GLP, tomando éste como punto de inicio para el desarrollo [39]. La idea básica para el sistema de suministro se puede apreciar en la Figura 7.2.1.2.

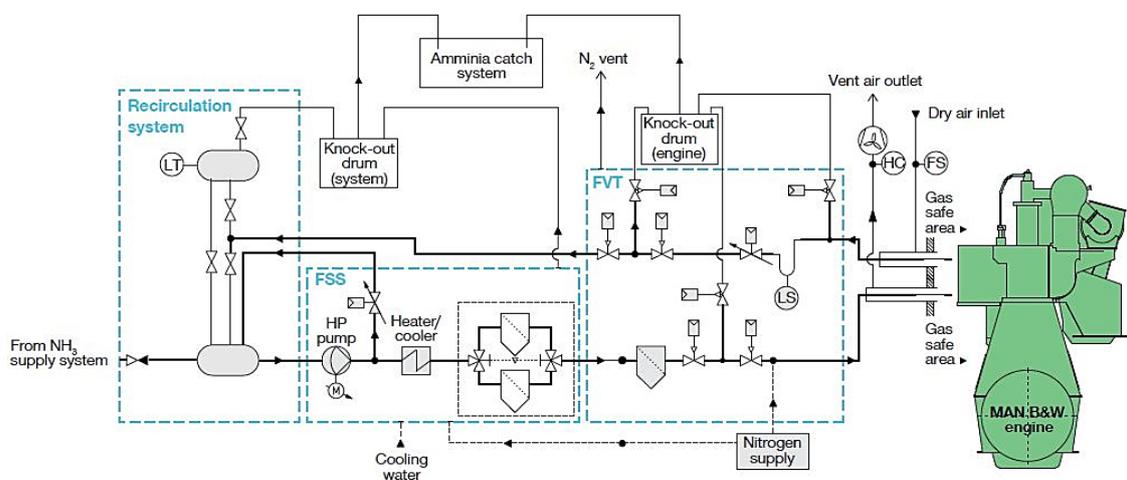


Figura 7.2.1.7.2.2. Esquema base para el suministro de amoniaco al motor MAN B&W ME-LGI. [39]

Como se puede apreciar en la Figura 7.2.1.2, existe un sistema de recirculación para mantener la fase gas y la fase líquida separadas. Este sistema envía la fase gas al tanque superior para volver a mandarlo al tanque inferior en fase líquida. Esto evita problemas de cavitación en la bomba de alta presión. Este sistema recibe también el amoníaco sobrante de la inyección, que se encontrará en unas condiciones bifásicas causadas por el calor aportado por el motor [39]. Debido a las propiedades tóxicas del amoníaco, no se puede expulsar a la atmósfera por los sistemas de venteo, por lo que se instalará un sistema de captura de amoníaco.

Sabido que el amoníaco tiene un efecto corrosivo sobre el cobre y las aleaciones de níquel con porcentajes superiores al 6 %, los sellos, las juntas y los componentes eléctricos de este motor deben ser sustituidos por otros compuestos como acero inoxidable o teflón [92].

7.2.2 WinGD X y X-DF para amoníaco

Las plataformas que utilizará WinGD para el uso de amoníaco y metanol serán las ya bien conocidas X y X-DF, que abordan tecnologías de ciclo Diesel y ciclo Otto [93]. Estos motores utilizarán tecnologías como la admisión de gas y, bajo mi opinión, inyectores flexibles para varios combustibles como los que se ven en el apartado 7.1.

7.3 J-ENG UEC-LSJ Inyección estratificada

La inyección estratificada introducida a través de la inyección de agua en el gasóleo marino, como se vio en el subapartado 5.3.2, sigue en desarrollo para aplicar combustibles alternativos líquidos en los motores a través del sistema de estratificación, como se puede ver en la Figura 7.3.1 [94].

El motor UEC-LSJA utilizará esta estrategia para consumir amoníaco en un 95 % del total de combustible. Esta tecnología se aplicará a los buques que transporten amoníaco de la compañía nipona NYK. El primer buque de esta serie de VLGCs se entregará en 2025 [95][96].

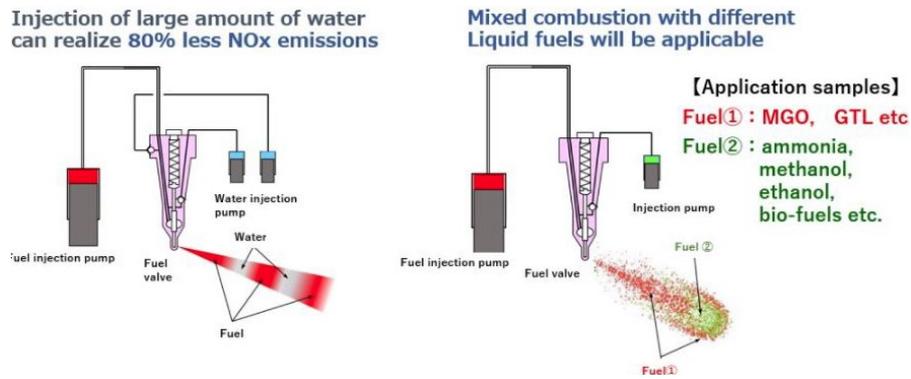


Figura 7.3.1. Sistema de inyección estratificado con agua y con combustibles alternativos. [94]

7.4 J-ENG UEC LSGH

Para acelerar el desarrollo de los motores de hidrógeno, las tres compañías japonesas J-ENG, Yanmar Power Technology y Kawasaki Heavy Industries, han formado una empresa para el desarrollo conjunto de las tecnologías de propulsión con hidrógeno. La empresa se llama HyEng Corporation y su objetivo es la descarbonización del sector marítimo en Japón a través del desarrollo de motores de 4T de velocidades medias comercializados por Kawasaki, motores de 4T de velocidades medias y altas con mayor potencia que los anteriores comercializados por Yanmar, y motores de 2T de gran potencia comercializados por J-ENG [97][98].

El motor de 2T será el llamado UEC-LSGH y utilizará la base del sistema DF para inyectar el hidrógeno a altas presiones e iniciar la combustión con combustible piloto. El primer motor a bordo se espera en el año 2026, con una potencia de 5000 kW y un diámetro del cilindro de 35 cm. Una vez comprobada la tecnología sobre e, se iniciará el desarrollo de un motor sin necesidad de combustible piloto [95].

CONCLUSIONES

Desde hace 130 años el motor térmico alternativo de combustión interna ha estado presente en el ámbito marítimo, tanto para propulsión naval como máquina primaria para generación de energía eléctrica a bordo. En todo este tiempo la tecnología de la combustión y los avances en los materiales han dado lugar a grandes avances en cuestión de rendimiento térmico y mecánico que hacen que no tenga competidor en términos de costes de operación.

Sin embargo, sus virtudes se ven empañadas por un punto débil que es muy preocupante para la vida tal como la conocemos. Al utilizar mayormente derivados del petróleo como combustible, los gases de la combustión que abandonan el motor están compuestos por sustancias nocivas para el medioambiente que afectan al normal desarrollo de la vida. Entre todos ellos destacan los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas en suspensión (PS). Los primeros pueden reaccionar formando compuestos ácidos y las partículas aparecen en numerosos estudios como causantes de muerte prematura en personas. Por si esto no fuera suficiente, los óxidos de carbono (CO_x) tienen una notable influencia en el calentamiento global debido a que crean una capa que no permite disipar el calor radiante al exterior de la atmósfera, provocando diversos fenómenos meteorológicos imprevistos que dan lugar a situaciones catastróficas varias veces al año en diferentes puntos del planeta.

Por ello, las organizaciones mundiales que velan por el medioambiente dictan regulaciones cada vez más restrictivas y exigentes con el fin de que el uso de las máquinas térmicas de combustión sea sostenible en el tiempo sin provocar más deterioro al ecosistema. En el ámbito del transporte por mar la Organización Marítima Internacional ha establecido el Convenio MARPOL el cual, en su Anexo VI, regula las emisiones de los buques a la atmósfera, más concretamente, la de los motores de propulsión y generación eléctrica a bordo. Por lo tanto, desde hace unos años se vienen estableciendo límites como manera de controlar las emisiones, unos generales para todo el planeta y otros particulares más restrictivos para zonas protegidas. Una de las primeras medidas fue limitar el contenido máximo de azufre del combustible así como limitar los óxidos de nitrógeno en función de la velocidad de giro del motor. Más adelante se estipuló que los óxidos de carbono también deberían ser controlados por

medio de índices de eficiencia energética del buque, en los cuales influye el rendimiento de la combustión pero también la capacidad de carga y velocidad.

Con el fin de cumplir con estas normativas, en la parte concerniente a la combustión, los fabricantes se han visto obligados a reinventar el motor Diesel. En un primer momento se recurrió a técnicas secundarias que actuaban sobre las emisiones intentando reformarlas o neutralizarlas químicamente pero al no ser totalmente efectivas han tenido que buscar técnicas primarias que eviten o reduzcan la formación de contaminantes en la generación de energía mecánica y eléctrica a bordo. Así se han hecho numerosos avances, algunos más satisfactorios que otros a nivel operativo. En general, siempre aportan una complejidad técnica nueva a los tripulantes que se ven obligados a una formación continua para atender las vicisitudes técnicas de los nuevos equipos instalados.

El primer paso para evitar la formación de contaminantes fue la incorporación del control electrónico a la gestión de la combustión. Se controla el caudal de combustible, el tiempo de inyección y también la turbulencia y exceso del aire comburente. Así aparecieron la serie ME de MAN B&W y la RT-flex de Wärtsilä en sustitución de las clásicas MC y RTA respectivamente actuadas de modo mecánico. Esto trajo consigo también una reducción del peso del motor al poder prescindir del sincronismo por eje de camones, confiando el control del inicio de la inyección a sensores en el eje de cigüeñales y el de caudal de combustible a sensores en colector de barrido entre otros.

Estos motores fueron muy buen campo de experiencia para el siguiente desafío: el uso de combustible con menos carbono. Debido a su fácil obtención y otras cuestiones de índole económica el gas natural rápido se postuló como una apuesta de futuro y los fabricantes buscaron como introducirlo en los motores navales para mantener el rendimiento con menos emisiones. Aparecieron así las gamas ME-GI de MAN B&W y la XDF de Wärtsilä, renombrada como WinGD tras su adquisición por parte del gobierno chino. Aunque el combustible es el mismo, la gama ME-GI lo introduce a alta presión con un notable riesgo de fuga (methane slip) y la serie XDF lo hace a baja presión. Este motor tiene algo menos de rendimiento al no alcanzarse las mismas presiones efectivas en el interior del cilindro pero tiene a favor los menos gastos energéticos del uso de los compresores de gas. Con la intención de reducir el deslizamiento de metano, MAN

B&W ha diseñado la gama ME-GA que estará en servicio a partir de 2022 en las primeras unidades de metaneros de 174.000 m³, construcciones 8100 y 8101 del astillero Hyundai Samho Heavy Industries de Corea.

Puesto que las intenciones futuras están apuntando a la descarbonización total, el gas natural, compuesto mayormente por un hidrocarburo no es la solución. Hay, pues, que recurrir al uso de combustibles alternativos sin carbono. Entre ellos aparecen varios candidatos, los más populares el hidrógeno, el amoníaco y el metanol. También el etanol se está viendo como una posibilidad. De estos combustibles, químicamente, se obtendría energía y como gases de exhaustación, sólo agua y nitrógeno. En principio, todo es esperanzador pero hay que llegar a dominar la combustión de manera estable. Los primeros intentos, como no podía ser de otra manera, los dan los fabricantes habituales. MAN B&W ha habilitado la gama ME-LGI con un nuevo inyector-bomba llamado FBIV que tiene un diseño que permite su adaptación a varios combustibles alternativos de diferente poder calorífico sin necesidad de ser desmontado. Por su parte, WinGD no facilita información pero no escatima medios en hacer valer su motor XDF como multicomcombustible para hidrógeno y amoníaco en el futuro. También ha aparecido un nuevo diseño de la antigua Mitsuishi, renombrada J-ENG, que ofrece datos muy prometedores en sus diseños UEC-LSJ (inyección de agua estratificada) y UEC-LSGH (inyección de hidrógeno a alta presión) para motores de 5000 kW.

Todavía no hay experiencia suficiente para decantarse por una u otra gama de motores como la mejor pero está claro que cuanto menos fuga de metano exista y más flexible sea el motor para consumir cualquier tipo de combustible sin carbono más adecuado será para su uso en las construcciones navales de las próximas décadas, entre otras cosas por las dificultades de abastecimiento. Esto conllevará la necesidad de Oficiales de Máquinas y Electrotécnicos cualificados por lo que la formación continua será tanto o más importante que los avances que vayan ofertando los fabricantes de motores a los astilleros.

REFERENCIAS

- [1] L. Mazarredo. *Evolución de la propulsión naval mecánica*. Madrid: Fondo editorial de ingeniería naval, 1992.
- [2] Motorradiesel. DEUTZ, una historia de más de 150 años [Online]. Available: <https://cutt.ly/MOXnkD1> (16/02/2022).
- [3] Sulzer Ltd. Sustainably successful since 1834 [Online]. Available: <https://cutt.ly/vOXWVo0>. (16/02/2022).
- [4] Tecnología Marítima. (2012, Ago, 19). Historia de los motores marinos Sulzer [Online]. Available: <https://cutt.ly/5OXEXya> (08/02/2022).
- [5] Wikipedia. (2021, Feb, 02). Burmeister & Wain [Online]. Available: <https://cutt.ly/nOXTEMX> (16/02/2022).
- [6] D. H. Marter. *Motores térmicos*. México: UTEHA (Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, 1964.
- [7] R.Lluch. *Motores diesel marinos*. Barcelona: Editorial CEAC, 1967.
- [8] M. Latache. *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*. (Ed.10). Elsevier, 2021.
- [9] Tecnología Marítima. (2012, Sep, 09). Análisis CFD del motor marino MAN 7S50MC [Online]. Available: <https://cutt.ly/ROCF3Dj> (16/02/2022).
- [10] Ingeniería naval. (2000, Ene). Nº 767 Pag 25 [Online]. Available: <https://cutt.ly/1OCJ3jN> (16/02/2022).
- [11] WinGD. Our Engine History [Online]. Available: <https://cutt.ly/5OCVDib> (16/02/2022).
- [12] IMO. (2020) Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) [Online]. Available: <https://cutt.ly/KOVfE4A> (16/02/2022).
- [13] Wärtsilä Switzerland Ltd. (2004, Ago) The Sulzer RT-flex Common-Rail System Described [Online]. Available: <https://cutt.ly/hOVg51J> (16/02/2022).
- [14] IRENA. (2021, Oct). A pathway to decarbonize the shipping sector by 2050 [Online]. Available: <https://cutt.ly/DOVkv3Q> (16/02/2022).
- [15] Y. Wang y L. Wright. "A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation". *World*, 2, 456-481, 21 Octubre de 2021.

- [16] A. Sharafian, P. Blomerus y W. Mérida. "Natural gas a ship fuel": Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potencial. *Energy Policy*, 131, 332-346, 2019.
- [17] H.O. Benavides y G.E. León. "Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático". IDEAM-METEO/008. Diciembre 2007. Available: <https://cutt.ly/rOVniTh> (16/02/2022).
- [18] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Óxidos de azufre [Online]. Available: <https://cutt.ly/5OVmgU6> (16/02/2022).
- [19] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Óxidos de nitrógeno [Online]. Available: <https://cutt.ly/5OVmUAL> (16/02/2022).
- [20] Herramientas de ingeniería. (2018, May, 31). Óxidos de nitrógeno (NO_x) [Online]. Available: <https://cutt.ly/lOVm2Dh> (16/02/2022).
- [21] Soler Palau. Partículas en suspensión: que son, como nos afectan y cómo podemos reducir su presencia [Online]. Available: <https://cutt.ly/kOVQI5s> (16/02/2022).
- [22] A. Cerrillo, La Vanguardia. (2021, Feb, 09). La polución de los combustibles fósiles causa una de cada cinco muertes en el mundo [Online]. Available: <https://cutt.ly/KOVQbma> (16/02/2022).
- [23] MAN Energy solutions. (2018, Oct). Basic principles of ship propulsion [Online]. Available: <https://cutt.ly/NOVYsWz> (16/02/2022).
- [24] IMO. (2020). Óxidos de nitrógeno (NO_x)-Regla 13 [Online]. Available: <https://cutt.ly/DOVPMak> (16/02/2022).
- [25] Daihatsu diesel MFG. CO.,LTD. Nitrogen Oxides (NO_x) Regulations [Online]. Available: <https://cutt.ly/vOVAIhl> (16/02/2022).
- [26] IMO. (2020). Zonas especiales en virtud del convenio MARPOL [Online]. Available: <https://cutt.ly/7OVSwTj> (16/02/2022).
- [27] Örsay Group. SCR (SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM) [Online]. Available: <https://cutt.ly/HOVS8HQ> (16/02/2022).
- [28] MAN Energy Solutions. Introduction to future fuels [Online]. Available: <https://cutt.ly/3OVGQBX> (16/02/2022).
- [29] M. Wiese, Lloyd's List. (2021, oct, 25). Focus on methane slip from LNG-fuelled ships intensifies [Online]. Available: <https://cutt.ly/2ONR3EE> (16/02/2022).

- [30] MAN Energy Solutions. Power-to-X: The key to decarbonization [Online]. Available: <https://cutt.ly/bO4sXld> (16/02/2022).
- [31] .G. Nikolaou. "LPG for Marine Engines The Marine Alternative Fuel", World LPG Association, Irlanda, (2021) [Online]. Available: <https://cutt.ly/tONmPO4> (16/02/2022).
- [32] U.S. Energy Information Administration. Hydrocarbon gas liquids explained [Online]. Available: <https://cutt.ly/FONQRuy> (16/02/2022).
- [33] MAN Energy Solutions. (2021, Mayo). Power into the future, MAN B&W ME-LGIP: the world's first dual-fuel LPG marine engine [Online]. Available: <https://cutt.ly/IONWKms> (16/02/2022).
- [34] J. Ellis y K. Tanneberger. "Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping", European Maritime Safety Agency, (2015, Dic, 04) [Online]. Available: <https://cutt.ly/0ONlcRo> (16/02/2022).
- [35] D. Gielen y G. Dolan "Innovation Outlook Renewable methanol", International Renewable Energy Agency., (2021) [Online]. Available: <https://cutt.ly/EONOSs2> (16/02/2022).
- [36] American Bureau of Shipping."Guide for Methanol and Ethanol Fueled Vessels", American Bureau of Shipping, USA, (2022, Ene). [Online]. Available: <https://cutt.ly/gONH87T> (16/02/2022).
- [37] J.I. Linares y B.Y. Moratilla. *El hidrogeno y la energía*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del KCAI, 2007.
- [38] MAN Energy Solutions. "Hydrogen in shipping". MAN Energy Solution, GGKM-AUG-07210.5.
- [39] MAN Energy Solutions. "MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia", MAN Energy Solutions, 5510-0241-01 (2020, Nov) [Online]. Available: <https://cutt.ly/oOG4NSI> (16/02/2022).
- [40] Oil tanking. Etano [Online]. Available: <https://cutt.ly/zOMuYbC> (16/02/2022).
- [41] Green Car Congress. (2018, Ago, 27). First conversion of a slow-speed marine diesel to operate on ethane as a fuel [Online]. Available: <https://cutt.ly/VOMu4QX> (16/02/2022).
- [42] MAN Diesel & Turbo. "Low-Speed Portfolio Announces New Mk 10 Platform", MAN Diesel & Turbo, Press Release, (2016, Sep, 06), Ref.: 6510-0427.

- [43] MAN Diesel. (2009, Abr, 01). MAN Diesel PrimeServ Academy Introduction to the ME Engine [Online]. Available: <https://cutt.ly/bOMdfiz> (16/02/2022).
- [44] MAN Energy Solutions “MAN B&W G70ME-C10.5”, MAN Energy Solutions, Project Guide (1.0 ed.) (2021, Sep) [Online]. Available: <https://cutt.ly/IOMhy2U> (16/02/2022).
- [45] Ingmarz.com. ME Engines- the New Generation of Diesel Engines [Online]. Available: <https://cutt.ly/SOMkEnU> (09/02/2022).
- [46] MAN Diesel & Turbo. (2009, Abr, 01). MAN Diesel PrimeServ Fuel Oil System [Online]. Available: <https://cutt.ly/pOMjv0k> (04/02/2022).
- [47] K. Kuiken. *Diesel I Engines for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW*. 3rd. ed. Holanda. Target Global Energy Training, 2017.
- [48] A. Kyrtatos y WinGD. “The Development of the Moderns Low-Speed Two-stroke Marine Diesel Engine” in CIMAC CONGRESS, Helsinki, 6-10 Junio de 2016. [Online]. Available: <https://cutt.ly/jOMVCQQ> (16/02/2022).
- [49] H. Brunner, J. N. Constantin, L. Knipstrom.. “W-X92 The most efficient Engine for large Container Vessels” Winthertur Gas & Diesel (2016, Junio) [Online]. Available: <https://cutt.ly/tOMMLFh> (16/02/2022).
- [50] Wärtsilä Land and sea academy. “RT-flex Training, Function of the different Hydraulic- and Pneumatic Components”, Wärtsilä Land and sea academy. (2009, Abr, 30) [Online]. Available: <https://cutt.ly/yOM1Cfx> (16/02/2022).
- [51] Wärtsilä. Wärtsilä FuelFlex injection control unit upgrade for RT-flex engines [Online]. Available: <https://cutt.ly/jOM0gsL> (16/02/2022).
- [52] Wärtsilä Engine Services. “Wärtsilä FAST upgrade”, Wärtsilä Engine Services. (2017) [Online]. Available: <https://cutt.ly/cOM2IHn> (16/02/2022).
- [53] J.ENG. History [Online]. Available: <https://cutt.ly/BOM3jJd> (16/02/2022).
- [54] C. Matsuda. “The Latest Technologies of J-ENG UE Engine, New Engine Developments- Diesel” in CIMAC CONGRESS, Vancouver, 10-14 Junio de 2019. [Online]. Available: <https://cutt.ly/IOM8YKm> (16/02/2022).
- [55] I. Terata, A. Aota, K. Edo. “Introduction of the Latest Mitsubishi UE Engine Technologies” in Journal of the JIME, 50, 6, 2015. Available: <https://cutt.ly/WOM4Gx5> (16/02/2022).

- [56] M. Sugihara, K. Edo, T. Tanida. "Environmental Friendly Two-stroke Marine Diesel Engine, Mitsubishi UEC Eco-Engine" in 7th Internacional Symposium on Marine Engineering, 24-28 de Octubre de 2005. Available: <https://cutt.ly/bOM5u5L> (16/02/2022).
- [57] C. Matsuda. "The latest technologies for new concept UEC-LSJ engine" in 10th CIMAC CASCADES, Kobe, Japon, 12 de Octubre de 2018. Available: <https://cutt.ly/8OM58N7> (16/02/2022).
- [58] MAN Prime Serv. "ME-GI/GIE Pump Vaporizer Unit for LNG and ethane", MAN Energy Solutions. (2020, Sep) [Online]. Available: <https://cutt.ly/kOsLa71> (16/02/2022).
- [59] MAN Energy Solutions. "MAN B&W G70ME-10.5-GI" MAN Energy Solutions. (2021, Sep). Project Guide (1.0 ed.) [Online]. Available: <https://cutt.ly/cOsZBw7> (16/02/2022).
- [60] MAN Diesel & Turbo. "ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines, A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas", MAN Diesel & Turbo. (2014, Ago).
- [61] P. M. Christensen. "Surveyor's day Gard/Norwegian Hull Club", MAN Diesel & Turbo, Bergen, (2017, oct) [Online]. Available: <https://cutt.ly/mOoGUZI> (16/02/2022).
- [62] MAN Energy Solutions. "LNGC-optimised designs of ME-GI engines and fuel gas supply systems", MAN Energy Solutions, 5510-0242-01 (2020, Abr) [online]. Available: <https://cutt.ly/POsH6sW> (16/02/2022).
- [63] MAN Energy Solutions "ME-GI Mk.2 The continuous development of ME-GI", Dual Fuel Engines Seminar-Benaki Museum, (2019, Oct, 23).
- [64] MAN Energy Solutions. "New ME-GI platform", MAN Energy Solutions, Market Update Note, (2020, Jun, 23) [online]. Available: <https://cutt.ly/uOsLXsB> (16/02/2022).
- [65] MAN Energy Solutions. "G70ME-C-GI design updates", MAN Energy Solutions, Market Update Note, (2019, Feb, 25) [online]. Available: <https://cutt.ly/QOsXD3B> (16/02/2022).
- [66] Spiegato. ¿Qué es el acero de tungsteno? [Online]. Available: <https://cutt.ly/yO63Cgn> (16/02/2022).

- [67] MAN Energy Solutions. "Service experience", MAN Energy Solutions, (1.0 ed.), 5510-0238, (2019, Jul) [Online]. Available: <https://cutt.ly/2Os2wSV> (16/02/2022).
- [68] MAN Diesel & Turbo. "Motor Dual Fuel-Desarrollado en la manera correcta, MAN B&W ME-GI-S y MAN B&W ME-LGI-S para aplicaciones estacionarias", MAN Diesel & Turbo, 5510-0160, (2014, Sep). [Online]. Available: <https://cutt.ly/IOddsL> (16/02/2022).
- [69] MAN Energy Solutions. "MAN B&W ME-LGI engines", MAN Energy Solutions, 1510-0216-03, (2018, Jun) [online]. Available: <https://cutt.ly/FOkNW9y> (16/02/2022).
- [70] MAN Energy Solutions. "The Methanol-fuelled MAN B&W LGIM Engine", MAN Energy Solutions, 5510-0172-01, (2021, Ene) [online]. Available: <https://cutt.ly/cOkX3Zx> (16/02/2022).
- [71] DIESELFACTS. (2016). ME-GI and ME-LGI Gas Technologies- Development Status and Results. Available: <https://cutt.ly/uOkVF3F> (16/02/2022).
- [72] MAN Diesel & Turbo. "Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI series", MAN Diesel & Turbo, 5510-0172-00, (2014, Ago) [online]. Available: <https://cutt.ly/QOkVqls> (16/02/2022).
- [73] MAN Energy Solutions. "MAN B&W ME-LGIP dual-fuel engines", MAN Energy Solutions, 5510-0210-00, (2018, Sep) [Online]. Available: <https://cutt.ly/xOkNwji> (16/02/2022).
- [74] MAN Energy Solutions. "MAN B&W G70ME-C10.5-LGIP", MAN Energy Solutions, Project Guide, (0.5 ed.), 7020-0287-01, (2021, Oct) [Online]. Available: <https://cutt.ly/eOkBv4D> (16/02/2022).
- [75] Wärtsilä. Wärtsila LPG Fuel Supply System [Online]. Available: <https://cutt.ly/TOzA9Tv> (16/02/2022).
- [76] ElectronicFUELTECH. Fuel Valve Train LPG [Online]. Available: <https://cutt.ly/gOckHOT> (16/02/2022).
- [77] F. Paury y J. M. Desantes. *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Editorial Reverté, 2011.
- [78] Wikipedia. Temperatura adiabática de llama [Online]. Available: <https://cutt.ly/WOvy1s1> (16/02/2022).

- [79] MAN Energy Solutions. “MAN Energy Solutions Unveils ME_LGIP Dual-Fuel LPG Engine”, MAN Energy Solutions, Press release, (2018, Sep, 18) [Online]. Available: <https://cutt.ly/NOBEx5w> (16/02/2022).
- [80] M. Ott, WinGD. “The 2-Stroke Low-pressure Dual Fuel Technology: From Concept to Reality”, in CIMAC CONGRESS, Helsinki, 6-10 Junio de 2016 [Online]. Available: <https://cutt.ly/dOmUagH> (16/02/2022).
- [81] WinGD. “2-Stroke Dual Fuel Safety Concept”, Winthertur Gas & Diesel, DAAD046594, (2021, Nov, 26) [Online]. Available: <https://cutt.ly/SOmYTWV> (16/02/2022).
- [82] WinGD. “X52DF”, Winthertur Gas & Diesel, Marine Installation Manual, (2021, Jul) [Online]. Available: <https://cutt.ly/ROQTVYi> (16/02/2022)
- [83] WinGD. “X_DF Low-pressure X-DF Engines FAQ”, Winthertur Gas & Diesel, (2020) [Online]. Available: <https://cutt.ly/gOmGZXJ> (16/02/2022).
- [84] MAN Energy Solutions. (2021, Mar, 18). World-First ME-GA Engine demonstration [Online]. Available: <https://cutt.ly/BOlg5qp> (16/02/2022)
- [85] MAN Energy Solutions. “World’s first demonstration of the new MAN B&W dual-fuel ME-GA engine”, MAN Energy Solutions, (2021) [Online]. Available: <https://cutt.ly/IOYjkcC> (16/02/2022).
- [86] MAN Energy Solutions. “MAN B&W G70ME-C10.5-GA2”, MAN Energy Solutions, Project Guide, 7020-0276-04, (0.5 ed.), (2021, Sep) [Online]. Available: <https://cutt.ly/6OYjF1p> (16/02/2022).
- [87] MAN Energy Solutions. “Advantages of the flexible ME-GA concept”, MAN Energy Solutions, Market Update Note, (2020, Sep, 21) [Online]. Available: <https://cutt.ly/WOIDYGU> (16/02/2022).
- [88] The royal Institution of naval architects. MAN Energy Solutions Showcases ME-GA Engine [Online]. Available: <https://cutt.ly/eOIRFdo> (16/02/2022).
- [89] WinGD. “Flexible injector to Advance Alternative Fuel Research”, Winthertur gas& Diesel, (2020) [Online]. Available: <https://cutt.ly/IOF6Lj1> (16/02/2022).
- [90] A. Schmid, F. Schmitz, T. Yildirim, N. Yamada. “Fuel Flexible injection System-How to Handle a Fuel Spectrum from Diesel-Like Fuels to Alcohols”, in CIMAC CONGRESS, Vancouver, 10-14 Junio de 2019 [Online]. Available: <https://cutt.ly/WOGqs0w> (16/02/2022).

- [91] Ammonia Energy Association. WinGD to develop ammonia maritime engines by 2025 [Online]. Available: <https://cutt.ly/qOLw0Tn> (16/02/2022).
- [92] MAN Energy Solutions. “Engineering the future two-stroke green-ammonia engine”, MAN Energy Solutions, 5510-0241-00, (2019, Nov). [Online]. Available: <https://cutt.ly/zOG7r9U> (16/02/2022).
- [93] WinGD. (2021, Nov, 23). WinGD sets development timeframe for methanol and ammonia engines [Online]. Available: <https://cutt.ly/SOLrBSX> (16/02/2022).
- [94] J-ENG. Initiatives for Environmentally- friendly technologies [Online]. Available: <https://cutt.ly/zOLphFI> (16/02/2022).
- [95] Ammonia-fueled engine, Hydrogen-fueled engine [Online]. Available: <https://cutt.ly/sOLxB3e> (16/02/2022).
- [96] J-ENG. “Demonstration Project Begins for Commercialization of Vessels equipped with Domestically produced Ammonia Fueled Engine” [Online]. Available: <https://cutt.ly/TOLmtsw> (16/02/2022).
- [97] The Maritime Executive. (2021, Ago, 04). Japanese Engine Manufacturers Launch Hydrogen Marine Engine Company [Online]. Available: <https://cutt.ly/uOLYH13> (16/02/2022).
- [98] J-ENG. (2021, Ago, 02). HyENG Corporation Established for Joint Development [Online]. Available: <https://cutt.ly/xOLUYbB> (16/02/2022).

ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

SIMBOLOS

- %: Tanto por cien.
- \dot{m}_f : Caudal másico de combustible.
- η_i : Rendimiento indicado.
- bar: bar (100.000 Pascal)
- cv: caballo de vapor (735 vatios).
- cm: centímetro.
- g: gramos.
- h: hora.
- i : Tipo de ciclo, 2 para dos tiempos y 1 para cuatro tiempos.
- J: Julio.
- kg: kilogramo (1.000 gramos).
- kW: kilovatio (1.000 vatios).
- kWh: kilovatio por hora.
- m²: metro al cuadrado.
- m³: metro al cubo.
- MJ: Megajulio (1.000.000 julios)
- ms: milisegundos (0.001 segundo).
- MW: Megavatio (1.000.000 vatios)
- MWh: Megavatio por hora.
- n : ciclos por minuto.
- °C: Grados Celsius.
- P: Potencia.
- p: presión.
- PCI: Poder calorífico inferior.
- P_i : Potencia indicada.
- p_{mi} : presión media indicada.
- r : relación de compresión volumétrica.
- T: Temperatura.

- V_D : Cilindrada total.
- V_{ref} : Velocidad del buque.
- W : Watios.
- z : número de cilindros.
- α : Ángulo de giro del motor.
- γ : cociente de calores específicos.
- η : rendimiento térmico.

ACRÓNIMOS

- 2T: Dos tiempos.
- 4T: Cuatro tiempos.
- ABS: American Bureau of Shipping.
- BOG: Gas natural vaporizado por interacciones térmicas del gas natural licuado.
- B&W: Burmeister & Wain.
- CCU: Unidad de control de cilindro.
- DF: Combustible dual.
- CEC: Consumo específico de combustible (g/kWh).
- ECA: Áreas de control de emisiones.
- ECS: Sistema de control del motor.
- EEDI: Energy Efficiency Design Index.
- EEOI: Energy Efficiency Operational Indicator.
- EEXI: Energy Existing Ship Index.
- EGR: Recirculación de gases de escape.
- ELFI: Válvula electrónica de inyección de combustible.
- ELGI: Electroválvula de inyección de gas.
- ELWI: Electroválvula de paso de aceite de control.
- FAST: Tecnología de tobera de inyección sin saco.
- FBIV: Inyector-bomba de combustible.
- FBIV-M: Inyector-bomba de combustible diseñado para consumir metanol.

- FBIV-P: Inyector-bomba de combustible diseñado para consumir gases licuados del petróleo.
- FFI: Inyector de combustible flexible
- FGSS: Sistema de suministro de combustible gaseoso.
- FIVA: Válvula proporcional de inyección.
- FVT: Tren de válvulas de combustible.
- GA: Admisión de gas.
- GAV: Válvulas de admisión de gas.
- GEI: Gases de efecto invernadero.
- GEL: Gas etano licuado.
- GI: Inyección de gas.
- GIE: Inyección de gas etano.
- GLP: Gas licuado del petróleo.
- GN: Gas natural.
- GNL: Gas natural licuado.
- GNS: Gas natural sintético.
- GTD: Aplicación desarrollada por la empresa WinGD para proporcionar información acerca de diferentes características de sus motores.
- GVT: Tren de válvulas de gas.
- GVU: Unidad de válvulas de gas.
- HCU: Unidad hidráulica de cilindro.
- HP-DF: Motor de combustible dual de alta presión de combustión.
- HPS: Sistema de aceite hidráulico.
- iCER: Control inteligente de recirculación de los gases de escape.
- ICU: Unidad de control de inyección.
- iGPR: Regulador de presión de gas integrado.
- J-ENG: Japan Engine Corporation.
- LFSS: sistema de suministro de combustible líquido.
- LGI: Inyección de gas líquido.
- LP-DF: Motor de combustible dual de baja presión de combustión.
- LSJ: Serie del fabricante J-ENG con aplicación del concepto JUMP.

- MACI: Motor alternativo de combustión interna.
- MAN: Machinefabrik Augsburg Nuremberg.
- MARPOL: Convenio referido a las contaminaciones del sector naval.
- MBIV: Micro inyector-bomba de combustible.
- MC: Serie de motores marinos de la casa MAN de control de la inyección y la válvula de escape por eje de camones.
- MCI: Motor de combustión interna.
- ME: Serie de motores marinos de MAN con control electrónico de la inyección.
- MHI: Mitsubishi Heavy Industries.
- NO_x: Óxidos de nitrógeno.
- OMI: Organización Marítima Internacional.
- OPEX: Gastos operativos de explotación
- PCG: Potencial de calentamiento global.
- PMI: Punto muerto inferior.
- PMS: Punto muerto superior.
- PS: Partículas en suspensión.
- RTA: Serie de motores marinos de la casa Sulzer de control de la inyección y la válvula de escape por eje de camones.
- RT-flex: Serie de motores marinos de la casa Wärtsilä de control electrónico de la inyección.
- SCR: Reductor catalítico selectivo.
- SEEMP: Ship energy Efficiency Management plan.
- SGAV: Válvula de admisión de gas segura.
- SO_x: Óxidos de azufre.
- UBV: Unidad de bomba vaporizadora.
- USD: Dólar estadounidense.
- VLSFO: Fuelóleo de muy bajo contenido en azufre.
- WECS: sistema de control del motor de Wärtsilä.
- WinGD: Winthertur Gas & Diesel.
- X-DF: Serie de motores del fabricante WinGD que pueden consumir combustibles convencionales y gas natural.

COMPUESTOS QUÍMICOS

- C_2H_6 : Etano.
- C_F : Contenido en carbono del combustible.
- CFC-11: Clorofluorocarburo 11 (Freón 11)
- CH_3OH : Metanol.
- CH_4 : Metano.
- CH_4N_2O : Úrea.
- CO: Monóxido de carbono.
- CO_2 : Dióxido de carbono.
- H_2 : Hidrógeno diatómico.
- HFC-134a: Hidrofluorocarburo 134^a (Freón 134a)
- HNO_3 : Ácido nítrico.
- N_2 : Nitrógeno diatómico.
- NH_3 : Amoniaco.
- NO: Óxido nítrico.
- NO_2 : Dióxido de nitrógeno.
- SO_2 : Dióxido de azufre.
- SO_3 : Trióxido de azufre.

DEFINICIONES

- Anexo VI: Documento del convenio MARPOL de la OMI que contiene las reglas para prevenir la contaminación atmosférica generada por los buques
- Ciclo Diesel: Ciclo termodinámico con combustión a presión constante.
- Ciclo Otto: Ciclo termodinámico con combustión a volumen constante.
- Detonación: Velocidades del frente de llama excesivas.
- Dosado: Relación de la masa de aire y la masa de combustible en una mezcla.
- Picado: Formación de ondas de presión debido a la autoinflamación del combustible.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1. Contribuciones al forzamiento radiativo positivo de algunos GEI. [17].....	10
Tabla 3.2.1. Zonas ECA y fechas de adopción, entrada en vigor y efecto. [26]	14
Tabla 4.6.1. Diferentes formas de almacenamiento del hidrógeno. [38].....	22
Tabla 6.2.1. Categorización dependiendo de la presión de vapor a 60 °C. [72]	44
Tabla 6.2.2. Reduccion emisiones de ME-GI y ME-LGI en relación a ME Tier II [79].....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1. Motor de gas de Lenoir.	1
Figura 1.2.1. Primer motor ensayado por Rudolf Diesel.	3
Figura 1.2.2. Cámara de combustión en la culata.	3
Figura 1.2.3. Émbolo de bomba de combustible.....	5
Figura 1.3.1. Motor de 2T para buque mercante de 1915 y en 1955.	5
Figura 1.4.1. Motor Sulzer de la serie RTA.	6
Figura 1.4.2. MAN B&W serie MC.	7
Figura 1.4.3. Elementos del sistema de conducto común Wärtsilä serie RT-Flex.	8
Figura 2.1.1. Demanda de energía transporte marítimo mundial y PIB global.	9
Figura 2.1.2. Emisiones de efecto invernadero por transporte marítimo en 2015.	9
Figura 2.5.1.1. Muertes de >14 años por PS2,5 de combustibles fósiles en 2012.	12
Figura 3.2.1. Límites para el contenido de azufre de los combustibles marinos.	13
Figura 3.2.2. Niveles de regulación NO _x	14
Figura 3.2.3. Reductor catalítico selectivo (SCR).	15
Figura 3.3.1. Fases de EEDI, periodos de implemento y objetivos de reducción.	15
Figura 3.3.2. Ecuación EEDI.	16
Figura 4.5.1. Vol. relativos de almto. de combustibles por densidad energética.	19
Figura 4.6.1. Emisiones de CO ₂ en el ciclo de vida de distintos combustibles.	20
Figura 4.6.2. Métodos de producción del metanol.	21
Figura 4.8.1. Previsión de los costes de producción del amoniaco.	23
Figura 4.9.1. Producción en EE.UU de gases derivados del GN en 2011-2020.	24
Figura 4.9.2. Buque “Navigator Aurora”.	24
Figura 5.1.1. Componentes diferenciadores de la serie ME de MAN B&W.	25
Figura 5.1.1.1. Fuente de energía hidráulico (HPS).	26
Figura 5.1.2.1. Hydraulic Cylinder Unit.	26
Figura 5.1.2.2. Bomba elevadora de presión de combustible e inyectores.	27
Figura 5.1.2.3. Supervisión y tiempos de actuación de FIVA.	28
Figura 5.1.6. Diferentes modos de inyección en el motor MAN B&W serie ME.	29
Figura 5.2.1. Evolución de la inyección de Sulzer y Wärtsilä durante 30 años.	29
Figura 5.2.2. Esquema del sistema common rail en un motor Sulzer RT-Flex.	30

Figura 5.2.1.1. Comparación entre las bombas WinGD de alta presión RT-flex y X.	31
Figura 5.2.3.1. Esquema de inyección de la ICU.	32
Figura 5.2.3.2. Izquierda sistema ICU anterior, Derecha: Sistema ICU actual.	32
Figura 5.2.3.3. Comparativa del consumo específico de combustible al freno del tipo de tobera FAST y las toberas estándar en el motor de la serie RT-flex58T-D.	33
Figura 5.3.1.1. Esquema del sistema Eco para la inyección de combustible.	34
Figura 5.3.1.2. Control del caudal de inyección en el sistema Eco.	35
Figura 5.3.2.1. Válvula de inyección para la inyección de agua estratificada.	35
Figura 5.3.2.2. Esquema de sistema de inyección de combustible y agua.	36
Figura 6.1.1. Elementos del sistema de gas del motor ME-GI versión 2.	37
Figura 6.1.1.1. Diferentes formas de suministro de combustible gas al motor.	38
Figura 6.1.2.1. Tubería de doble pared con detección de gas.	38
Figura 6.1.2.2. Esquema de suministro de gas y purga del sistema con N ₂	39
Figura 6.1.3.1. Versiones 1 y 2 del bloque de gas del motor MAN B&W ME-GI.	39
Figura 6.1.3.2. Sistema de inyección de motor MAN B&W ME-GI.	40
Figura 6.1.3.3. Corte de combustible gas en un cilindro.	41
Figura 6.1.4.1. Sección de la nueva válvula de combustible piloto.	41
Figura 6.1.4.2. Nuevo diseño de tobera polivalente para modos MAN B&W ME-GI.	42
Figura 6.1.4.3. Válvula de inyección de gas en el motor MAN B&W ME-GI Mk.1.	42
Figura 6.2.1. Elementos de inyección del motor MAN B&W LGI.	44
Figura 6.2.1.1. FBIV-M para metanol.	45
Figura 6.2.1.2. FBIV-P para propano licuado.	46
Figura 6.2.2.1. Esquema genérico de sistema de suministro de combustible.	48
Figura 6.2.3.1. Tren de válvulas de combustible de la marca Eltrnic FUELTECH.	48
Figura 6.2.4.1. Presión en cilindro y calor generado en ME-LGIM a máxima carga.	49
Figura 6.2.4.2. Diagrama p- α comparando el calor liberado a 75 % de carga.	50
Figura 6.3.1.1. Concepto de mezcla de los motores RT-flexDF y X-DF de WinGD.	51
Figura 6.3.1.2. Esquema de un sistema de suministro de GNL a los consumidores.	52
Figura 6.3.3.1. GUV con diseño con carcasa (arriba), y sin carcasa (abajo).	53
Figura 6.3.3.2. Sistema de suministro de combustible con iGPR.	54
Figura 6.3.3.3. Presiones necesarias para el suministro de gas.	54
Figura 6.3.4.1. Colector de doble pared con las válvulas de corte y de venteo.	55

Figura 6.3.4.2. Válvula de admisión de gas (GAV) de asiento esférico.....	56
Figura 6.3.5.1. Sistema de combustible piloto.	57
Figura 6.3.5.2. Inyector de combustible piloto y precámara.	57
Figura 6.3.6.1. Emisiones motores DF a baja y alta presión y motor diésel VLSFO.....	59
Figura 6.4.1. Fases sobre la combustión en el motor MAN ME-GA.	60
Figura 6.4.1.1. Ejemplos de sistemas de suministro de combustible gas a ME-GA	60
Figura 6.4.2.1. Colector de gas y elementos de admisión del motor ME-GA.....	61
Figura 7.1.1. Diferentes alzadas de la aguja en la tobera en un inyector flexible	63
Figura 7.1.1.1. Comparación de presión-tiempo de los diferentes combustibles.....	63
Figura 7.1.1.2. Calor liberado-grados de los diferentes combustibles.	64
Figura 7.1.2.1. Motor de pruebas RTX-6 dotado de inyectores flexibles FFI.....	64
Figura 7.1.2.2. Calor con varios combustibles con el FFI en el motor RTX-6.....	65
Figura 7.2.1.1. Sistema de inyección de GLP base del motor de amoníaco.	66
Figura 7.2.1.2. Esquema para el suministro de amoníaco MAN B&W ME-LGI.	66
Figura 7.3.1. Inyección agua estratificada con combustibles alternativos.....	68

Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas



GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

ANEXO

**“AVANCES TÉCNICOS EN MOTORES LENTOS NAVALES
PARA EL EMPLEO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS”**

FECHA: FEBRERO 2022

AUTOR: JAVIER DIÉGUEZ CHEDA

Fdo: JAVIER DIÉGUEZ CHEDA

ÍNDICE DEL ANEXO

Anexo. 1. Características de los diferentes combustibles alternativos [39]	91
--	----

Tipo de almacenamiento de energía/ Estructura química	Poder calorífico inferior	Densidad energética	Tamaño del tanque comprado con fuelóleo marino	Presión de suministro	Reducción de emisiones en porcentaje comparado con tecnologías de nivel II con uso de fuelóleo pesado (%)			
					[MJ/kg]	[MJ/L]	[bar]	SO_x
Amoniaco (NH₃) (líquido, -33°C)	18,6	12,7 (-33 °C) 10,6 (45 °C)	2,8 (-33 °C) ¹ 3,4 (45 °C) ¹	80	100		~90	~90
Metanol (CH₃OH) (65°C)	19,9	14,9	2,4	10	90-97	30-50	11	90
GLP (líquido, -42°C)	46	26,7	1,3 ²	50	90-100	10-15	13-18	90
GNL (líquido, -162°C)	50	21,2	1,7 ²	300	90-99	20-30	24	90
GEL (líquido, -89°C)	47,5	25,8	1,4 ²	380	90-97	30-50	15	90
Gasóleo marino	42,7	35,7	1	7-8				
Hidrógeno (H₂) (líquido, -253°C)	120	8,5	4,2					

¹) El tamaño relativo del tanque de combustible para el amoniaco está reflejado tanto refrigerado a -33°C como presurizado a 45°C

²) Asumiendo un medio totalmente refrigerado

Anexo. 1. Características de los diferentes combustibles alternativos [39]