

**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS**

**TECNOLOGIAS MARINAS**

**ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA

**“CONVERSION DE UN MOTOR MARINO DIESEL  
LENTO DE CONTROL ELECTRONICO EN MOTOR  
DUAL”**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**TFG/GTM/E-43-15**

**JUNIO - 2015**

**AUTOR: Rubén Alcocer Cordero**

**DIRECTOR: Felipe Antelo González**

## TRABAJO FIN DE GRADO

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

TECNOLOGIAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

631G02410 - TRABAJO FIN DE GRADO

D. FELIPE ANTELO GONZÁLEZ, en calidad de director principal, autorizo al alumno D. RUBEN ALCOECER CORDERO, con DNI nº 53.307.765-K a la presentación del presente Trabajo de Fin de Grado titulado:

**“CONVERSION DE UN MOTOR MARINO DIESEL LENTO DE CONTROL ELECTRONICO EN MOTOR DUAL”**

CONVOCATORIA: JUNIO - 2015

Fdo. El Director

Fdo. El Alumno

Felipe Antelo González

Rubén Alcocer Cordero

**“TÍTULO: CONVERSION DE UN MOTOR MARINO DIESEL  
LENTO DE CONTROL ELECTRONICO EN  
MOTOR DUAL”**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA E  
MÁQUINAS**

---

**MEMORIA**

---

**AUTOR:**

**RUBEN ALCO CER CORDERO**

**FECHA: JUNIO 2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

*He de expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que me han dado la oportunidad de desarrollarme, tanto intelectual como personalmente. Su influencia es de una importancia capital para poder llegar al punto en el que me encuentro, finalizando una carrera y el proyecto culmen de la misma.*

*No puedo nombrar a todos, pero si quiero reconocer específicamente el valor a algunos de ellos:*

*Mi familia, por su apoyo y empuje incondicional.*

*Felipe Antelo, mi director de proyecto, cuya importancia es vital en el desarrollo del mismo y me ha aportado un punto de vista del mundo ingenieril muy interesante.*

*Mis compañeros de clase, los cuales me han motivado a hacerlo lo mejor posible, con sus ejemplos de trabajo y excelencia en las distintas áreas de la carrera; y hacer que éstos tres años de estudio hayan 'volado'.*

*Mis amigos de fuera de la universidad, de un valor incalculable, por haber compartido momentos irrepetibles en los que aprendí esas cosas tan importantes que no vienen en los libros.*

*Los profesores de la universidad, por su involucración tanto personal como profesional que me han hecho alcanzar un nivel de conocimientos técnicos necesarios para la realización del proyecto*

*Y a todos aquellos que olvido nombrar*

## INDICE

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Alcance.....	3
1.4. Acrónimos y definiciones.....	3
1.5. Motores de 2T con control electrónico.....	7
1.6. Definición de combustibles gaseosos para aplicaciones de motores duales.....	11
1.6.1. Descripción del concepto físico de gas.....	12
1.6.2. Gas Natural (GN).....	12
1.6.3. Gas natural licuado (LNG).....	14
1.6.4. Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ).....	14
1.6.5. Gas licuado del petróleo (LPG).....	15
1.6.6. Metanol (CH <sub>3</sub> OH).....	16
1.6.7. Dimetil éter (DME).....	17
1.7. Motores de gas.....	18
<b>2. DESCRIPCIÓN TECNICA DEL CONCEPTO DE INYECCION DE GAS (ME-GI-S).....</b>	<b>20</b>
2.1. Características de seguridad.....	27
2.2. Alta presión, tubería de doble pared.....	29
2.3. Combustible gaseoso y uso del combustible con ME-GI-S.....	31
<b>3. DESCRIPCION DEL CONCEPTO DE INYECCION DE GAS LICUADO (ME-LGI-S).....</b>	<b>39</b>
3.1. Combustible gaseoso licuado y uso del combustible con ME-LGI-S.....	45
3.2. Sistema de suministro de combustible gaseoso licuado (LFSS).....	46
3.3. Distribución de combustible de bajo punto de inflamabilidad (LFFVT).....	47
3.4. Sistema de retorno de purga (PRS).....	47

3.5. Tareas de mantenimiento.....	48
3.5.1. Mantenimiento con motores ME-GI-S o ME-LGI-S.....	48
3.6. Tareas de mantenimiento en planta generadora.....	48
3.7. Reconversión.....	49
<b>4. SISTEMAS DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE GASEOSO (FGSS).....</b>	<b>51</b>
4.1. Sistema de suministro de gas por Cryostar™.....	54
4.1.1. Planta de relicuefacción de EcoRel™.....	54
4.1.2. Bomba HP y sistema vaporizador.....	56
4.1.3. Ventajas del sistema.....	57
4.1.4. Configuración general del buque.....	58
4.2. Sistema de relicuefacción BOG por Hamworthy™.....	59
4.2.1. Sistema con bomba HP de Hamworthy™.....	61
4.3. Compresor Laby-GI de Burckhardt Compression.....	64
4.3.1. Diseño.....	65
4.3.2. Componentes clave del compresor Laby®-GI.....	66
4.3.3. Características principales.....	67
4.3.4. Disposición de los compresores de gas.....	68
4.3.5. Seguridad del compresor.....	69
4.3.6. Sistema de control del sistema de combustible gaseoso.....	69
4.3.7. Modo de ahorro de energía.....	70
4.3.8. HGS Laby®-GI.....	71
4.4. TGE Laby®-GI.....	72
4.5. Uso de LPG y de Metanol como combustible en motores ME-LGI.....	74
4.5.1. Metanol como combustible.....	78
4.5.2. Otras consideraciones del uso del MeOH como combustible.....	81
4.6. Sistemas de contención de la carga.....	82
4.6.1. Tipos de tanques de carga.....	82

4.6.2. Tanques independientes.....	82
4.6.2.1. Tanque independiente tipo 'A'.....	83
4.6.2.2. Tanque independiente tipo 'B'.....	84
4.6.2.3. Tanque independiente tipo 'C'.....	86
4.6.2.4. Tanques de membrana.....	86
4.6.2.4.1. Sistema de membrana 'Gaz Transport'.....	87
4.6.2.4.2. Sistemas de membrana 'Technigaz'.....	87
4.6.2.4.3. Sistema Gaz Transport Technigaz, 'CS1'.....	88
4.7. ME-GI para portacontenedores, Petroleros y Graneleros.....	89
4.7.1. Sistema de tanques LNG.....	90
<b>5. SISTEMA DE CONTROL DUAL.....</b>	<b>94</b>
5.1. Control de planta.....	95
5.2. Control de combustible.....	96
5.3. Control de seguridad.....	98
5.4. Arquitectura del sistema de control de combustible dual.....	99
5.5. Control Unit Hardware.....	100
5.6. Gas Main Operating Panel (GMOP).....	100
5.7. GECU, Control de Planta.....	100
5.8. GACU, Control Auxiliar.....	102
5.9. GCCU, control sobre ELGI.....	102
5.10. GSSU, supervisión y control del sistema de gas combustible.....	103
5.11. GCSU, PMI on-line.....	103
5.12. Aspectos a destacar con respecto a la seguridad.....	104

## **6. MOTORES MAN Y LAS TECNOLOGÍAS DE REDUCCION DE EMISIONES**

<b>NO<sub>x</sub> – TIER III</b> .....	<b>105</b>
6.1. Introducción.....	106
6.2.1. Principio de funcionamiento.....	108
6.2.2. Modo de empleo.....	109
6.2.3. Sistema SCR para motores MAN.....	110
6.3. Sistema de recirculación de gases EGR.....	113
6.4. Principio de un EGR.....	115
6.5. Resultados de la investigación EGR del motor 4T50ME-X.....	115
6.5.1. Efectos del sistema EGR con respecto al SFOC.....	117
6.5.2. Efectos del sistema EGR con respecto al NO <sub>x</sub> .....	117
6.5.3. Efectos del sistema EGR con respecto al CO.....	118
6.6. Repercusión en cilindros causado por EGR.....	118
6.7. Rendimiento del 'scrubber'.....	120
6.8. Water treatment system (WTS).....	123
6.9. EGR 'blower' de alta velocidad.....	126
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>128</b>
<b>8. REFERENCIAS</b> .....	<b>132</b>

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1.6.1: Combustibles MAN ME-GI.....	11
Tabla 1.5.2.1: Diversos tipos de gas natural bruto.....	13
Tabla 1.5.2.2: Composición del gas natural para uso industrial.....	14
Tabla 2.3.1: Valores máximos a la entrada de la planta antes del tratamiento in situ.....	36
Tabla 2.3.2: Valores máximos a la entrada de la planta antes del tratamiento in situ.....	37
Tabla 4.5.1: Comparación de emisiones entre un motor K50MC-C para consumo de HFO y un motor S50ME-GI para quema de LPG.....	78
Tabla 4.5.1.1: Propiedades químicas de los diferentes combustibles.....	79
Tabla 6.2.3.1: Temperaturas antes y después de la turbina, basadas en un motor 6S50ME-C....	111
Tabla 6.5.1: Resultados del test sobre las variaciones en los parámetros del motor a una carga de 75% .....	116

Figura 2.1: Sistema de ventilación.....	21
Figura 2.2: Componentes del sistema de ventilación.....	21
Figura 2.3: Sistema de gas inerte.....	22
Figura 2.4: Diseño tubería de doble pared.....	22
Figura 2.5: Válvula de inyección de gas.....	25
Figura 2.6: Sistema de inyección ME-GI para diámetro de 50 pulgadas e inferiores.....	26
Figura 2.1.1: Control de inyección de gas.....	28
Figura 2.2.1: Ramificación del sistema de tuberías de gas.....	30
Figura 2.2.2: Bloque de control de válvulas de gas.....	30
Figura 2.3.1: Modo tipo de combustible para MAN B&W diésel de dos tiempos de baja velocidad y combustible dual.....	32
Figura 2.3.2: Sistema de fueloil.....	32
Figura 2.3.3: Motor ME-GI-S y gestión de gas.....	33
Figura 2.3.4: Motor ME-GI-S con suministro de fuel y gas.....	33
Figura 2.3.5: Estación de suministro de gas, especificación orientativa.....	34
Figura 2.3.6: Demanda orientativa de potencia del compresor de gas para gas natural y gas natural comprimido.....	35
Figura 2.3.7: Instalación de gas con varios motores.....	38
Figura 2.3.8: Sistema de bombeo y regasificación para entrada en motor.....	39
Figura 3.1: corte transversal de válvula de inyección de impulsor de combustible (FBIV).....	41
Figura 3.2: Proceso de inyección en FBIV.....	42
Figura 3.1.1: Esquema del sistema ME-LGI-S.....	45
Figura 3.7.1: Zonas afectadas en caso de reconversión.....	49
Figura 4.1: motor ME-GI con bomba LNG como sistema de suministro de gas (planta de relieuefacción no mostrada).....	52
Figura 4.2: Componentes a ser modificados: motor ME-GI frente motor ME.....	53
Figura 4.1.1.1: Diagrama simplificado de fluidos para una planta de relieuefacción EcoRel™.....	55
Figura 4.1.2.1: Bomba HP.....	56

Figura 4.1.1.5.1: Planta de relicuefacción combinada con sistema bomba HP.....	59
Figura 4.2.1: Diagrama básico sistema de relicuefacción Mark III.....	60
Figura 4.2.2: Diagrama básico del ciclo Mark III.....	61
Figura 4.2.1.1: FGSS de alta presión de Hamworthy™ ,.....	63
Figura 4.2.1.2: Diagrama de planta de relicuefacción con FGSS para motores ME-GI de Hamworthy™ .....	64
Figura 4.3.2.1: Componentes clave de un compresor Laby®-GI.....	66
Figura 4.3.4.1: Diagrama DTI de un compresor de gas Laby®-GI.....	68
Figura 4.3.7.1: Control de capacidad por el compresor Laby®-GI.....	70
Figura 4.3.8.1: Compresor Laby®-GI integrado a planta de relicuefacción Mark III.....	71
Figura 4.4.1: Comparación de los consumos entre diferentes sistemas de planta de relicuefacción.....	72
Figura 4.4.2: diagrama de la planta de TGE Laby®-GI.....	74
Figura 4.5.1: Temperaturas y presiones de los elementos que constituyen el FGSS de LPG.....	77
Figura 4.5.2: Sistema de suministro gaseoso LPG.....	77
Figura 4.6.2.1.1: Perfil de un tanque independiente tipo 'A'.....	83
Figura 4.6.2.4.3.1: Tanque tipo 'B' Moss Rosenberg.....	85
Figura 4.6.2.4.3.1: Diseño del tanque de membrana GTT MK III.....	88
Figura 4.7.1.1: Diseño del tanque tipo 'B' por la casa IHI.....	92
Figura 4.7.1.2: Tanque tipo 'C' e TGE bilobulado (derecha) y de diseño simple (izquierda).....	93
Figura 4.7.1.3: Sistema de suministro gaseoso empleando una bomba HP de Cryostar™ .....	93
Figura 5.3.1: Sistema interno y externo para operaciones con sistema 'dual fuel'.....	97
Figura 5.1: Sistema de control ME-GI.....	97
Figura 5.4.1: Modelo de estado para gas combustible.....	99
Figura 6.1.1: Evolución de los motores diésel a partir del año 1950 hasta la actualidad y la reducción de las emisiones de los mismo.....	107
Figura 6.2.1.1: Principio de funcionamiento del sistema SCR.....	109

Figura 6.2.3.1: Esquema de un motor MAN con reactor SCR.....	111
Figura 6.3.1: Esquema principal del sistema del EGR de un motor 4T50ME-X de MAN.....	113
Figura 6.3.2: Sistema EGR del motor 4T50ME-X de MAN.....	114
Figura 6.5.2: Curvas de operación del turbocompresor y calor liberado con y sin EGR.....	117
Figura 6.6.1: Estado de los cilindros con EGR.....	119
Figura 6.7.1: Reducción de las partículas sólidas en el 'scrubber'.....	121
Figura 6.7.2: Reducción de inquemados a través del 'scrubber'.....	122
Figura 6.8.1: Módulo WTS1 de Alfa Laval para motor de 23 MW (4x5m).....	125
Figura 6.8.2: Diagrama de flujos en WTS system.....	125
Figura 6.9.1: EGR 'blower' empleado para el sistema EGR del motor 4T50ME-X de MAN.....	126

---

# 1. INTRODUCCION

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

## 1.1. Introducción

Los combustibles del futuro para buques es un tema debatido en los tiempos que corren. La investigación llevada a cabo en motores duales se debe a los intereses de los armadores promovidos por el futuro coste de combustibles derivados de combustibles fósiles en combinación con las nuevas regulaciones de emisiones de la IMO.

Numerosos yacimientos de LNG como por ejemplo en la región del mar Báltico están siendo preparados para 'bunkering', además de muchos otros por la zona del mar Mediterráneo, Singapur, Estados Unidos y el Lejano Oriente. Parece ser que el uso del LNG como combustible se ha convertido en una realidad a nivel mundial.

Estos motores duales no solo son capaces de quemar HFO, MDO o LNG, sino que poseen un amplia flexibilidad de materiales combustibles incluyendo también a los gases LPG, así como gas natural comprimido (CNG) o MeOH.

Por lo tanto los motores duales o ME-GI son motores electrónicamente controlados que ofrecen la posibilidad de la inyección de gas. Se trata de motores alternativos de combustión interna experimentados y con una alta fiabilidad al derivar de los ya conocidos motores controlados por eje de camones o por control electrónico.

El principio de funcionamiento está basado en un ciclo Diesel de alto rendimiento que puede llegar hasta el 50% frente al 30% de otros motores marinos.

## 1.2. Objetivos

El objetivo del siguiente trabajo fin de grado es reconvertir un motor MAN ME o de control electrónico a inyección de gas o MAN ME-GI, dado que todo motor MAN ME puede ser reconvertido, analizaremos los elementos necesarios a mayores que necesita un motor electrónicamente controlado para su reconversión a motor dual.

### 1.3. Alcance

Este TFG comprende la modificación de todo motor marino diésel de dos tiempos, de bajas revoluciones, cruceta y sobrealimentado de la marca MAN Diesel & Turbo, bien sea controlado por eje de camones (MAN MC) o por control electrónico (MAN ME).

### 1.4. Acrónimos y definiciones

- **ACU:** Auxiliary Control Unit
- **ALS:** Alpha Lubricator System
- **Barrera primaria:** Elemento interior proyectado de modo que contenga la carga cuando el sistema de contención de ésta comprenda dos mamparos límite.
- **Barrera secundaria:** Elemento exterior de un sistema de contención de la carga, resistente a los líquidos, proyectado de modo que contenga temporalmente toda fuga previsible de carga líquida más allá de la barrera primaria y evite que la temperatura de la estructura del buque descienda a un punto que encierre peligro.
- **BOG:** 'boil-off' gas. Partículas en estado líquido que pasan a estado gaseoso debido al aumento de la temperatura de la carga.
- **BOR:** 'boil-off' range
- **fBOG:** Forced 'boil-off' gas
- **nBOG:** Natural 'boil-off' gas
- **CCU:** Cylinder Control Unit
- **CNG:** Compressed Natural Gas
- **CPS:** Crankshaft Position Sensors
- **DME:** Dimetil éter
- **DTI:** Piping and Instrumentation Diagram/Drawing
- **ECA:** Emission Controlled Areas. Son zonas marítimas en las que se establecieron controles más estrictos para reducir al mínimo las emisiones en el aire (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SAO, COV) de los buques como se define en el anexo VI del Protocolo de 1997 del Convenio MARPOL, que entró en vigor en mayo de 2005.

Estas regulaciones surgieron de preocupaciones acerca de la contribución de la industria del transporte marítimo a "la contaminación atmosférica local y global y los problemas ambientales." En julio de 2010, el Anexo VI sufre una modificación con la cual hace cumplir con límites de emisiones más estrictos de manera significativa.

A partir de 2011 hubo cuatro ECAs existentes incluyen el Mar Báltico, el Mar del Norte, la American ECA Norte, incluyendo la mayor parte de los Estados Unidos y de la costa de Canadá y el Caribe de la CEPA de Estados Unidos. También otras áreas se pueden añadir a través del protocolo definido en el anexo VI.

- **ECU:** Engine Control Unit
- **EICU:** Engine Interface Control Unit
- **EEDI:** Energy Efficiency Design Index. La aprobación del EEDI significa que los buques construidos después de 2013 tendrán que cumplir con un mínimo nivel de eficiencia energética, con diferentes normas aplicables a diferentes clases de buques. Estas normas se fortalecerán con el tiempo, con el objetivo de una mejora del 10% en el caso de buques construidos en 2015-19, 15% o 20% para 2020-24 dependiendo del tipo de buque, y el 30% para los buques a partir de 2024.
- **ELGI:** Electronic Gas Injection
- **ELWI:** Electronic Windows Valve
- **FIVA:** Fuel Injection Valve Actuator
- **FBIV:** Full Bore Isolation Valve
- **Formaldehidos:** El formaldehído se obtiene por oxidación del metanol, usando plata u óxidos metálicos (hierro y molibdeno) como catalizadores. Además de las emisiones que resultan de su fabricación y uso, el formaldehído es liberado a la atmósfera por combustión incompleta y por la descomposición fotoquímica de sustancias traza orgánicas.
- **GACU:** Gas Auxiliary Control Unit
- **GCU:** Gas Combustion Unit
- **GCCU:** Gas Cylinder Control Unit
- **GCSU:** Gas Control Safety Unit
- **GECU:** Gas Engine Control unit
- **FGSS:** Fuel Gas Supply System

- **GSSU:** Gas System Safety Unit
- **GMOP:** Gas Auxiliary Control Unit
- **CNG:** Compressed Natural Gas
- **HC:** Hydrocarbon
- **HFO:** Heavy Fuel Oil
- **HP:** High Pressure
- **HPS:** Hydraulic Power Supply
- **GI:** Gas Inyection
- **IGC:** International Gas Code. El código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel, aprobado por el Comité de Seguridad Marítima de la IMO.
- **IGF:** Código internacional de seguridad sobre el uso de gases u otras sustancias de bajo punto de ignición como combustible para buques , así como unas propuestas de enmiendas al convenio SOLAS para hacer obligatorio dicho código.
- **Índice de Wobbe:** Es la relación entre el poder calorífico del gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad, en las mismas condiciones de referencia. El índice de Wobbe se denomina superior o inferior según que el poder calorífico considerado sea el poder calorífico superior o inferior.
- **IMO:** International Maritime Organization
- **LCV:** Lower Calorific Value
- **LFFVT:** Low Flashpoint Fuel Valve Train
- **LFSS:** Liquid Fuel Gas Supply System
- **LNG:** Liquefied Natural Gas
- **LOP:** Local Operation Panel
- **LPG:** Liquefied Petroleum Gas
- **LT:** Low Temperature
- **MCR:** Maximum Continuous Rating
- **MGO:** Marine Gas Oil
- **MDO:** Marine Diesel Oil
- **ME-GI:** Motor controlado electrónicamente con inyección de gas (en general)
- **ME-GI-S:** Motor controlado electrónicamente con inyección de gas (en particular)

- **ME-LGI-S:** Motor controlado electrónicamente con inyección de gas licuado
- **MOP:** Main Operation Panel
- **NG:** Natural Gas
- **PRS:** Purging Recovery System
- **PMI:** Pressure Mean Indicator
- **Q-Max:** Son gaseros diseñados para tener una capacidad de carga de hasta 267.000 m<sup>3</sup>, en 5 tanques, tienen una eslora de 345 metros, 55 metros de manga y 12 metros de calado. Este tipo de buque carga un 80 % más de LNG que los convencionales. Al igual que los Q-Flex, la mejora de las capacidades de carga de esta serie va a producir una reducción de los costes de transporte por viaje en comparación a los buques tradicionales.

Estos buques gaseros de doble línea de ejes y timones gemelos son impulsados por motores diesel lentos (dos MAN B&W Diesel 7S70ME-C de 21700 kW a 91 rpm) con mejor rendimiento energético que las plantas propulsoras de los gaseros actuales ya que la mayoría son propulsados por plantas de vapor a turbinas engranadas a una sola línea de ejes. El combustible utilizado en estas plantas es el propio gas natural que transporta. Cuentan, además, con su propia planta de reliquefacción para evitar pérdidas en el viaje.

- **SAV:** Starting Air Valve
- **Sloshing:** Movimiento de un líquido dentro de un recipiente, debido al movimiento de éste. Movimiento de la carga líquida en los tanques, debido al movimiento del buque.
- **Tanque de carga:** Recipiente estanco proyectado de modo que sea el elemento primario de contención de la carga.

### 1.5. Motores de 2T con control electrónico

Los motores controlados electrónicamente, motores llamados inteligentes se introdujeron en el mercado a partir del año 2002-2003, con las versiones de control electrónico; MAN B&W ME y Sulzer RT-flex, las cuales partían respectivamente de los modelos ya establecidos MAN B&W MC y Sulzer RTA.

Tanto MAN B&W Diesel como New Sulzer Diesel demostraron que el funcionamiento del motor sin árbol de levas era posible, aplicando control electrónico en la inyección de combustible y en los sistemas de actuación de la válvula de escape.

Los datos de funcionamiento del motor son constantemente monitorizados y comparados con los valores definidos por los expertos del sistema, si se detectan desviaciones entonces son adoptadas de forma automática medidas correctoras para restablecer la situación a valores normales.

Para hacer frente al objetivo de flexibilidad operativa, MAN B&W Diesel, explica que es necesario ser capaz de cambiar los tiempos de la inyección de combustible y de los sistemas de actuación de las válvulas de escape con el motor en marcha. Para lograr este objetivo con el sistema tradicional de árbol de levas supondría una complejidad mecánica que tendría un perjuicio para la fiabilidad del motor. Con un motor sin el árbol de levas tradicional este inconveniente es solucionado. Otras ventajas es que son capaces de monitorizar su propia condición y ajustar los parámetros principales para optimizar el comportamiento en un modo de funcionamiento seleccionado.

Para satisfacer el objetivo de la fiabilidad es necesario disponer de un sistema que pueda proteger de forma activa el motor de daños causados por sobrecarga, la falta de mantenimiento y un mal ajuste. La monitorización del motor permite recoger datos de su estado de funcionamiento en tiempo real, esta información es procesada y analizada por software, activando las medidas correctoras necesarias para salvaguardar la seguridad del motor.

Una condición del sistema de monitorización debe ser utilizada para evaluar el estado general del motor, manteniendo así su funcionamiento y mantenimiento de sus parámetros de funcionamiento dentro de los límites. La condición del sistema monitorización y evaluación es un sistema on-line con muestreo automático de todos los datos de funcionamiento normales del motor, complementados por las mediciones de presión del cilindro. El sistema presentará un informe e intervendrá activamente cuando los parámetros de funcionamiento muestren desviaciones insatisfactorias. Los datos de presión del cilindro entregados por el sistema de medición se utilizan para diversos cálculos:

- La presión media indicada es determinada como un chequeo de la distribución de cargas en el cilindro, así como la potencia total del motor.
- La presión de compresión se determina como un indicador de fugas excesivas causados por, por ejemplo, una válvula de escape quemada o rotura de aros de pistón (la condición es generalmente acompañada por un aumento en la temperatura de los gases de escape del cilindro en cuestión).
- La temperatura de la pared del cilindro es monitorizada como un indicador adicional del estado de los aros del pistón.
- La presión de combustión se determina para controlar los tiempos de la inyección y para el control de las cargas mecánicas.
- La tasa de aumento de presión ( $dP/dt$ ) y la tasa de liberación de calor son determinados para la evaluación de la calidad de combustión como una advertencia en caso de "malos combustibles" y para indicar cualquier riesgo de problemas en los aros de pistón en caso de altos valores  $dP/dt$ .

El sistema de monitorización de la condición del cilindro tiene por objeto detectar fallas tales como fugas en los aros de pistón, ralladuras en la camisa interior del cilindro y combustión anormal. La detección de anomalías graves por los sistemas integrados da lugar a un cambio en el modo de funcionamiento del motor, pasaría a funcionar en "modo de protección del motor". El sistema de control contiene los datos para un funcionamiento óptimo en una serie de modos diferentes, como "modo de ahorro de energía", "modo de control de emisiones" y diversos modos de protección del motor. El limitador de carga del sistema (sistema de cumplimiento del diagrama de carga) tiene por objeto prevenir cualquier sobrecarga del motor en condiciones tales como mar gruesa, casco sucio, navegación en aguas poco profundas, hélice demasiado pesada o potencia excesiva absorbida por el alternador de cola. Estas funciones aparecerán como algo normal en las futuras especificaciones técnicas de compra.

El sistema de inyección de combustible funciona sin árbol de levas convencional, utilizando alta presión de aceite hidráulico impulsado por una bomba como fuente de potencia y un servo con control electrónico para controlar la bomba de inyección. Los aspectos positivos del sistema electrónico incluyen una considerable mejora del rendimiento de la combustión, de la eficiencia y, por tanto, de las emisiones contaminantes.

Otra ventaja de los motores con control electrónico, es posible reducir de manera apreciable la velocidad de funcionamiento lento del motor, que tiene ventajas cuando el buque maniobra en aguas congestionadas, como por ejemplo el Canal de Suez.

Por otra parte, la mayor utilización de sensores en los motores abre nuevas posibilidades de tareas adicionales, tales como la monitorización de la condición y la detección temprana de un posible daño. Para estos propósitos hay disponibles muchos más puntos de medida de los que había anteriormente.

Tanto Wärtsilä como MAN B&W pretenden una flexibilidad operacional sin precedentes en términos de ahorro de combustible y optimización de las emisiones, una mejora de la fiabilidad y la maniobrabilidad (gracias a modos de velocidad de funcionamiento extremadamente lenta), y costes de funcionamiento más bajos durante el ciclo de vida. También facilitan una operación más sencilla y sin problemas por la tripulación.

Todas las ventajas que proporciona la gestión electrónica del motor se encuentran limitadas por la física de los elementos mecánicos que constituyen el propio motor, la capacidad de consumo de aire, combustible, eficiencia del barrido, capacidad para quemar diferentes combustibles, temperaturas admisibles en la cámara de combustión, potencia máxima que puede desarrollar la estructura motor, capacidades de la turbosoplante etc. Todos estos parámetros se encuentran determinados por la arquitectura del propio motor, para optimizar el diseño de un motor antes de construirlo contamos con las herramientas CAD, CAE y el CFD, que nos van a permitir construir de forma virtual y simular su comportamiento, el ahorro de costes en tiempo y dinero es incomparable, además de que es posible desarrollar y evolucionar mucho más un determinado diseño.

## 1.6. Definición de combustibles gaseosos para aplicaciones de motores duales

Es importante entender claramente las definiciones básicas relativas a los diferentes tipos de combustible que se pueden quemar en motores con este diseño. Los motores diésel de dos tiempos de baja velocidad MAN B&W están diseñados para proporcionar una máxima flexibilidad en el uso de combustible y son una fuente de propulsión idónea tanto si se alimentan con combustible gaseoso como con combustible gaseoso licuado, combustible líquido o biocombustible líquido.

	Conocido como	Condición de entrega	Presión de suministro	Temperatura de suministro
<b>Combustible ME-GI</b>				
CH <sub>4</sub>	Metano (LNG/NG)	Gas	300	45 °C tol. 10 °C
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	LEG etano	Gas	600	45 °C tol. 10 °C
<b>Combustibles ME-LGI</b>				
CH <sub>3</sub> OH	Metanol MeOH	Líquido	8	10 – 55 °C
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol	Líquido	8	10 – 55 °C
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propano (LPG)	Líquido	35	10 – 55 °C
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Butano(LPG)	Líquido	35	10 – 55 °C
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Gasolina	Líquido	8	10 – 55 °C
	DME	Líquido	30	10 – 55 °C

Tabla 1.6.1: Combustibles MAN ME-GI

### **1.6.1. Descripción del concepto físico de gas**

Un gas es un cuerpo en un estado diferente al de los otros dos estados fundamentales de la materia (sólido y líquido). Un gas es una fracción de materia que, una vez encerrada en un recipiente, se adapta a su forma y adquiere una densidad uniforme. Si no se confina en un recipiente, la materia gaseosa también denominada vapor se dispersará en el espacio. El término "gas" o "gaseoso" se emplea también para referirse al estado o las condiciones de materia con propiedades similares a las descritas.

Los átomos o las moléculas de materia en estado gaseoso se mueven libremente y, por lo general, están menos compactadas que las moléculas de la misma sustancia en su forma sólida o líquida.

Es posible comprimir la materia gaseosa. Los ejemplos más típicos de gases son el oxígeno a temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C), el hidrógeno a temperatura ambiente, y el agua a presión atmosférica estándar y a una temperatura superior a 100 °C.

En el apartado siguiente se describen en detalle algunos de los diferentes tipos de gas.

### **1.6.2. Gas natural (GN)**

El gas natural bruto es todo aquel que se extrae de una reserva subterránea natural. En su composición habitual se encuentra gran cantidad de metano, junto con hidrocarburos más pesados como, entre otros, etano, propano, isobuteno y butano normal. Asimismo, en su forma bruta contiene una proporción considerable de otros gases que no son hidrocarburos, como nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono. Estas características indican la presencia de trazas de compuestos como helio, sulfuro de carbonilo y diversos n-captanos. Además, el gas natural bruto está saturado de agua.

En la Tabla 1.5.2.1 se muestran algunos ejemplos de resultados de análisis de diversos tipos de gas natural bruto aunque la composición del gas natural para uso comercial difiere bastante de la del gas bruto que se muestra en la Tabla 1.5.2.1.

Era geológica		Porcentaje molar (Mesozoico)	Porcentaje molar (Paleozoico)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.32	0.94
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	4.37	17.89
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	2.41	3.49
Metano	C1	85.35	56.53
Etano	C2	4.50	7.69
Propano	C3	1.50	3.38
Isobutano	iC4	0.25	0.87
n-butano	nC4	0.48	1.73
Isopentano	iC5	0.15	0.71
n-pentano	nC5	0.21	0.76
Hexano	C6	0.47+	1.48
Heptano ++	C7++	-	4.53

Tabla 1.5.2.1: Diversos tipos de gas natural bruto

En la Tabla 1.5.2.2 se enumera la composición típica del gas natural que se vende directamente como combustible para uso industrial.

El gas natural vendido como combustible industrial no está caracterizado por su composición química, sino por una serie de propiedades específicas que debe cumplir, como el poder calorífico, el punto de rocío, el contenido en H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, y el índice Wobbe. Un valor típico del poder calorífico inferior de un gas natural es 46 MJ/kg.

	% molar (planta sobre el terreno)	% molar (planta en línea)
N2	0.30	0.35
C1	91.63	98.60
C2	5.72	1.05
C3	1.63	-
iC4	0.29	-
nC4	0.31	-
iC5	0.12	-

Tabla 1.5.2.2: Composición del gas natural para uso industrial

### 1.6.3. Gas natural licuado (LNG)

El gas natural licuado (LNG por sus siglas en inglés) es un gas natural (compuesto primordialmente por metano,  $\text{CH}_4$ ) que se convierte a su forma líquida para facilitar su transporte y almacenamiento.

El gas se extrae y se transporta a una planta de procesamiento en la que se somete a purificación mediante la retirada de condensados, como el agua, el aceite, el barro, y otros gases como, por ejemplo,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . Seguidamente, el gas se refrigera por etapas hasta que se licúa convirtiéndose en LNG. El LNG se introduce en depósitos de almacenamiento para su carga y envío.

Por lo general, el LNG contiene una proporción de metano superior al 90 %. También incorpora pequeñas cantidades de etano, propano, butano, algunos alcanos más pesados y nitrógeno.

El LNG se utiliza principalmente en el transporte de gas natural a los mercados. Una vez que llega a su destino, se procede a expandir el gas (o regasificarlo) y a distribuirlo como gas natural a gaseoductos para llevarlo hasta empresas de distribución local o centrales independientes.

El poder calorífico del LNG depende de la fuente de gas empleada y del proceso empleado para su licuación. Un valor típico del poder calorífico mínimo del LNG es 49 MJ/kg. En este trabajo, gas natural y LNG se designan como combustible gas.

#### **1.6.4. Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)**

A presión y temperatura estándar, el etano es un gas incoloro e inodoro. El etano se obtiene a escala industrial como fracción aislada del gas natural y como producto intermedio del refinado del petróleo. Se usa principalmente como materia prima petroquímica para la producción de etileno. Un valor típico del poder calorífico mínimo del etano es 47 MJ/kg. En este trabajo nos referiremos al etano como combustible gaseoso.

#### **1.6.5. Gas licuado del petróleo (LPG)**

El gas licuado del petróleo, también denominado LPG, gas LP, gas de petróleo líquido o, simplemente, propano o butano, es una mezcla inflamable de gases de hidrocarburos utilizados principalmente como combustible en calefacciones y vehículos. Cuando se utiliza específicamente como combustible para vehículos, recibe el nombre de autogás.

Entre las variedades de LPG que se comercializan cabe mencionar el propano (C<sub>3</sub>), el butano (C<sub>4</sub>) y, más comúnmente, mezclas de estos dos gases. El propileno, los butilenos y otros hidrocarburos también suelen estar presentes en bajas concentraciones. Para detectar fugas con facilidad se añade etanotiol, un potente odorante.

El LPG se prepara mediante el refinado del petróleo o gas natural "húmedo", y procede en su práctica totalidad de fuentes fósiles de combustible. Su fabricación tiene lugar durante el refinado del petróleo o crudo, o a partir de la extracción de corrientes de petróleo o gas natural conforme emergen del terreno.

Puesto que su punto de ebullición está por debajo de la temperatura ambiente, el LPG se evapora rápidamente a temperaturas normales, por lo que suele suministrarse en contenedores de acero presurizados. A diferencia del gas natural, el LPG es más pesado que el aire, por lo que se desplaza a ras de suelo y suele acumularse en zonas bajas, como los sótanos. Un valor típico del poder calorífico mínimo del LPG es 46 MJ/kg.

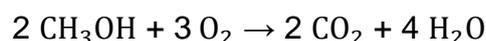
En este trabajo nos referiremos al LPG como combustible gaseoso licuado.

### 1.6.6. Metanol (CH<sub>3</sub>OH)

También conocido como alcohol metílico, alcohol de madera, nafta de madera o alcohol de quemar, es un compuesto químico cuya fórmula es CH<sub>3</sub>OH (que a menudo se abrevia a MeOH). El metanol se obtenía antiguamente como producto intermedio de la destilación destructiva de la madera, de ahí la denominación de 'alcohol de madera'. En la actualidad, el metanol se produce mediante un proceso catalítico industrial directamente a partir de monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno.

El metanol es el alcohol más simple, y es un líquido ligero, volátil, incoloro e inflamable con un olor característico muy similar al del etanol (o alcohol apto para consumo humano), si bien algo más dulce. Entre otros usos, se emplea para producir biodiésel.

El metanol arde en presencia de oxígeno, incluido el aire libre, para formar dióxido de carbono y agua:



Se estima que su demanda global es de entre 27 y 29 millones de toneladas métricas, lo que lo convierte en uno de los productos químicos de mayor trasiego comercial en todo el mundo. En los últimos años, la capacidad de producción ha crecido considerablemente con la aparición de nuevas plantas en Sudamérica, China y Oriente Medio, debido en este último caso al acceso a abundantes reservas de gas metano.

Aparte del agua, entre las impurezas típicas cabe mencionar la acetona y el etanol. Si el metanol se carga en barcos en los que se han transportado otras sustancias, la contaminación con restos de la carga anterior es altamente probable. Un valor típico del poder calorífico inferior del metanol es 20 MJ/kg.

En este trabajo nos referiremos al metanol como combustible gaseoso líquido.

### **1.6.7. Dimetil éter (DME)**

También conocido como metoximetano, el dimetil éter (DME) es un compuesto orgánico cuya fórmula es  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ . El éter más sencillo es un gas incoloro de gran utilidad como precursor de otros compuestos orgánicos y como propelente para aerosoles.

Debido a la sencillez de este compuesto orgánico de cadena corta, su combustión se produce con emisiones muy bajas de  $\text{NO}_x$  y CO y sin emisiones de  $\text{SO}_x$ , debido a la ausencia de azufre. Un valor típico del poder calorífico inferior del DME es 29 MJ/kg.

En este trabajo nos referiremos al DME como combustible gaseoso licuado.

## **1.7. Motores de gas**

Cuando mencionamos el término gas nos estamos refiriendo a un hidrocarburo o una mezcla de hidrocarburos con otros gases, como He,  $\text{N}_2$  o CO, que a presión y temperatura ambiente se encuentra en estado gaseoso y tiene un punto de inflamabilidad a una temperatura definida. Las propiedades físicas de la mezcla gaseosa determinan si es adecuada para un motor ME-GI-S o ME-LGI-S. El gas debe seleccionarse en la fase inicial de un proyecto.

- Si el gas se puede comprimir a aproximadamente 300 o 400 bares a 45 °C y comportarse como una única fase, el estado gaseoso (es decir, compresible) es adecuado para el motor ME-GI-S. Los combustibles gaseosos como el gas natural y LNG son adecuados para el funcionamiento a las altas presiones de gas que se alcanzan en la toma de entrada del motor. Designaremos estos tipos de gas como combustibles gaseosos.

- Si el gas (o la mezcla de gases) se puede comprimir a unos 35 bares en el intervalo entre 25 y 55 °C, y se encuentra en estado líquido (es decir, prácticamente incompresible), es idóneo para el motor ME-LGI-S. Los combustibles gaseosos líquidos como LPG, DME y metanol son adecuados para el funcionamiento a baja presión de gas en la entrada del motor. Es importante destacar que la presión y la temperatura requeridas para el sistema de combustible a baja presión varían ligeramente con el combustible seleccionado. Utilizaremos la designación combustible gaseoso líquido.

---

## **2. DESCRIPCION TECNICA DEL CONCEPTO DE INYECCION DE GAS (ME-GI-S)**

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

## 2. DESCRIPCION TECNICA DEL CONCEPTO DE INYECCION DE GAS (ME-GI-S)

Desde el punto de vista técnico, la diferencia entre los motores de combustible convencional y los de combustión de gas es mínima. En ambos casos, el proceso de combustión se ajusta al principio del ciclo diésel.

En los motores de combustible convencional, la ignición del carburante inyectado se produce porque la temperatura del gas comprimido en el cilindro sobrepasa la temperatura de ignición espontánea del combustible que, en el caso de combustible líquido, es de aproximadamente 210-230 °C.

La temperatura de ignición espontánea de un gas puro, como el metano y el etano, está comprendida entre 470 y 540 °C. Por lo tanto, es necesario inyectar una pequeña cantidad de combustible piloto en el cilindro antes de inyectar el gas, ya que la temperatura registrada en la cámara de combustión en el momento de la inyección sería insuficiente para la ignición espontánea del gas.

Aparte de estos sistemas incorporados al motor propiamente dicho, el motor y sus componentes auxiliares incorporarán una serie de nuevas unidades. A continuación se enumeran las más importantes (aparte del sistema de suministro de gas):

- Sistema de ventilación, para airear el espacio comprendido entre la tubería interior y exterior del tubo de doble pared (figura 2.1 y 2.2)

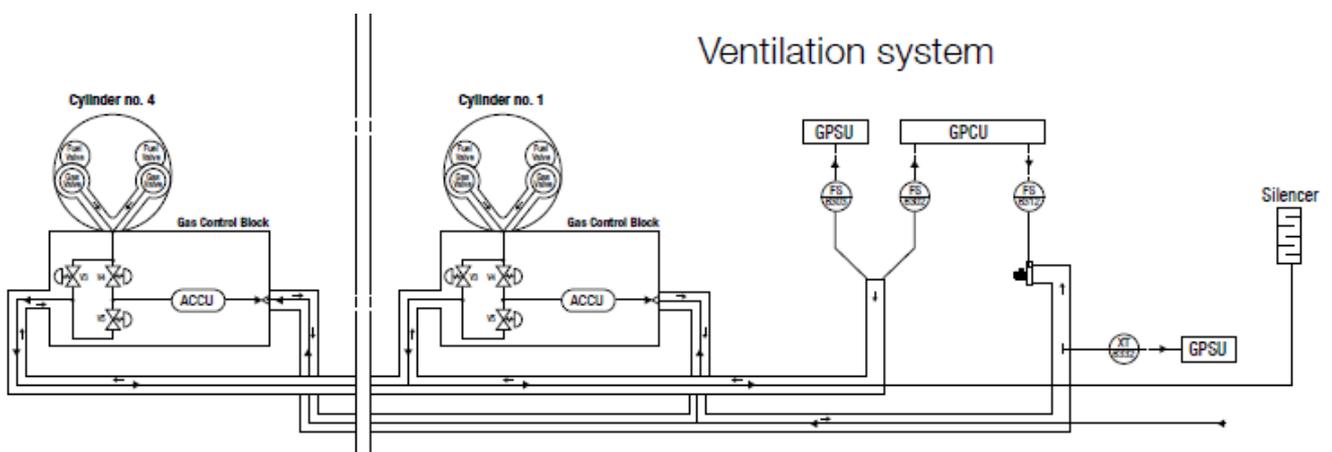


Figura 2.1: Sistema de ventilación

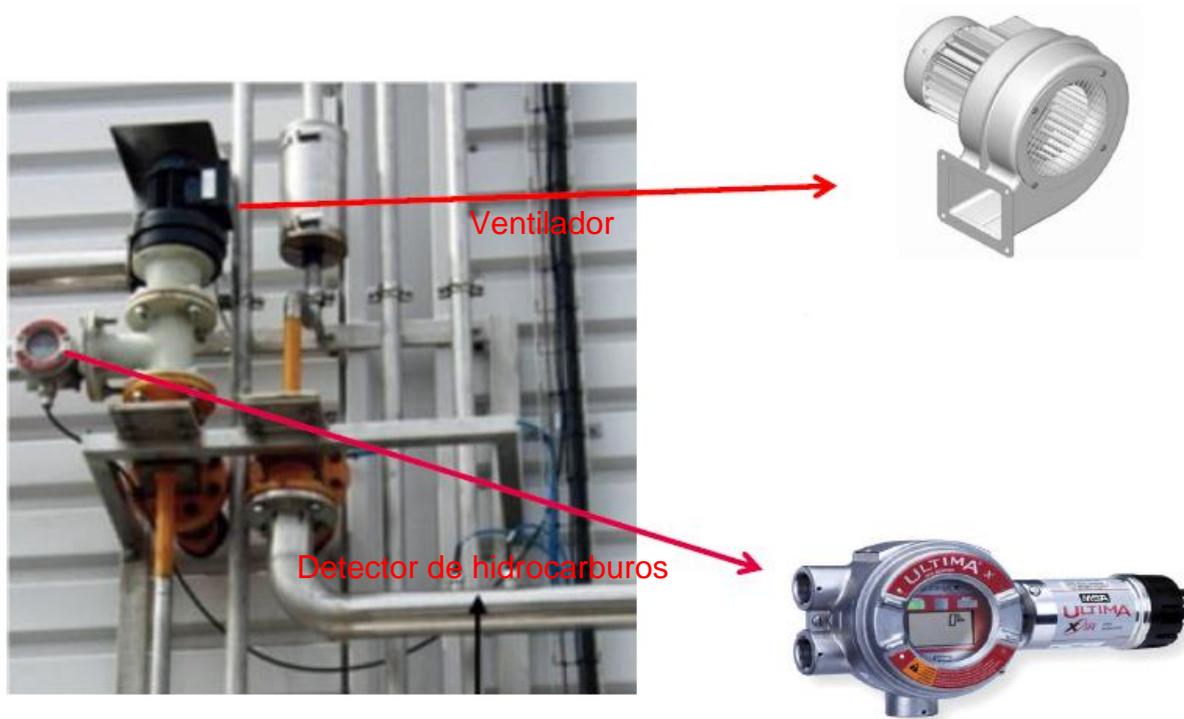


Figura 2.2: Componentes del sistema de ventilación

- Sistema de sellado de aceite, que conduce el aceite de sellado hasta las válvulas de gases que separan el aceite de control y el gas.
- Sistema de gas inerte, para purgar el gas inerte expulsándolo del sistema de gas.



Datos generales:

- Gas Inerte:  $\text{CO}_2$  o  $\text{N}_2$
- Presión de purgado: 7-10 bar

Figura 2.3: Sistema de gas inerte

- Sistema de control y seguridad, integrado por un analizador de hidrocarburos que verifica el contenido en hidrocarburos del aire que circula por las tuberías de gas de doble pared. Las tuberías de doble pared son de bajo precio, fáciles de instalar, simple diseño y no requieren mantenimiento (figura 2.4).

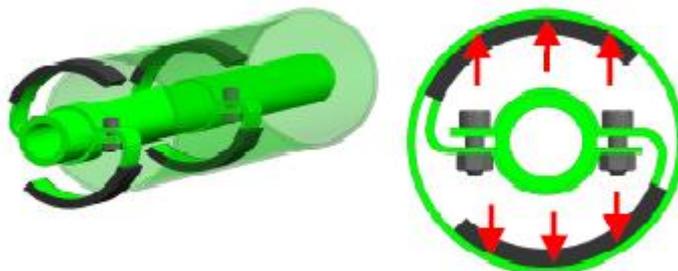


Figura 2.4: Diseño tubería de doble pared

Los sistemas de control y seguridad están diseñados para revertir el funcionamiento a condiciones seguras en caso de fallo. Si se detecta cualquier fallo, incluso en el propio sistema de control, durante el funcionamiento con combustible gaseoso, se detendrá o cortará el suministro de combustible gaseoso y el motor pasará a funcionar exclusivamente con combustible piloto. Seguidamente, se llevará a cabo el soplado y la purga de las tuberías de gas a alta presión y de todo el sistema de suministro de gas para vaciarlos completamente. En todos los casos, el cambio al funcionamiento con combustible líquido se lleva a cabo sin reducción de la potencia.

El gas del suministro de combustible gaseoso circula por la tubería principal a través de unas tuberías en cadena hasta llegar al sistema de bloqueo de válvula y acumulador de cada cilindro. Estas tuberías en cadena desempeñan una misión importante:

- Gracias a su diseño de doble pared actúan como una junta flexible entre el sistema principal de tuberías, totalmente rígido, y la estructura del motor, protegiendo así las tuberías principales y de cadena al amortiguar las fuerzas originadas por la inevitable dilatación térmica del sistema de tuberías de gas y la estructura rígida del motor. El depósito intermedio alberga gas de inyección en una cantidad 20 veces superior a la utilizada en cada recorrido del pistón a rendimiento máximo continuo, es decir, a una carga del 100 %. Este depósito tiene dos funciones importantes:
- Suministra la cantidad de gas necesaria para la inyección a una presión predeterminada, ligeramente inferior.
- Es una parte importante del sistema de seguridad.

El diseño de la tubería de suministro de gas es de tipo 'common rail', por lo que se precisa un sistema auxiliar de control de aceite para la válvula de inyección de gas. A grandes rasgos, este sistema está integrado por el sistema hidráulico de control de aceite ME y una válvula ELGI de inyección eléctrica de gas ELGI (ELectrical Gas Injection) que suministra aceite de control a alta presión a la válvula de inyección de gas, regulando así la frecuencia de actuación y la apertura de la válvula de gas.

Como se mencionó anteriormente, el funcionamiento con doble combustible requiere que se inyecte tanto combustible piloto como gaseoso en la cámara de combustión. Para ello se utilizan diferentes tipos de válvulas. Hay tres válvulas por cilindro para inyección de gas y tres para combustible piloto en motores con un diámetro de cilindro superior a 60 cm. Los medios necesarios para el funcionamiento con combustibles líquido y gaseoso son los siguientes:

- Suministro de combustible gaseoso
- Suministro de combustible líquido (combustible piloto)
- Suministro de combustible de control para el accionamiento de las válvulas de inyección de gas
- Suministro de aceite de sellado.

El diseño de la válvula de inyección de gas se muestra en la figura 2.5. Esta válvula se ajusta a los principios tradicionales del diseño compacto. La admisión del combustible gaseoso hacia la válvula de inyección se efectúa a través de orificios en la culata del cilindro. Con el fin de evitar fugas de gas entre la culata del cilindro/válvula de inyección de gas y la carcasa de la válvula/guía de la punta del eje, se han instalado anillos de estanqueidad a prueba de gases y temperaturas elevadas. Las fugas de gas que pudieran producirse a través de los anillos de estanqueidad se canalizarían mediante los orificios de la válvula de inyección de gas al espacio entre las tuberías interior y exterior de protección del sistema de tubería de doble pared. Si se produce una fuga, los sensores de HC la detectarían.

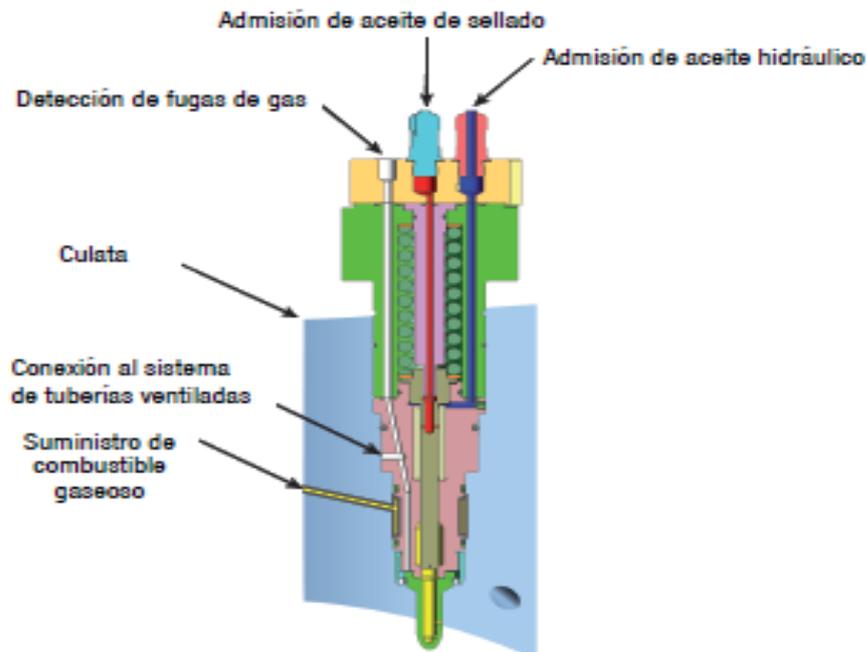


Figura 2.5: Válvula de inyección de gas

El gas actúa de manera continua sobre el vástago de la válvula a una presión máxima de 300 bares. Con el fin de impedir la entrada del gas en el sistema de actuación del aceite de control a través del espacio libre alrededor del vástago, este está sellado con aceite sellante a una presión superior en 25 a 50 bares a la del gas.

La válvula del combustible piloto es idéntica a una válvula estándar ME de fueloil excepto en la boquilla. Como combustible piloto se puede utilizar fueloil, MGO, MDO, crudo y biocarburante crudo. El sistema de seguridad de IG supervisa continuamente la presión del fueloil para detectar cualquier anomalía en el funcionamiento de la válvula de fueloil.

El diseño de la válvula de fueloil permite que funcione a un rendimiento máximo continuo utilizando solo fueloil y una sobrecarga del 10 % cada 12 horas consecutivas. El motor de gas puede funcionar con fueloil a plena carga y pasar de gas a combustible en cualquier momento sin interrumpir su funcionamiento.

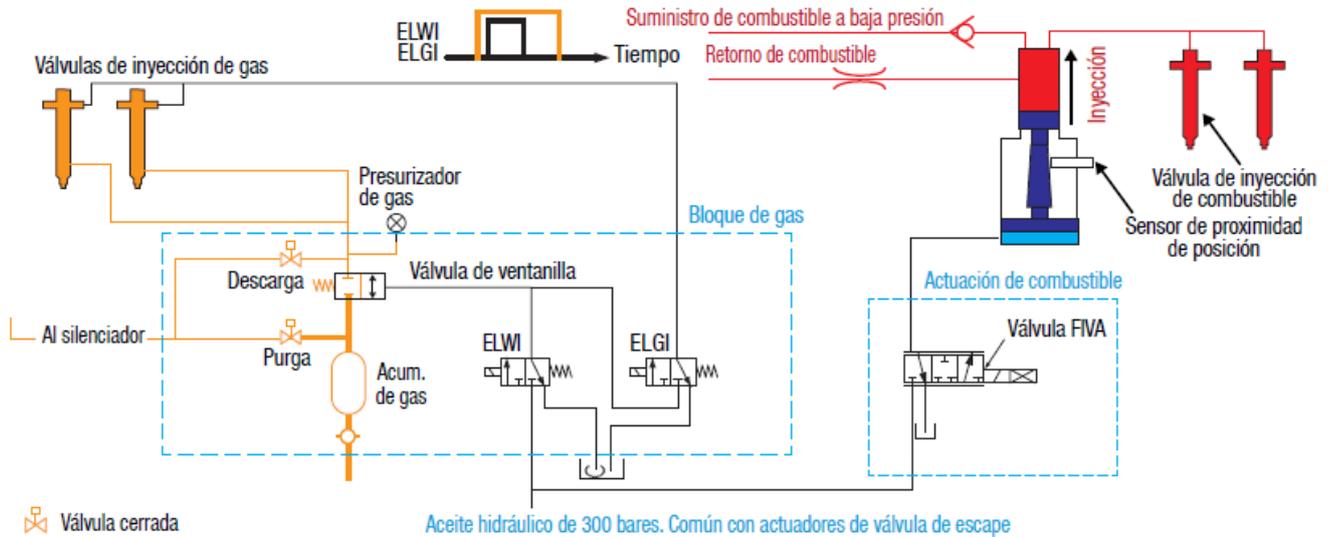


Figura 2.6: Sistema de inyección ME-GI para diámetro de 50 pulgadas e inferior

Como puede apreciarse en la figura 2.6 (Sistema de inyección GI), el sistema de inyección ME-GI para motores con diámetros de cilindro de hasta 50 pulgadas consta de válvulas de fueloil, válvulas de combustible gaseoso, ELGI para apertura y cierre de válvulas de combustible gaseoso, un FIVA (Fuel Injection Valve Actuator), o actuador de válvula de inyección de combustible para controlar, a través de la válvula de combustible líquido, el perfil de inyección de combustible líquido y, finalmente, la válvula ELWI (ELectrical Window and gas 'shutdown'), que controla la posición de la válvula de ventanilla como medida adicional de seguridad para prevenir fugas de gas y garantizar una doble barrera de cierre de la válvula a la cámara de combustión. También forma parte del sistema de inyección el amplificador de presión de combustible líquido convencional, que suministra combustible piloto en el modo de funcionamiento de combustible dual.

El amplificador de presión de fueloil incorpora un sensor de presión para medir la presión del combustible piloto en la parte de alta presión. Como ya se ha mencionado, este sensor supervisa el funcionamiento de la válvula de combustible líquido. Si se detecta que la inyección se desvía de los valores normales, el sistema de seguridad de IG bloqueará la apertura de la válvula ELGI para evitar que el combustible de control pase a través de ella. En este momento no se produce ninguna inyección de gas.

## **2.1. Características de seguridad**

Si no se detecta un funcionamiento anómalo de la válvula de combustible líquido en condiciones de funcionamiento normales, la válvula de combustible gaseoso se abre en el ángulo correcto respecto del cigüeñal y se lleva a cabo la inyección del combustible gaseoso. El combustible gaseoso se suministra directamente a un medio en plena combustión. Debido a ello, se considera que es casi imposible que se filtre gas sin quemar por los segmentos del pistón y llegue al receptor de aire de recuperación.

Este tipo de riesgo se evita mediante la supervisión de la presión y el estado de combustión del receptor de aire de recuperación. Si se registra una presión de combustión excesiva, el motor abandona el modo de funcionamiento con combustible gaseoso y vuelve a quemar únicamente combustible líquido.

La finalidad es detectar con suficiente margen de tiempo si se producen fugas de gas en alguna de las válvulas de inyección de gases. La válvula de ventanilla tiene una función de seguridad doble que garantiza que la inyección de gas en la cámara de combustión solo puede efectuarse en el momento adecuado del proceso de inyección, (véase figura 2.1.1). En caso de avería en el sistema de gas, también puede bloquear la entrada del gas en la cámara de combustión, garantizando así que solo entre una cantidad de gas muy pequeña.

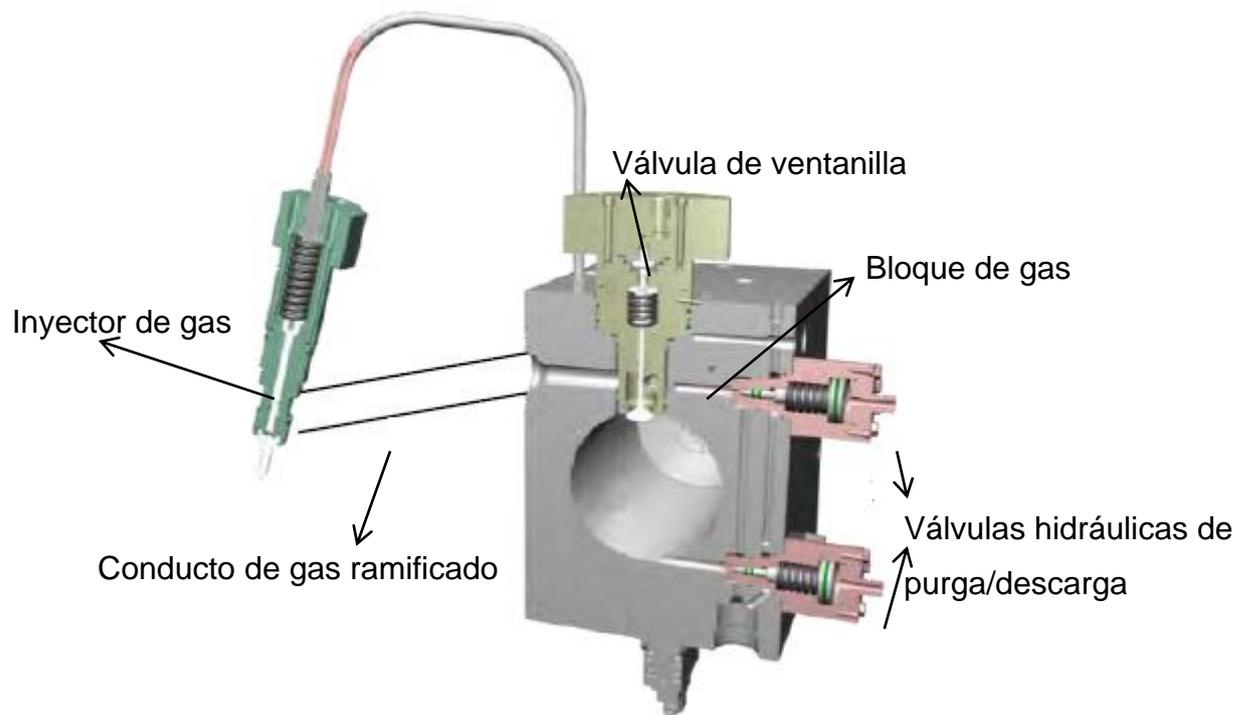


Figura 2.1.1: Control de inyección de gas

El sensor de presión está situado entre la válvula de ventanilla y la válvula de inyección de gas. El pequeño volumen de gas en la culata de cada cilindro registra la presión del gas durante un ciclo. Este sistema permite la detección inmediata de flujos de gas anómalos, tanto si se deben a válvulas de inyección de gas atascadas como a fugas u obstrucciones en las válvulas de gas. El suministro de gas se interrumpe y las líneas de gas se purgan con gas inerte. También en este caso, el motor sigue funcionando exclusivamente con fueloil líquido sin que en ningún momento se reduzca la potencia.

## **2.2. Alta presión, tubería de doble pared**

Las tuberías de gas en cadena están diseñadas con doble pared, de tal modo que la tubería exterior de protección impide que el combustible gaseoso rebose hacia los huecos de la maquinaria en caso de que se rompa la tubería interior.

El espacio de intervención, que también abarca la zona que rodea a las válvulas, bridas y otros elementos, está dotado de ventilación mecánica independiente con una frecuencia de renovación de aire de aproximadamente 30 veces por hora. La presión en el espacio de intervención es inferior a la de la sala de máquinas con los motores de los ventiladores (de ex-tracción) situados fuera de los conductos de ventilación. El aire de ventilación de admisión se toma de una zona libre de riesgo.

La distribución de las tuberías de gas está concebida para aspirar el aire que rodea la admisión de la tubería canalizándolo al interior del sistema de tubería de doble pared. A continuación, el aire se canaliza hacia los cierres de control de cada válvula de gas y se devuelve a las tuberías de cadena, desde donde se expulsa a la atmósfera.

El aire de ventilación se expelle a una zona sin riesgo de incendio. El sistema de tubería de doble pared está diseñado de manera que todas las piezas tengan ventilación (Fig. 2.1.2 y 2.1.3.). Todas las uniones selladas que estén en contacto con un volumen de gas a alta presión están ventiladas. De este modo, cualquier fuga de gas que pudiera ocurrir se canalizará a la parte ventilada del sistema de tubería de doble pared y será detectada por los sensores de HC.



Figura 2.2.1: Ramificación del sistema de tuberías de gas

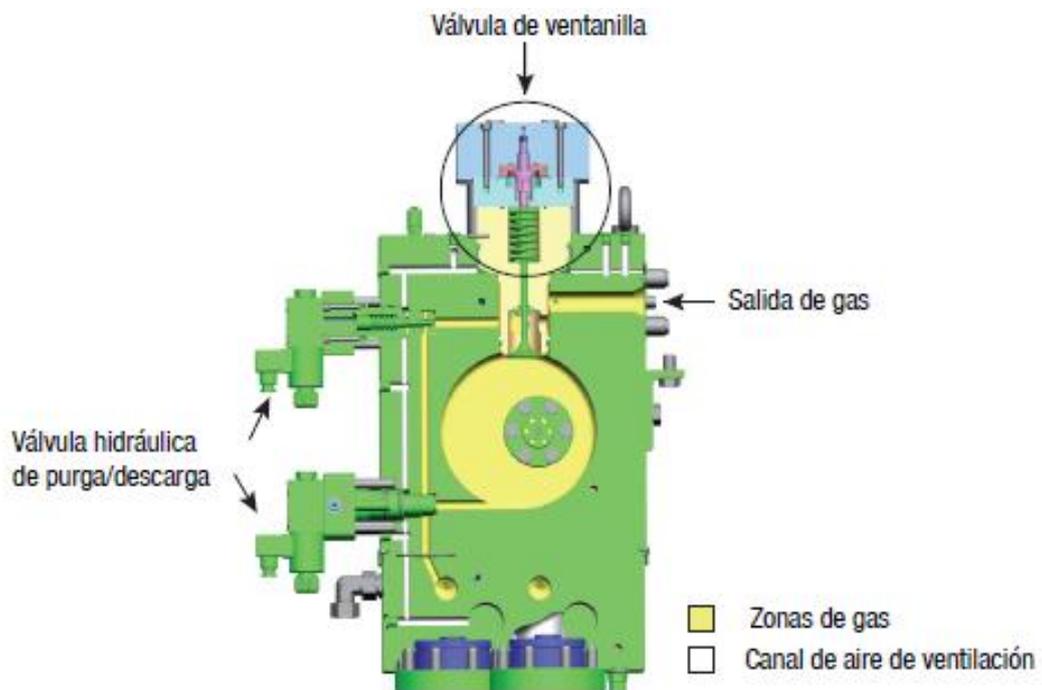


Figura 2.2.2: Bloque de control de válvulas de gas

Las tuberías de gas inherentes al mecanismo del motor se han diseñado para una presión superior en un 50% a la de funcionamiento normal, y están debidamente ancladas para evitar vibraciones mecánicas. Además, de acuerdo con las pruebas realizadas, son capaces de soportar una presión 1,5 veces superior a la de funcionamiento normal.

El diseño de tubería en cadena (Fig. 2.1.1) entre los diferentes cilindros garantiza que existe la flexibilidad adecuada para adaptarse a la dilatación térmica del motor al calentarse. El sistema de tuberías de gas también está diseñado para evitar fluctuaciones excesivas de la presión del gas durante el funcionamiento.

Con objeto de purgar el sistema tras el uso de gas, estas tuberías están conectadas a un sistema de gas inerte a una presión de aproximadamente 9 bares. En caso de fallo relacionado con el gas, el sistema de tuberías de alta presión se despresuriza antes de efectuarse la purga automática. Durante una detención normal del gas, la purga automática empezará tras un periodo de 30 minutos. Esto deja un margen de tiempo suficiente para un reinicio rápido en modo de combustible gaseoso.

### **2.3. Combustible gaseoso y uso del combustible con ME-GI-S**

El motor MAN B&W ME-GI-S puede funcionar únicamente con combustible líquido, así como con una mezcla cualquiera de combustible gaseoso y fueloil/combustible piloto en proporción 97%/3% (Fig. 2.3.1). En el caso de combustibles gaseosos de muy bajo contenido energético, puede que se precise una mayor cantidad de combustible piloto. Cualquiera que sea el modo de funcionamiento del motor, será arrancado con fueloil hasta el 15 % de la carga y se necesitará combustible piloto para la combustión del gas.

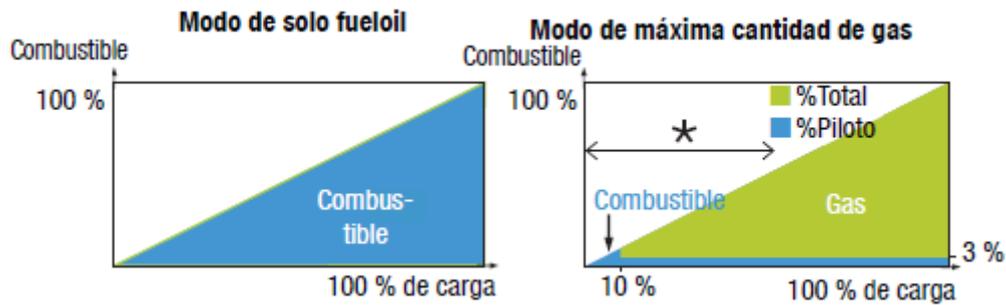


Figura 2.3.1: Modo tipo de combustible para MAN B&W diésel de dos tiempos de baja velocidad y combustible dual

Por lo general la estación generadora deberá disponer de un sistema completo de suministro de fueloil (fig. 2.3.2) y un sistema de suministro de combustible gaseoso (fig. 2.3.3) que irán a parar al motor principal (figura 2.3.4).

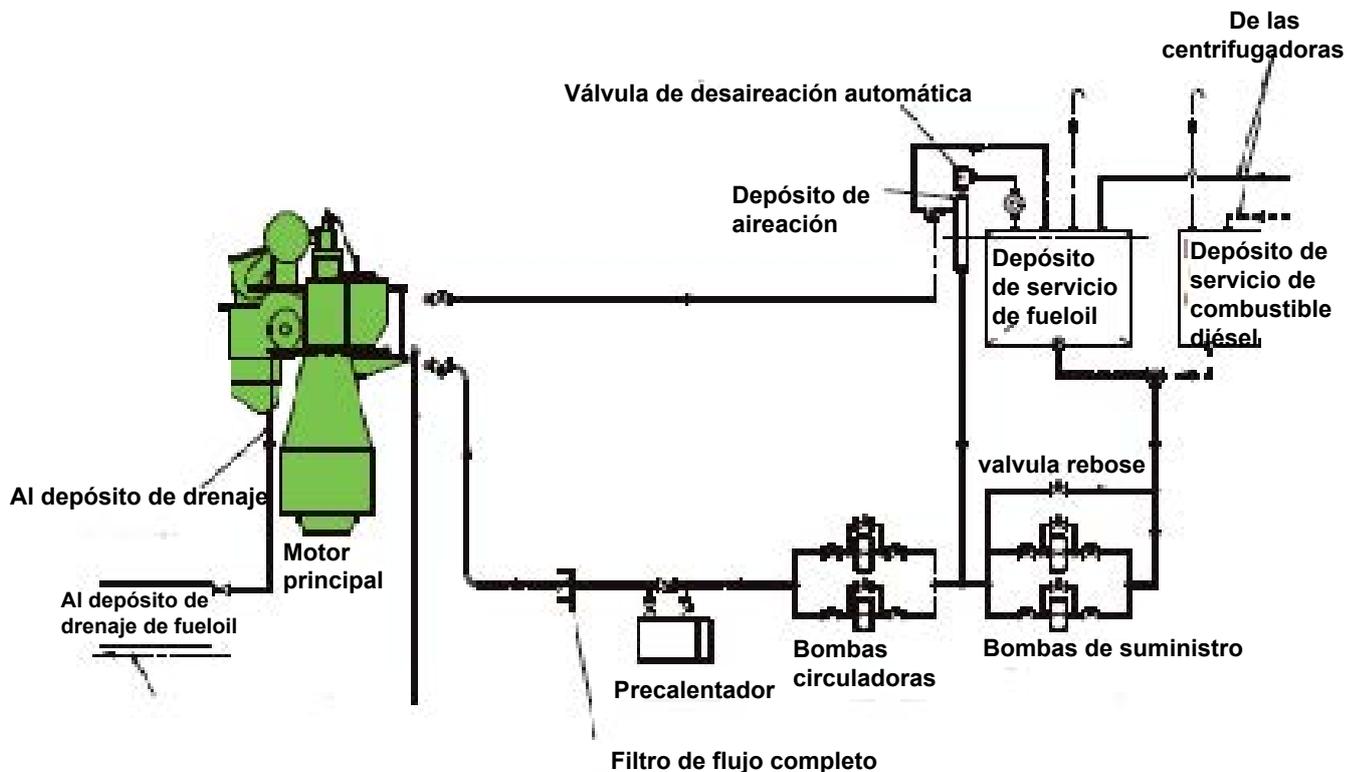


Figura 2.3.2: Sistema de fueloil

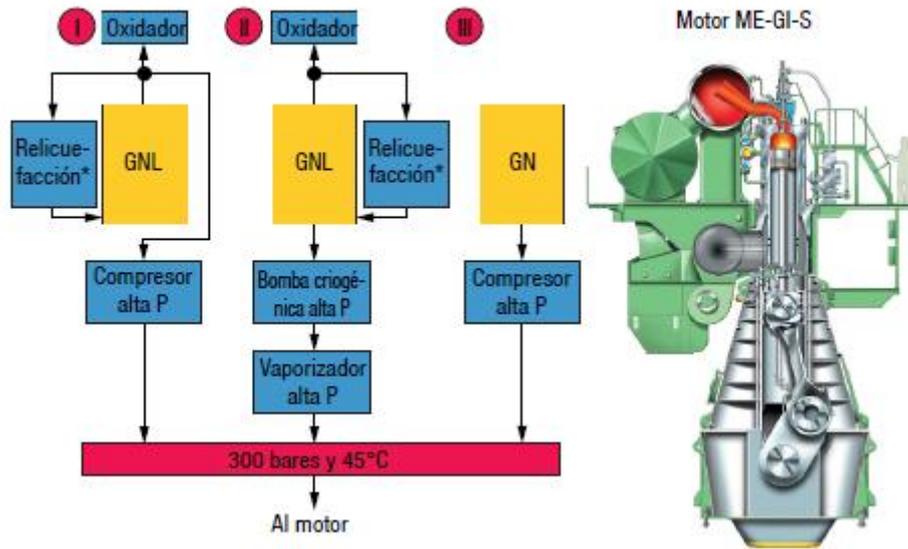


Figura 2.3.3: Motor ME-GI-S y gestión de gas

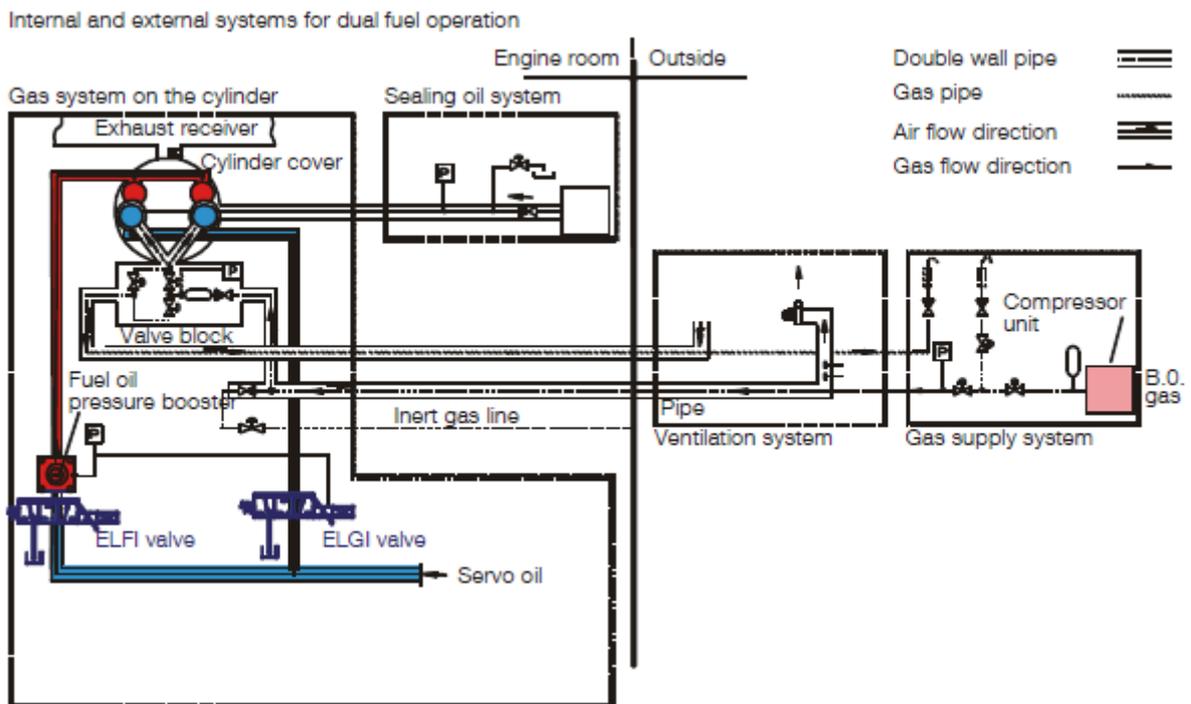


Figura 2.3.4: Motor ME-GI-S con suministro de fuel y gas

La planta de suministro de gas debe cumplir los requisitos especificados en la figura 2.3.5:

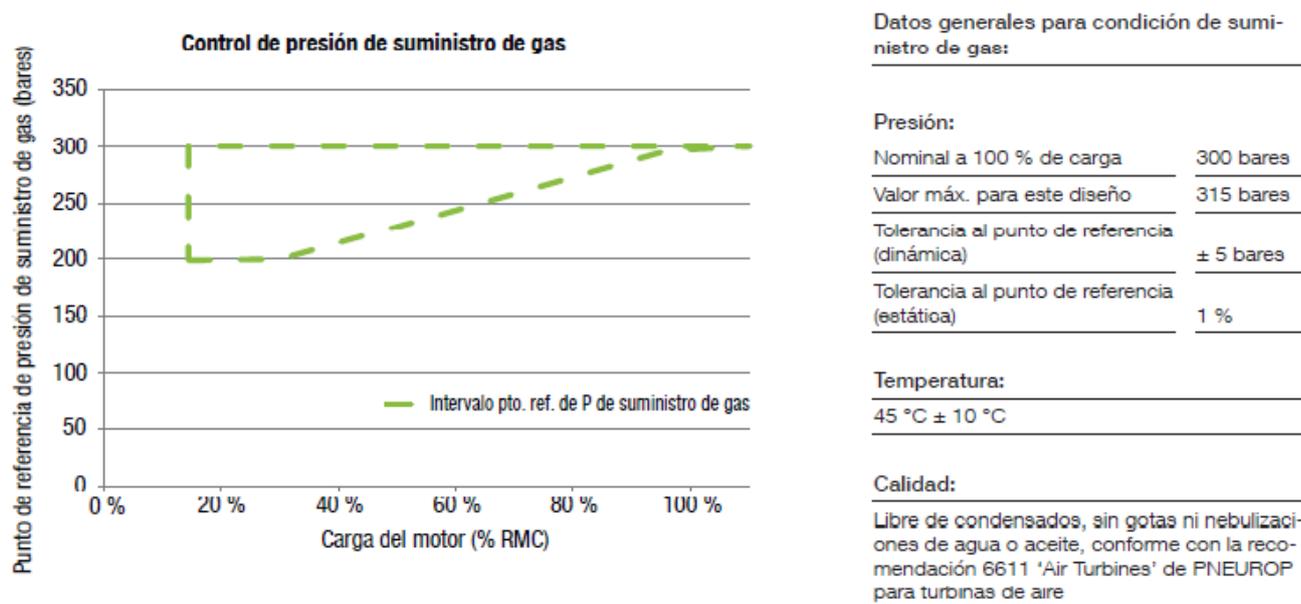


Figura 2.3.5: Estación de suministro de gas, especificación orientativa

El tamaño y consumo eléctrico de la estación de compresión o de la bomba criogénica de LNG dependen principalmente de la presión de gas a la entrada de la planta y poder calorífico inferior o LCV por sus siglas en inglés (fig. 2.3.6). En la tabla 2.3.1 se enumeran las especificaciones del gas guía.

Es posible usar como combustible piloto cualquier aceite mineral o biocombustible comercial (tablas 2.3.1 y 2.3.2).

Se recomienda que el sistema de suministro del combustible gaseoso incorpore dos compresores en instalaciones con un solo motor. Cada uno de los compresores debe tener una capacidad de redundancia del 100%.

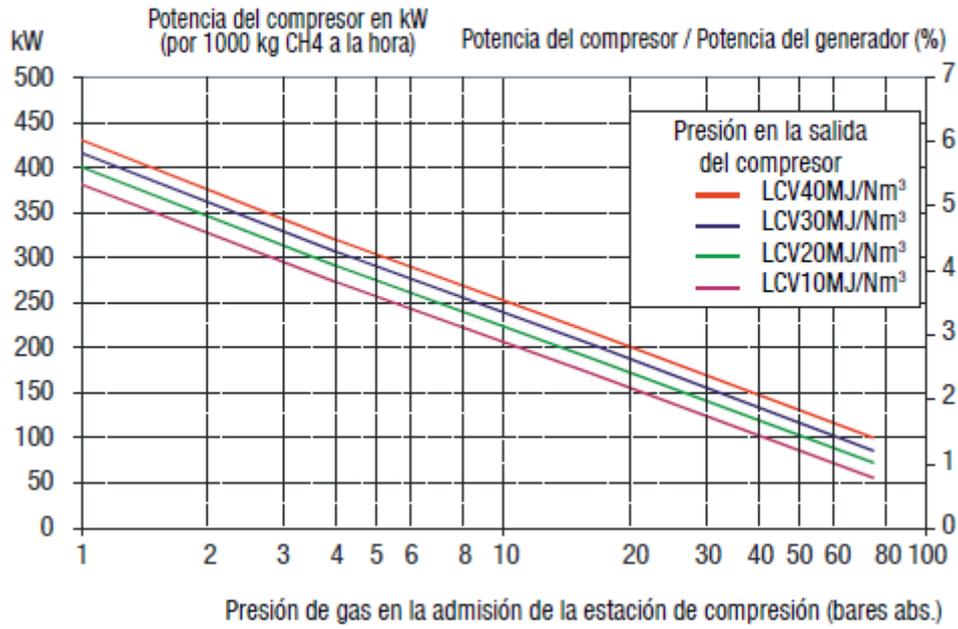


Figura 2.3.6: Demanda orientativa de potencia del compresor de gas para gas natural y gas natural comprimido

**DENOMINACION**

Poder Calorífico Inferior	MJ/Kg	38 como mínimo para obtener el máximo de combustible gas, por debajo de 38 podría necesitarse mayor cantidad de fueloil piloto
Número de gas metano		Sin límite
Contenido de metano	(% volumen)	Sin límite
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	(% volumen)	Max. 0,05
.Hidrógeno H <sub>2</sub>	(% volumen)	Sin límite
Condensado de agua e hidrocarburos	(% volumen)	0
Amoniaco	(mg/Nm <sup>3</sup> )	Máx. 25
Cloro + flúores	(mg/Nm <sup>3</sup> )	Máx. 50
Partículas o contenido sólido	(mg/Nm <sup>3</sup> )	Máx. 50
Partículas o tamaño sólido	(µm)	Máx. 5
Temperatura de admisión de gas	(°C)	45
Presión del gas		Según especificación de MAN Diesel & Turbo

Tabla 2.3.1: Valores máximos a la entrada de la planta antes del tratamiento in situ. Especificación orientativa de gas para motores diésel de dos tiempos de baja velocidad MAN B&W.

**DENOMINACIÓN**

Densidad a 15°	kg/m <sup>3</sup>	1010
Viscosidad cinemática a 100°C	cST	55
Punto de inflamabilidad	°C	>60
Residuo de carbono	%(mm)	22
Cenizas	%(mm)	0,15
Agua	%(mm)	1,0
Azufre	%(mm)	5,0
Vanadio	ppm(m/m)	600
Aluminio + silicio	mg/kg	80
Sodio y potasio	ppm(m/m)	200
Calcio	ppm(m/m)	200
Plomo	ppm(m/m)	10
TAN (número ácido total)	mg KOH/g	< 25
SAN (número de ácido fuerte)	mg KOH/g	0

Tabla 2.3.2: Valores máximos a la entrada de la planta antes del tratamiento in situ. Especificación orientativa de biocombustible de dos tiempos para motores diésel de dos tiempos de baja velocidad MAN B&W.

Para plantas con varios motores alimentados con GN o LNG, se recomienda instalar un compresor para cada motor y que todos ellos estén conectados a una misma línea de suministro de gas (fig.2.3.7).

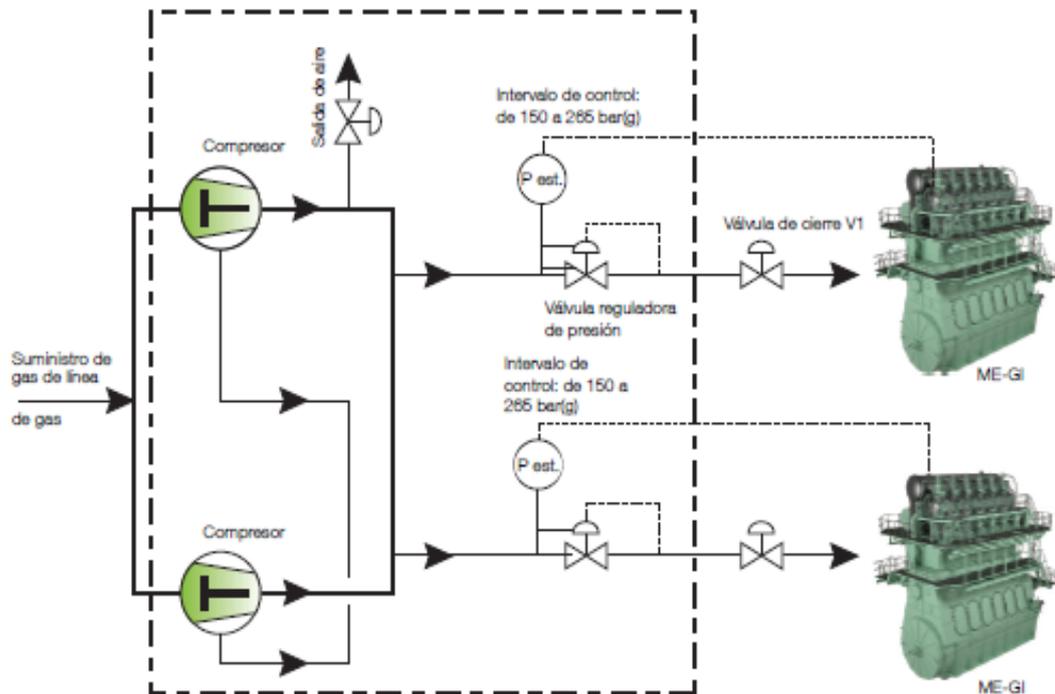


Figura 2.3.7: Instalación de gas con varios motores

Para el funcionamiento con LNG, que requiere una presión de gas de 300 bares, el método tecnológico consiste en presurizar el LNG y evaporar a presión constante. A este respecto, hay disponibles soluciones técnicas de diversos proveedores. Si este es el caso el consumo energético estimado equivale aproximadamente al 0,5 % de la potencia del motor. La redundancia del sistema debe decidirse con el usuario final. Se precisa un sistema de glicol y agua para el calentamiento de LNG en el vaporizador y para el consumo de vapor (fig.2.3.8).

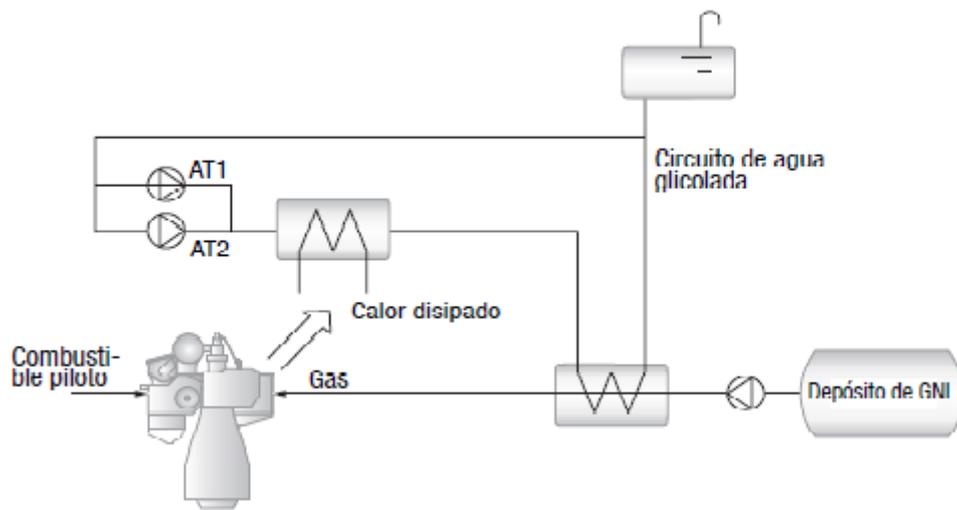


Figura 2.3.8: Sistema de bombeo y regasificación del LNG para entrada en motor

---

### **3. DESCRIPCION DEL CONCEPTO DE INYECCION DE GAS LICUADO (ME-LGI-S)**

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

### 3. DESCRIPCION DEL CONCEPTO DE INYECCION DE GAS LICUADO (ME-LGI-S)

Los pormenores de la inyección de gas a alta presión ya se han tratado en apartados anteriores de este documento. El presente capítulo se centra en combustibles gaseosos licuados como LPG, DME y metanol, que pueden inyectarse en la cámara de combustión en forma líquida. La combustión de estos gases obedece al mismo principio del ciclo diésel descrito previamente, como ocurría con los motores ME-GI-S en su funcionamiento convencional.

Para hacer posible la combustión de carburantes gaseosos licuados, MAN Diesel & Turbo ha desarrollado la válvula de inyección de impulsor de combustible o FBIV por sus siglas en inglés (Fig. 3.1 y 3.2), que se aplica en el diseño del motor ME-LGI-S.

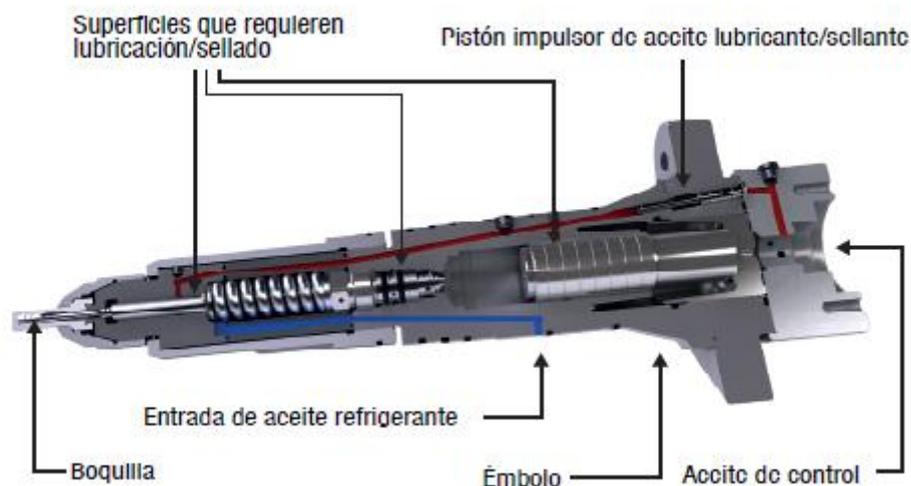


Figura 3.1: Corte transversal de válvula de inyección de impulsor de combustible (FBIV)

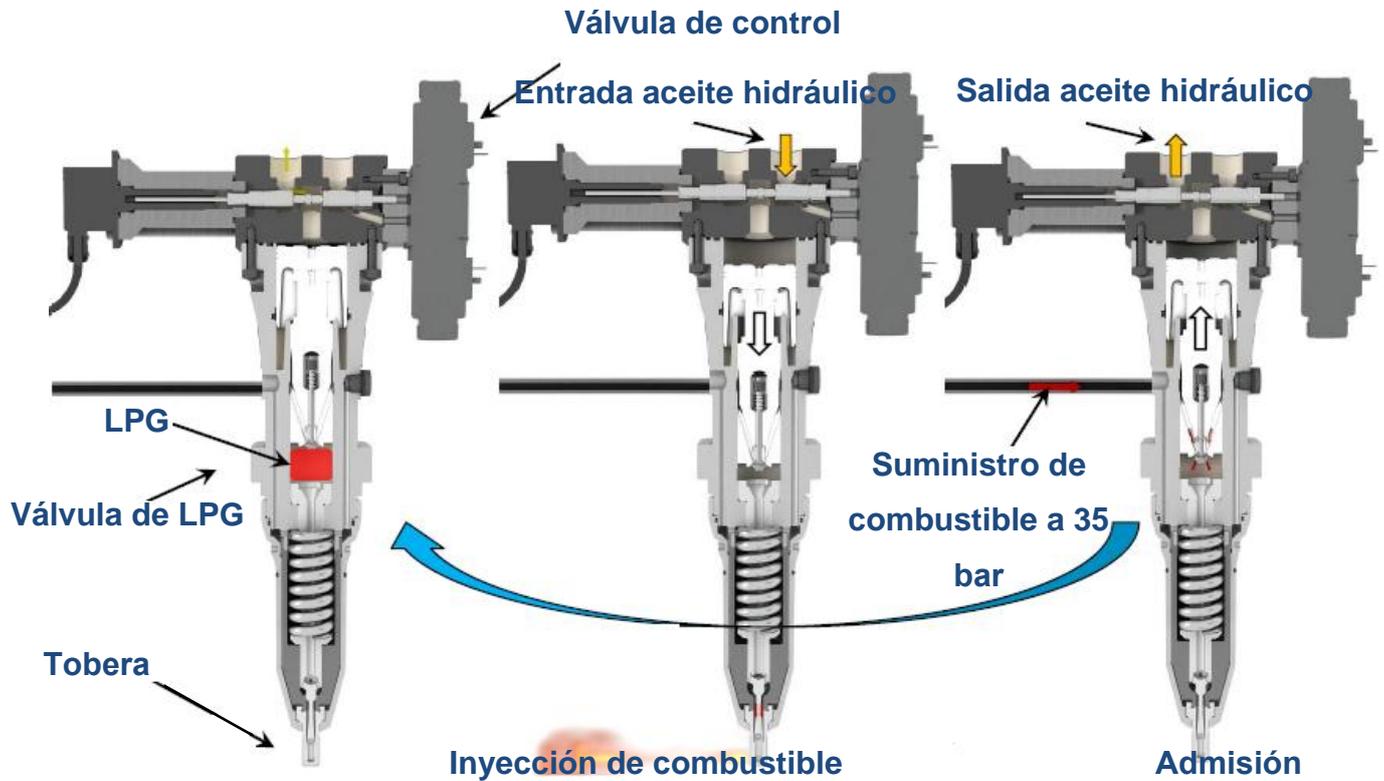


Figura 3.2: Proceso de inyección en FBIV

La FBIV combina en un solo elemento el impulsor de fueloil y la válvula de inyección de corredera. Ambos son diseños de probada eficacia en el sector náutico, concretamente en los motores diésel de dos tiempos de baja velocidad MAN B&W destinados a propulsión. Mediante el uso de este diseño se reduce la inercia total del sistema de inyección de combustible y se mejora el tiempo de respuesta de la FBIV. Las pruebas realizadas en motores para uso náutico en servicio han puesto de relieve un mejor control de los perfiles de inyección.

Cuando se utilice LPG o metanol, cada una de las culatas se equipará con válvulas FBIV diseñadas específicamente para el combustible gaseoso licuado que se seleccione. Sobre la culata se montará un bloque de inyección de gas licuado (LGI). Este bloque contiene una válvula de control para LPG o metanol para la inyección de combustible, una válvula de sellado de actuación del impulsor, una válvula de succión forzada y una válvula de purga de LGI. Todas las tuberías de aceite hidráulico y gases de combustibles líquidos son de doble pared. Las tuberías de doble pared para LPG, metanol o DME se ventilan con aire de ventilación.

Es preciso refrigerar las FBIV y lubricar sus superficies móviles. Para ello, se ha integrado en el motor un sistema combinado de sellado y refrigeración de combustible que proporciona una presión de aceite de sistema de 50 bares. El sistema lubrica todas las superficies móviles y controla que la temperatura de la válvula impulsora sea inferior al valor máximo de 60 °C (Fig. 3.1).

La presión del aceite de sellado se genera dentro de la FBIV con objeto de evitar la contaminación del aceite hidráulico al accionar la válvula. El aceite de sellado tiene ventajas adicionales, ya que impide que el LPG, el metanol o el DME atraviesen el mecanismo de protección y alcancen el sistema de drenaje de aceite. El sistema de aceite de refrigeración y aceite de sellado está plenamente integrado en el diseño del motor, e incorpora mecanismos para supervisar de manera continua si el sistema de aceite está contaminado con LPG, metanol o DME.

En caso de que se detecte LPG o metanol en el sistema, el motor pasará al modo de funcionamiento con fueloil y el combustible gaseoso se purgará del motor. Al mismo tiempo, la sección de suministro de la bomba de aceite de refrigeración se conmutará para limpiar el aceite del sistema, y el circuito de aceite se lavará con aceite limpio. Seguidamente, el aceite limpio se recogerá junto con el contaminado en el tanque de aceite de refrigeración, y el sistema solo podrá reanudar su funcionamiento una vez que no se detecte combustible gaseoso licuado en el depósito.

Para garantizar que la FBIV se mantiene a la temperatura adecuada, el aceite de sistema se refrigera en un intercambiador de calor conectado a por ejemplo el sistema de refrigeración de baja temperatura.

Cuando se inyecta el combustible gaseoso licuado, el estado de la combustión se monitoriza mediante sensores PMI, que indican la presión media, situados en la culata de cada cilindro. Las condiciones de la combustión que se supervisan son tres: las presiones de compresión, las de combustión y las de expansión.

El combustible gaseoso licuado debidamente presurizado se envía a la admisión del motor a través de las tuberías de doble pared ventiladas con aire seco captado del sistema de aire de encendido. Un sistema de ventilación acoplado a la salida absorbe el aire hacia el interior. El equipo de suministro de combustible gaseoso licuado está íntegramente diseñado con doble pared, ya que cualquier fuga a la atmósfera se convertirá en vapor. La supervisión de este aspecto se efectúa mediante sensores de HC situados cerca de la salida del sistema de tubería de doble pared. Si la concentración de vapor de LPG, metanol o DME en el sistema de ventilación aumenta demasiado, el sistema de seguridad interrumpe el funcionamiento con GLP o metanol y el motor vuelve a funcionar exclusivamente con fueloil. Esta transición se lleva a cabo sin brusquedades y sin que se reduzca la potencia en ningún momento.

El motor integra un sistema de control y seguridad para LPG, metanol o DME. El panel de funcionamiento principal (MOP) cuenta con una interfaz fácil de usar para el funcionamiento con combustible gaseoso licuado. A través de este panel, el sistema de LGI supervisa e indica la presión, las temperaturas y la posición de las diferentes válvulas.

### **3.1. Combustible gaseoso licuado y uso del combustible con ME-LGI-S**

En esta sección se describen los sistemas auxiliares específicos para el motor ME-LGI-S. Además de estos, se necesitarán también los sistemas auxiliares normales para el concepto de ME controlado electrónicamente y, puesto que ME-LGI es un concepto de combustible dual, se necesita también un sistema de suministro estándar para el funcionamiento con fueloil. En la Fig. 3.1.1 se ofrece una vista general del sistema LGI-S externo.

En el diagrama esquemático del principio del sistema ME-LGI-S, el depósito de combustible gaseoso licuado se muestra como un depósito ventilado.

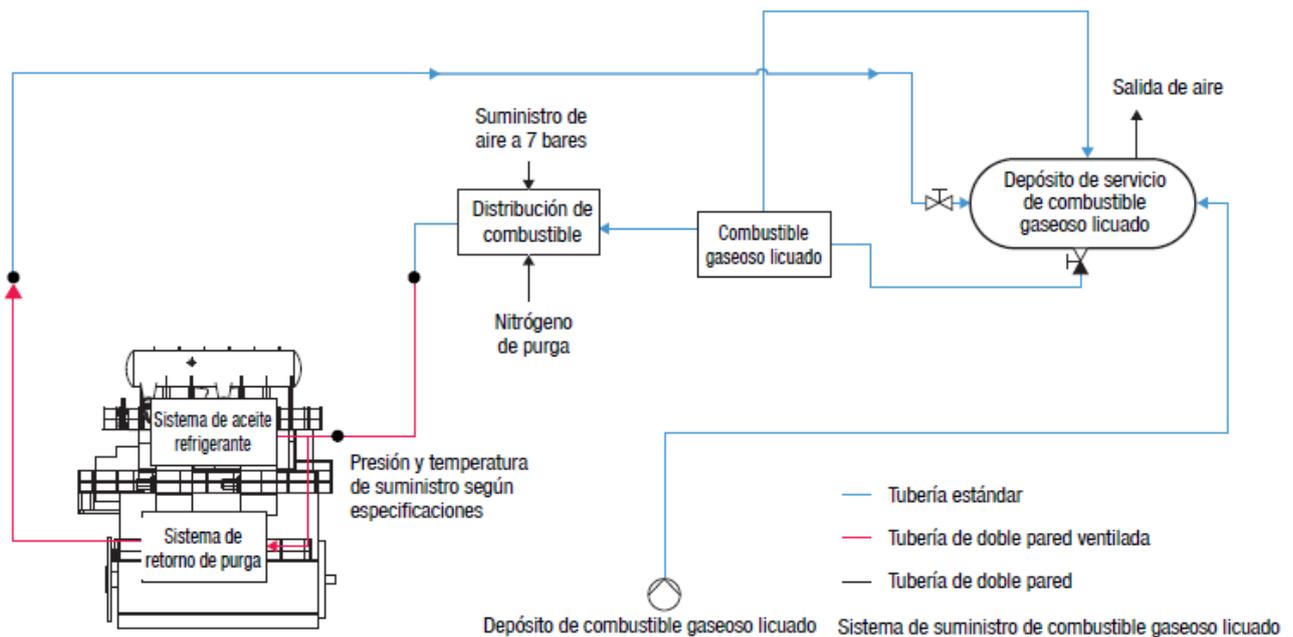


Figura 3.1.1: Esquema del sistema ME-LGI-S

### 3.2. Sistema de suministro de combustible gaseoso licuado (LFSS)

El motor consume LPG, metanol o DME en función de la temperatura a una presión de suministro predeterminada y con un flujo que varía según la carga del motor. El LFSS debe suministrar este combustible al motor cumpliendo todos los requisitos de temperatura, flujo, presión y capacidad de adaptación a incrementos de carga.

Para esta tarea se puede elegir un sistema con un diseño diferente. La solución de circulación siguiente se describe solo a modo de ejemplo.

El LFSS aplica el mismo principio que un sistema ordinario de suministro de fueloil líquido. El LPG, metanol o DME se obtiene de un depósito de servicio que contiene combustible gaseoso licuado y se impulsa a una presión cercana a la de suministro. A continuación, el

combustible gaseoso circula mediante la bomba circuladora, y se eleva la presión hasta el valor de suministro al motor específico del LPG, metanol o DME, según corresponda. La presión de suministro debe ser la adecuada para que el combustible gaseoso licuado se mantenga en fase líquida y no se produzca cavitación a las temperaturas a las que se somete el combustible gaseoso licuado hasta que se inyecta en la FBIV.

El flujo del fueloil líquido en el circuito de circulación debe ser en todo momento mayor que el consumo de fueloil líquido del motor. El factor de circulación típico es de 2 a 3 veces el consumo de combustible líquido. Para garantizar el suministro de combustible líquido a la temperatura adecuada, se monta un calentador/refrigerador en el circuito de circulación. Se recomienda conectarlo al sistema de refrigeración de baja temperatura (LT) mediante un circuito de refrigeración secundario.

### **3.3. Distribución de combustible de bajo punto de inflamabilidad (LFFVT)**

La distribución LFFVT conecta el LFSS con el motor a través de una válvula maestra de combustible (MFV) con disposición en doble bloqueo y purga. La distribución está conectada asimismo a una fuente de nitrógeno que se emplea para la purga.

La LFFVT se suele situar fuera del vano motor para evitar la necesidad de instalar protecciones de seguridad dobles. Desde la LFFVT, el combustible se suministra al motor mediante una tubería de doble pared ventilada a través de la sala de máquinas.

### **3.4. Sistema de retorno de purga (PRS)**

Como se ha mencionado anteriormente, el concepto ME-LGI-S implica la entrada de LPG, metanol o DME en el motor en sí. Debido al bajo punto de inflamabilidad, en determinadas circunstancias será preciso vaciar la tubería de combustible gaseoso licuado y purgarla con nitrógeno. En el caso del ME-LGI-S, es preciso que la tubería de combustible gaseoso licuado en el motor y en la sala de máquinas se instale con un recorrido que permita purgarla y recircular el gas al depósito de servicio de combustible gaseoso. Una vez que el LPG, metanol o DME se haya devuelto al depósito de servicio, se realizará la purga completa con nitrógeno a través del sistema de tubería de doble pared.

### **3.5. Tareas de mantenimiento**

#### **3.5.1. Mantenimiento de motores ME-GI-S o ME-LGI-S**

Para satisfacer los requisitos de funcionamiento de la planta generadora es esencial contar con una planificación adecuada del mantenimiento. Por otro lado, con los componentes de los motores ME-GI-S y ME-LGI-S las tareas de manipulación y mantenimiento son procesos sencillos para el experimentado equipo de operarios, siempre que las tareas de mantenimiento se planeen, preparen y controlen como es debido. En general, los gestores y el equipo de operarios deben ser profesionales con la debida formación, destreza y dedicación. MAN Diesel & Turbo dispone de programas de formación con los que los ingenieros jefe podrán ponerse al día acerca de las últimas novedades en mantenimiento y tecnología. Pueden enviarse solicitudes de programas de formación a MAN Diesel & Turbo en Copenhague.

### **3.6. Tareas de mantenimiento en la planta generadora**

Cuando un motor ME-GI-S se detiene, es preciso purgar las tuberías de gas a alta presión con nitrógeno para garantizar que no quede gas en el motor de modo que sea posible acometer las tareas de mantenimiento necesarias.

En el caso de un motor ME-LGI-S, si se sabe que el funcionamiento con combustible gaseoso licuado se va a detener temporalmente por ejemplo, durante tareas menores de mantenimiento en la planta generadora, es preciso realizar el procedimiento de cambio al modo de espera de combustible gaseoso. No obstante, el LFSS se apaga una vez completado el procedimiento. Se desaconseja realizar en este modo trabajos importantes de servicio en los que sea preciso levantar maquinaria sobre las líneas de suministro. El motivo es que es probable que las líneas de suministro de combustible gaseoso licuado en la sala de máquinas y en el propio motor contengan una cierta cantidad de LPG o metanol.

En caso de que se detenga por completo el sistema de combustible gaseoso licuado por ejemplo, para realizar tareas de mantenimiento importantes en la planta de generación es preciso vaciar el LPG o metanol de todas las tuberías del LFSS para que sea posible apagar seguidamente la ventilación.

### 3.7. Reconversión

Los motores controlados electrónicamente de MAN que funcionen con fueloil/biocombustible se pueden adaptar de modo que puedan utilizar combustible dual, ya sea ME-GI-S o ME-LGI-S. Este reacondicionamiento afectará a los componentes del motor mostrados en la figura 3.7.1 y será preciso instalar un suministro de combustible gaseoso adecuado. Es importante destacar que las solicitudes de soluciones de reacondicionamiento deben remitirse al fabricante para cada caso en particular.

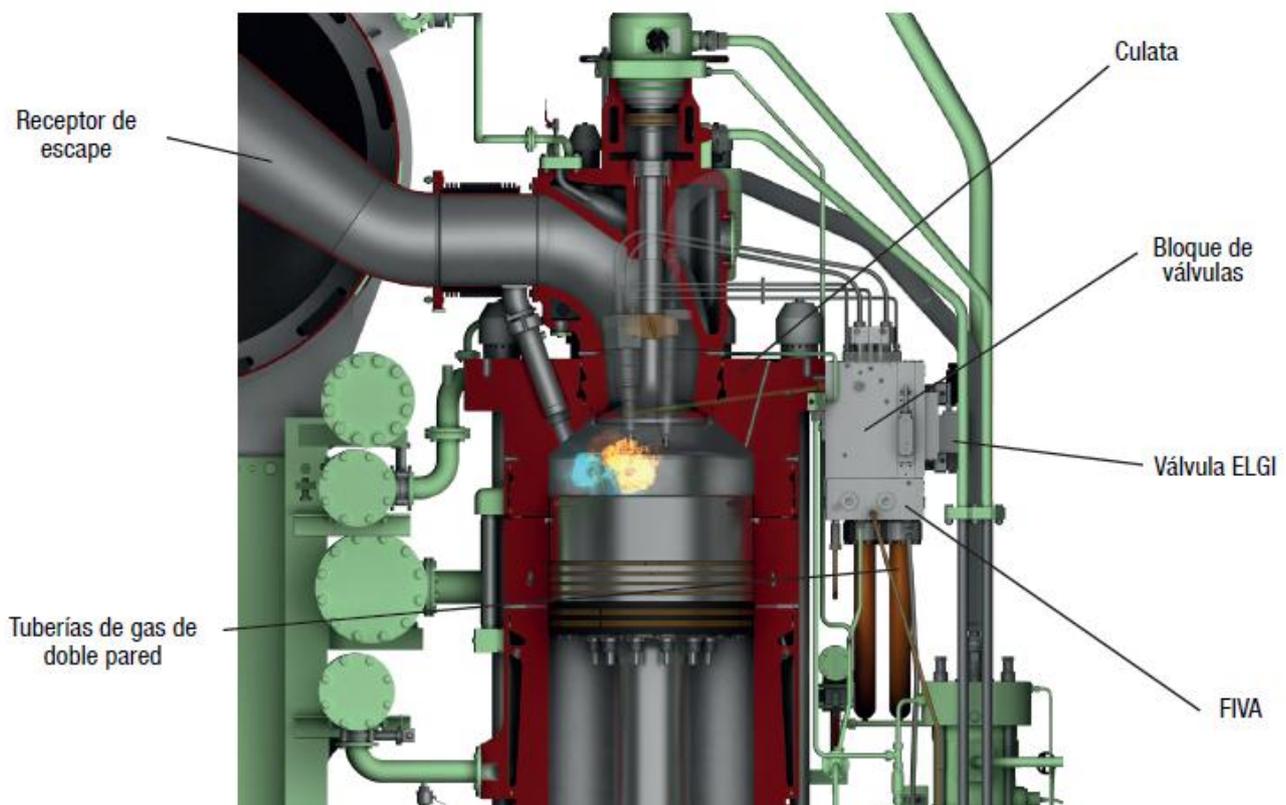


Figura 3.7.1: Zonas afectadas en caso de reconversión

---

## **4. SISTEMAS DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE GASEOSO (FGSS)**

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

#### 4. SISTEMAS DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE GASEOSO (FGSS)

Los diferentes sistemas de suministro gaseoso están basados en la figura 2.3.3. Los sistemas de suministro gaseoso no solo podrán ser instalados en buques LNG sino que también serán viables para buques LPG, buques tanque, portacontenedores y toda clase de buques.

Para buques LNG el suministro de gas natural será mucho más sencillo ya que se dispone de él a bordo en los tanques de carga.

Existen diferentes fabricantes, que en colaboración con MAN Diesel & Turbo, desarrollaron y patentaron sus propios diseños. Básicamente existen dos soluciones para suministrar el gas combustible hacia nuestro motor dual, una de ellas es aspirar con compresores de pistón el BOG formado en la parte alta del tanque y así abastecer al motor ME-GI con gas combustible a alta presión, la otra solución es impulsar el gas licuado de la parte inferior del tanque a través de bombas de alta presión. Estas soluciones vienen ilustradas en las figuras 4.1 y 4.2 respectivamente.

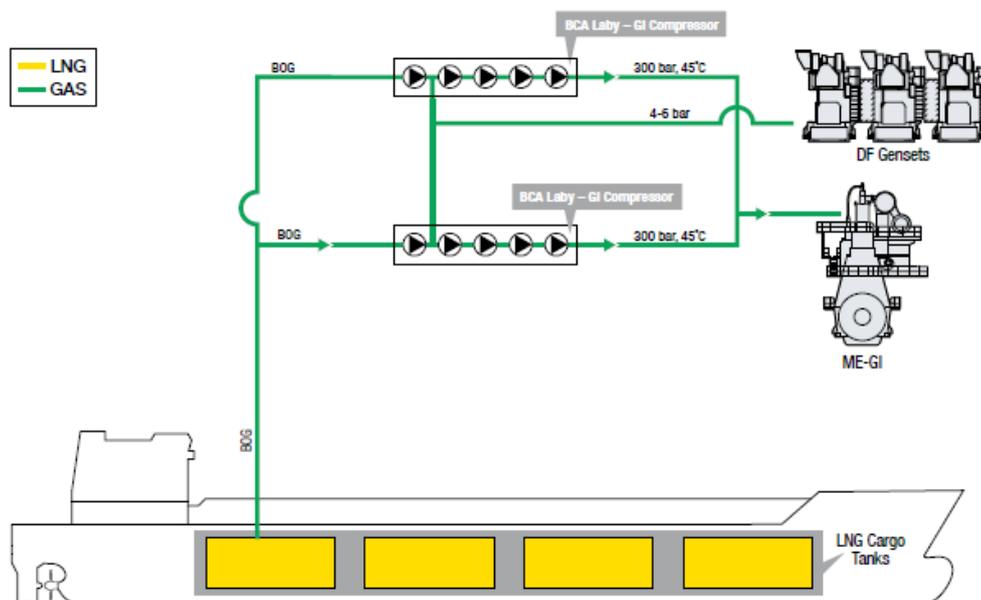


Figura 4.1: Motor ME-GI con bomba LNG como sistema de suministro de gas (planta de relicuefacción no mostrada)

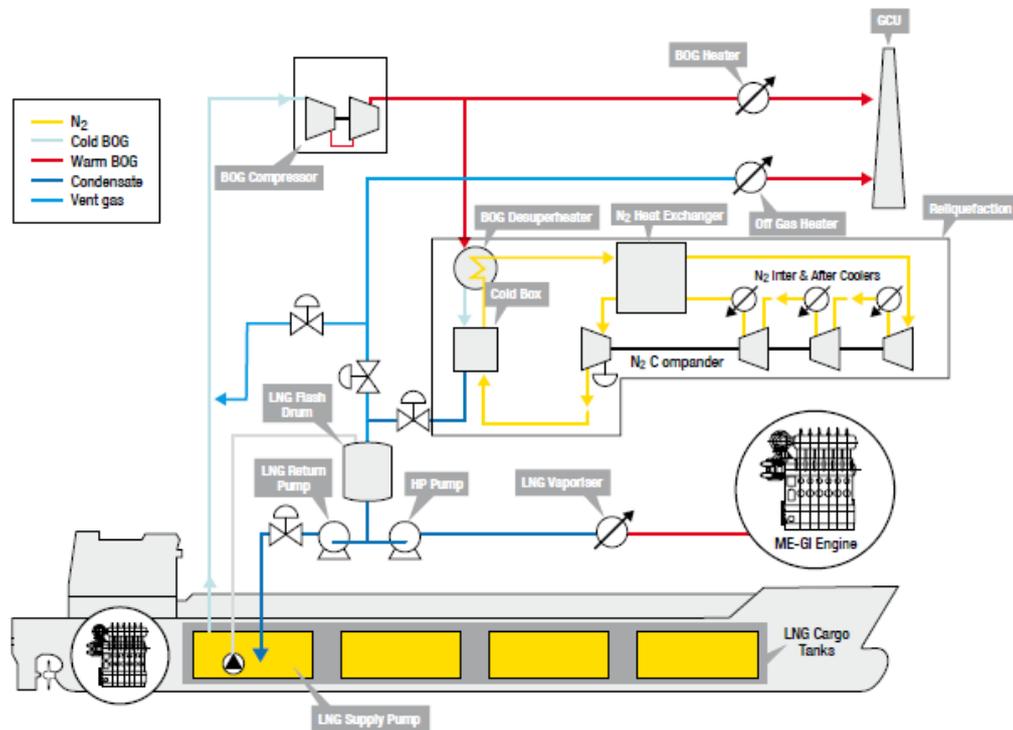


Figura 4.2: Componentes a ser modificados: motor ME-GI frente motor ME

En este apartado se describen las diferentes configuraciones ofrecidas por los diferentes fabricantes basados en los sistemas de tipo compresor o tipo bomba.

Los sistemas tipo compresor están basados en el compresor de Laby®-GI. Se trata de un compresor de 5 estados que aspira el BOG a  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 50 bares y lo descarga a 300 bares, se trata de compresores de elevado consumo. Estos compresores cuentan con balancines especiales para evitar las vibraciones.

Para los sistemas tipo bomba tenemos 6 fabricantes distintos: Cryostar™, DSME, Hamworthy™, TGE, MHI y HHI, pero todos se basan en los mismo: tanque LNG, bomba de alta presión para alcanzar los 300 bares y un sistema vaporizador para calentar el gas a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  para así ser inyectado en el motor.

#### **4.1. Sistema de suministro de gas por Cryostar™**

Cryostar™ realizó estudios basados en los buques Q-Max. Resultó que los motores MAN ME-GI resultaron más eficientes que el sistema DFDE (Dual Fuel Diesel Electric) y turbinas de vapor como sistema de propulsión.

Se llegó a la conclusión de que para un suministro de gas a 300 bar un compresor centrífugo no resultaría económico por lo tanto la solución que nos ofrece este fabricante es de combinar una bomba HP para gas licuado alimentada por una planta de relicuefacción regresando condensado a los tanques de LNG.

##### **4.1.1. Planta de relicuefacción de EcoReL™**

Basada en un ciclo Brayton inverso, consiste en una planta de licuefacción que utiliza un ciclo con Nitrógeno como refrigerante y un compander como elemento principal.

Esta unidad comprende tres etapas de compresión y una de expansión dentro del ciclo del Nitrógeno y es la unidad que más energía eléctrica consume de la planta.

En total puede consumir 2.500 kW por lo que es una unidad grande y que necesita refrigeración entre etapas. El compander es una única unidad cuya tercera etapa de compresión está unida al engranaje del compresor principal y ayudado por la turbina de expansión, lo que le hace un compresor robusto e integrado. Como consecuencia de la unión, la turbina actúa como freno, y las etapas de compresión son así accionadas por un único motor eléctrico y por el trabajo de la turbina de expansión.

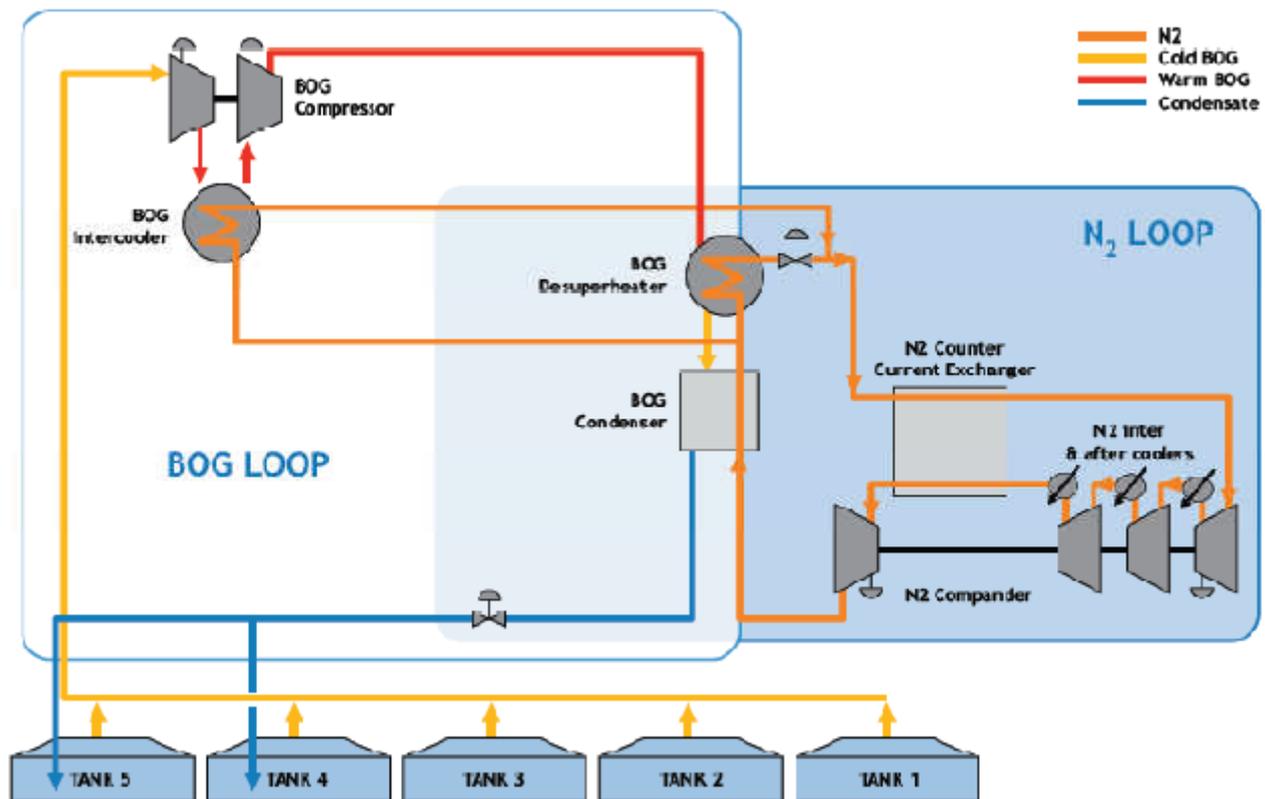


Figura 4.1.1.1: Diagrama simplificado de fluidos para una planta de relicuefacción EcoRel™

El BOG es comprimido en dos etapas integradas, en este caso con refrigeración intermedia mediante un reciclo de nitrógeno procedente del principal intercambiador, para mejorar la eficiencia global. El comprimido se refrigera posteriormente en un intercambiador de acero inoxidable carcasa y tubo y luego se condensa en el intercambiador criogénico. Así, este primer intercambiador de acero inoxidable puede soportar los posibles cambios de temperatura, mientras el otro más sensible queda supeditado a la temperatura de salida del anterior.

En el proceso los intercambiadores se encuentran individualmente aislados térmicamente. El nitrógeno que proviene de los intercambios con el BOG se introduce en otro intercambiador a contracorriente de nitrógeno de alta presión, para disminuir la temperatura de este último.

El sistema permite el sub-enfriado ligeramente por lo que puede ser retornado a los tanques directamente de vuelta, sin requerir separador. Para cargas con mayor contenido en nitrógeno en el gas natural, el sistema separa parte para la planta, y la mezcla de fases que proviene del condensador se dirige hacia un separador para dirigir el vapor rico en nitrógeno a la CGU.

#### 4.1.2. Bomba HP y sistema vaporizador

La bomba de alta presión (fig. 4.1.1.2.1) se basa en un diseño compacto montado sobre una bancada con patines y puede ser accionada tanto por un sistema de engranajes o correa. Gracias a un sistema de leva y rodillos de baja fricción se consigue el movimiento alternativo de varios émbolos que bombean el fluido criogénico hasta esas altas presiones (presiones por encima de 400 bares).

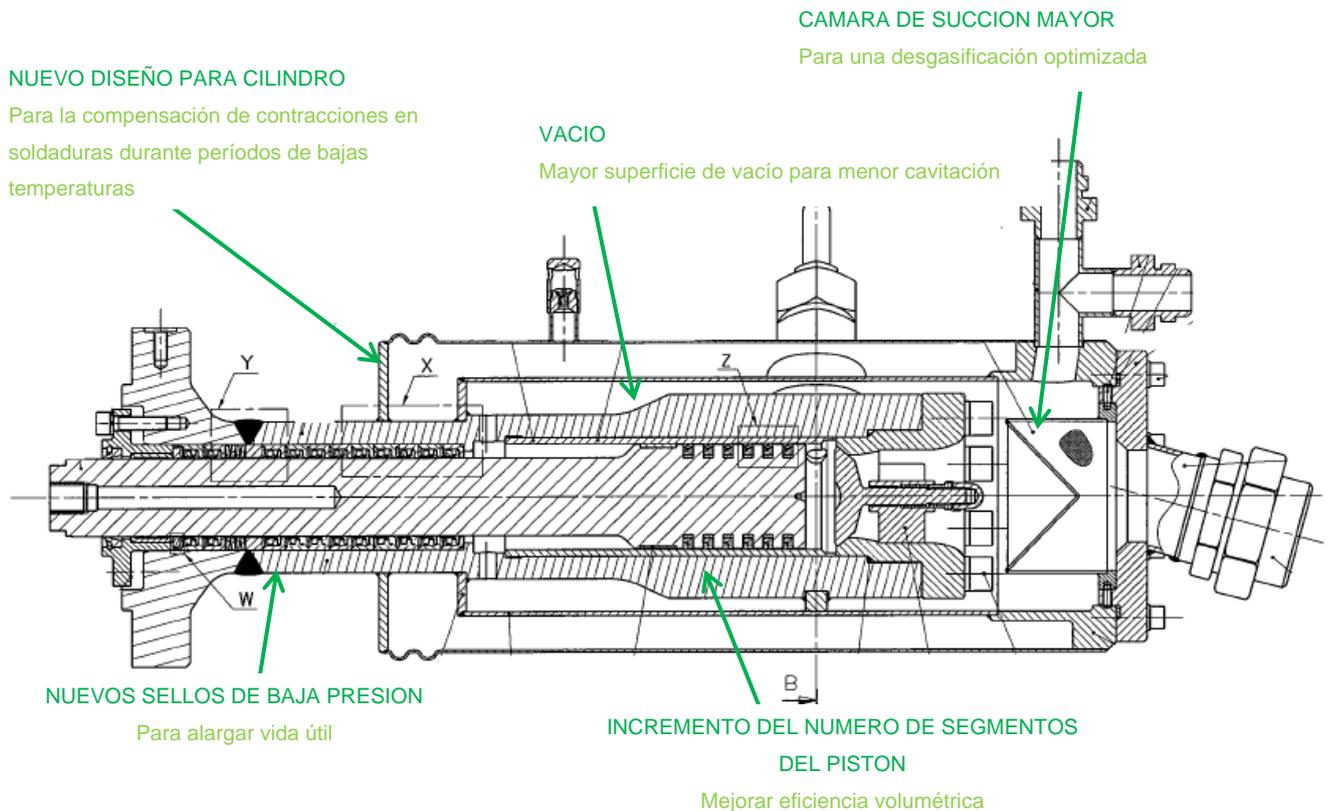


Figura 4.1.2.1: Bomba HP

El diseño de la bomba incorpora una cámara de vacío para aislar el líquido bombeado del ambiente y evitar que la posible gasificación descebe la bomba .Las bombas HP de la planta de relicuefacción constan, además, de un sistema de la regulación de la velocidad de giro para adaptarse a la variación de consumo del motor de propulsión. En la descarga de estas bombas se instalan amortiguadores de pulsaciones para mantener el flujo uniforme. Para regular la presión de alimentación de combustible del motor independiente de las variaciones de caudal se utiliza un lazo de control cerrado.

#### **4.1.3. Ventajas del sistema**

A continuación se citan casos particulares donde la bomba HP y la planta de licuefacción de EcoRel™ ofrecen importantes beneficios gracias a su capacidad para manejar adecuadamente el excedente de BOG sin quemar en la GCU.

- Los buques susceptibles de ser cargados e inactivos durante un periodo de tiempo como por ejemplo la espera previa al canal de Suez
- Largos periodos de operación a baja velocidad
- Largas rutas comerciales, donde la entrega de la carga es de suma importancia
- BOG o combustible líquido se pueden utilizar siempre que sea económicamente ventajoso
- El consumo de energía térmica es menos utilizando el sistema de bomba HP en combinación con la planta de licuefacción
- El sistema ofrece amplia flexibilidad de combustible al poder utilizar el combustible más barato disponible

#### 4.1.4. Configuración general del buque

El típico buque LNG con propulsión ME-GI podrá ser dotado de planta de licuefacción para:

- Controlar la presión de los tanques durante los viajes
- Enfriamiento de los tanques y las líneas antes de la carga (el retorno, condensado, líquido está más frío que el vapor y, por otro lado, la aspiración de vapor del tanque reduce la presión en el mismo por debajo de la presión de vapor saturado del líquido y, como resultado de ello, el líquido entra en ebullición a fin de reemplazar al vapor aspirado; el calor latente de vaporización es cedido por la masa de líquido y éste se enfría.

El líquido condensado aparece como subproducto de la planta de relicuefacción, este líquido condensado puede ser retornado al tanque o ser consumido en estado gas, para ello se le aumentará la presión considerablemente y la temperatura será controlada dentro de un rango determinado.

La figura 4.1.1.5.1 muestra un esquema básico de los equipos que forman una planta de relicuefacción junto con el sistema de bomba criogénica de alta presión. Resulta más eficiente aumentar la presión del fluido usando una bomba de desplazamiento positivo en vez de comprimir el gas con un compresor de varias etapas, Cryostar™ opta por utilizar una bomba de alta presión seguida de un sistema vaporizador para convertir el líquido en un fluido supercrítico (mezcla de vapor y líquido) adecuado para la inyección en la máquina.

Este sistema de compresión de líquido mas sistema vaporizador lleva usándose durante décadas en el sector industrial del gas, las botellas de oxígeno para oxicorte están basadas en este método.

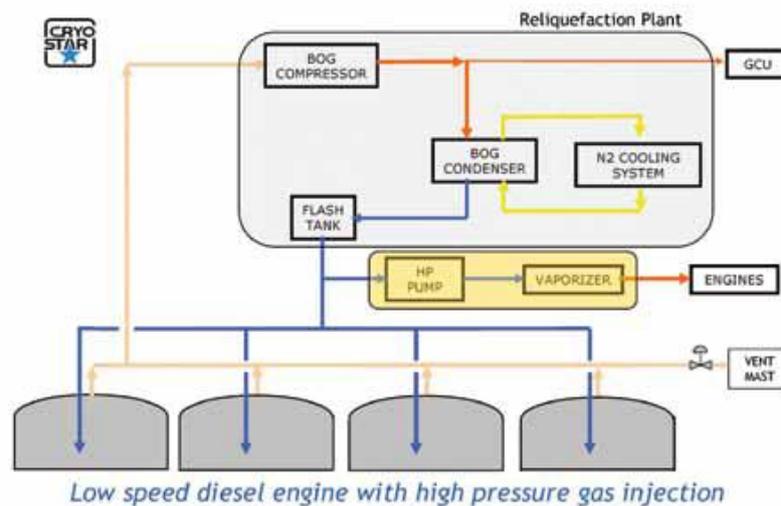


Figura 4.1.1.5.1: Planta de licuefacción combinada con sistema bomba HP para entrega de combustible gaseoso a alta presión a un motor ME-GI

#### 4.2. Sistema de relicuefacción BOG por Hamworthy™

Se trata de la planta de relicuefacción Mark III donde el BOG es evacuado de los tanques de LNG por un compresor centrífugo de tres estados con enfriamiento después de cada estado por intercambiadores de agua, ver figura 4.2.1.

Para permitir la evacuación de calor por intercambiadores de calor de carcasa y tubo, parte de la corriente de alta presión de nitrógeno calienta la entrada de BOG al compresor.

El vapor se enfría alrededor de los  $-160\text{ °C}$  en un intercambiador de calor criogénico de placas y aletas, ello asegura que los hidrocarburos contenidos en el LNG se condensen.

El gas de nitrógeno se comprime en un compander formado por tres compresores centrífugos y una turbina unida al engranaje del compresor principal. Después del post-enfriamiento de la tercera etapa el flujo de nitrógeno se bifurca en dos ramales, uno de ellos va hacia el precalentador y el otro hacia zona 'caliente' del intercambiador de calor criogénico. Después de calentar el BOG ambas corrientes se mezclan de nuevo y son introducidas en el intercambiador de calor criogénico o 'cold box'. En el intercambiador de calor criogénico el nitrógeno se pre enfría y se expande aproximadamente a la presión de succión del compresor. El gas sale de la turbina a una temperatura inferior a  $-160\text{ °C}$  y regresa a la zona 'fría' del intercambiador de calor criogénico.

El nitrógeno frío continúa por la zona 'caliente' del intercambiador de calor criogénico.

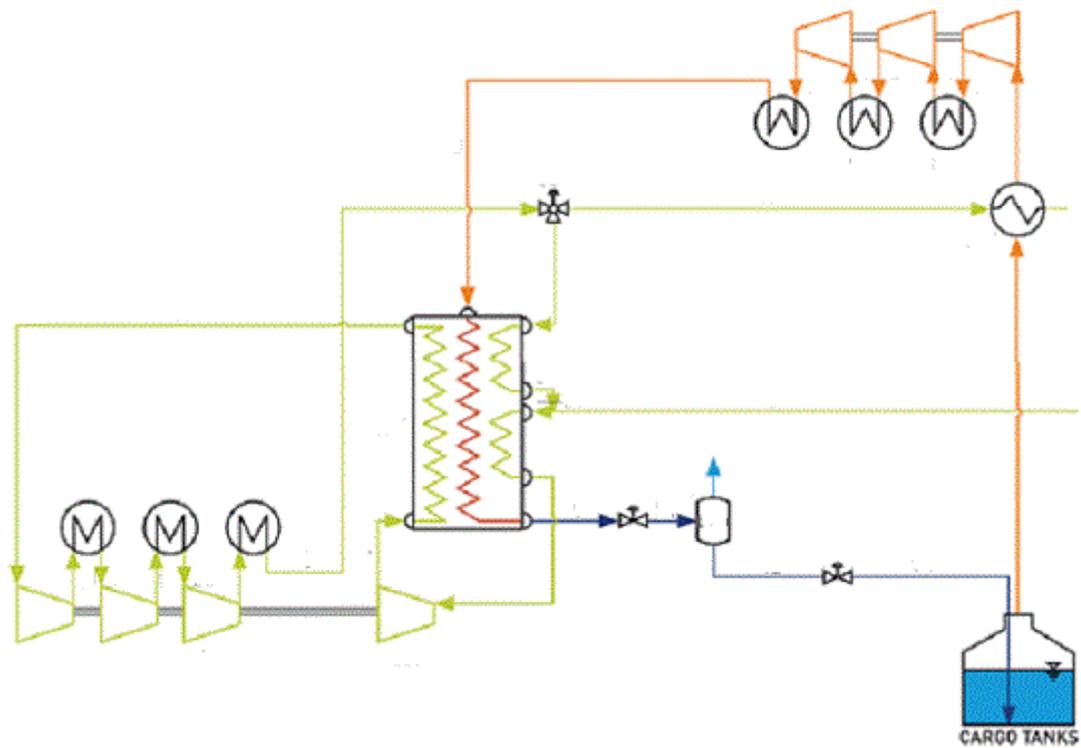


Figura 4.2.1: Diagrama básico sistema de relicuefacción Mark III

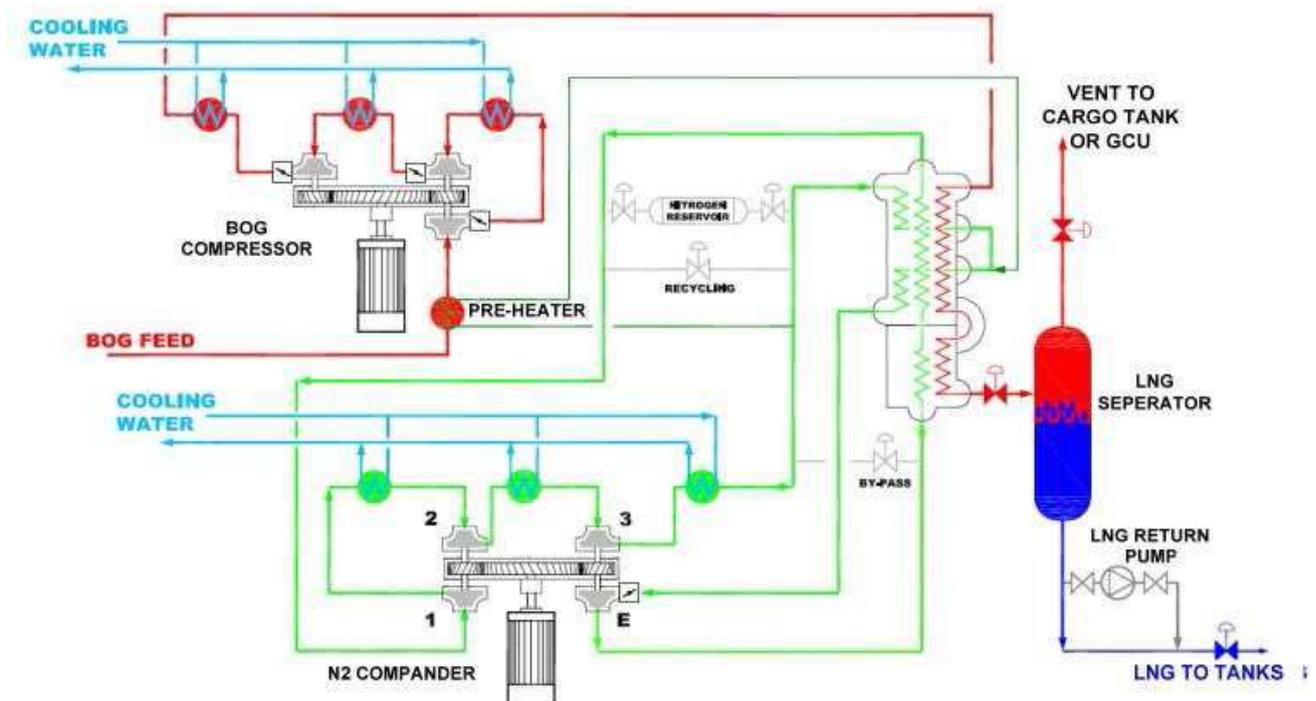


Figura 4.2.2: Diagrama básico del ciclo Mark III

#### 4.2.1. Sistema con bomba HP de Hamworthy™

El condensado de la planta de relicuefacción de BOG o el LNG de las cisternas del buque que se suministra gracias a las bombas del buque se conduce hasta una bomba de alta presión (HP) para alimentar el evaporador. El LNG que normalmente está a una presión mayor que la presión supercrítica se calienta en un intercambiador de calor hasta que sea 'gas'. A continuación el gas a alta presión se introduce en los motores de propulsión.

La presión de descarga de la bomba de alta presión es de 300 bares al 100 % de la carga. El LNG a alta presión es un fluido supercrítico y no resulta posible distinguir entre la fase líquida y la fase gaseosa. Sin embargo, el LNG cuando se calienta a alta presión hasta la temperatura ambiente se evapora.

El sistema está basado en la evaporación de LNG a alta presión gracias a una fuente de calor. Para no usar el agua de camisas del motor o vapor desde la sala de máquinas directamente hasta el intercambiador de calor de LNG, se utiliza un ciclo cerrado con una fuente de calor para calentar el LNG.

Las fuentes de calor pueden estar formadas por una mezcla de salmuera, una mezcla de glicol, una mezcla de hidrocarburos o un refrigerante y se llamará "salmuera" en lo que sigue. El ciclo cerrado comprende un evaporador, la bomba de salmuera y una fuente de calor que denominamos vaporizador. Esto evita el riesgo de que aparezca LNG en la cámara de máquinas en caso de que haya una fuga en el vaporizador.

El evaporador y su bucle cerrado se pueden instalar en la sala de compresores (CCR) del buque junto con la planta de relicuefacción de gas en un lugar aparte o en la sala de motores.

El LNG a  $-160^{\circ}\text{C}$  y aproximadamente a 2-5 bares se presuriza en una bomba de pistón criogénica (bomba HP) hasta 300 bares. A continuación, el LNG se evapora y se calienta hasta los  $45^{\circ}\text{C}$  en el evaporador. Si es necesario se instalará un amortiguador en la lumbrera de salida de la bomba y/o del evaporador (ver figura 4.2.1.1).

Al ser calentado el LNG en el evaporador va ganando temperatura y 'perdiendo frío' mientras se calienta a las exigencias del motor. Esta 'pérdida de frío' no se aprovecha, debido a esto Hamworthy™ optimizó el procedimiento completo con una planta de relicuefacción y un FGSS para reducir el consumo de potencia total.

La idea es utilizar la 'perdida de frío' antes de que el LNG alcance el evaporador y usarla para enfriar el sistema de relicuefacción de BOG. Este intercambiador de calor o economizador trabaja en paralelo con la 'caja fría'.

Parte del nitrógeno del ciclo del nitrógeno y en condiciones ambientales se enfría por intercambio de temperatura con el LNG presurizado.

La corriente de nitrógeno se enfría a aproximadamente la temperatura de entrada en la turbina y es mezclada con nitrógeno en el intercambiador de calor criogénico o 'caja fría'.

El optimizador solo puede operar cuando la planta está trabajando y el motor está funcionando en modo gas. Si la planta para o el optimizador no está calentando el suficiente LNG, el independiente sistema vaporizador se encargará de calentar gas suficiente antes de entrar en el motor. Instalar el FGSS en la sala de compresores de carga junto con una planta de relicuefacción hace de esta una instalación muy competitiva (figura 4.2.1.2).

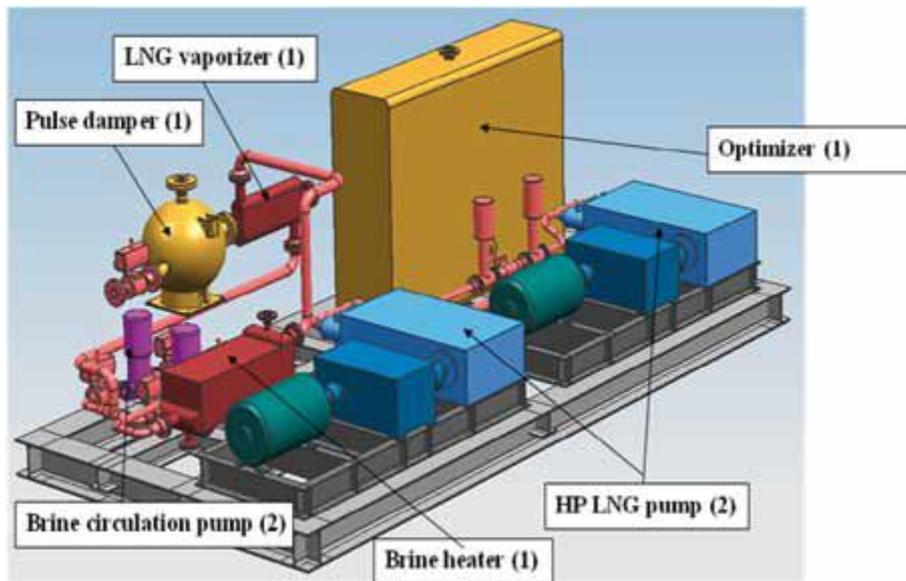


Figura 4.2.1.1: FGSS de alta presión de Hamworthy™, incluyendo dos bombas LNG y evaporador.

Tamaño: 7 x 3 x 2m

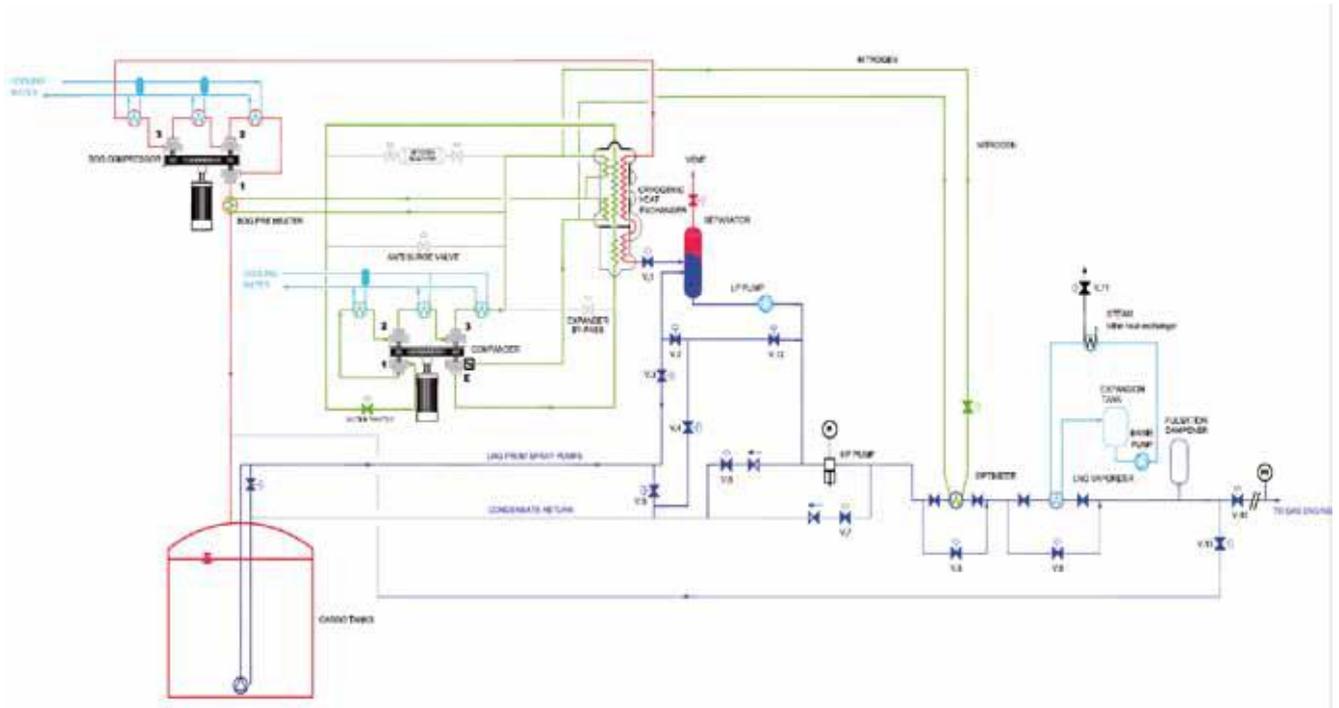


Figura 4.2.1.2: Diagrama de planta de relicuefacción con FGSS para motores ME-GI de Hamworthy™

### 4.3. Compresor Laby-GI de Burckhardt Compression

El sistema de suministro de gas (FGSS) a motores de propulsión de combustible dual tipo ME-GI utiliza un compresor para aspirar los vapores de BOG que se generan en los tanques de almacenamiento.

El componente clave del FGSS es el compresor Laby®-GI de Burckhardt Compression.

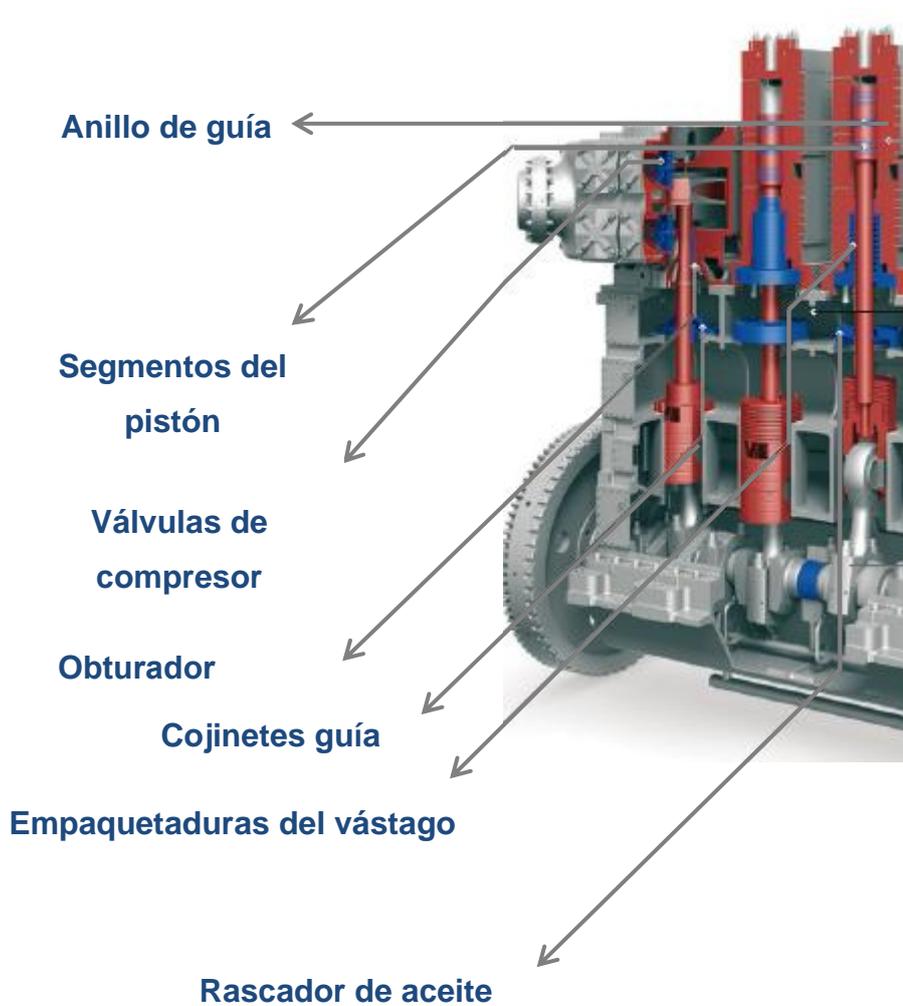
#### 4.3.1. Diseño

Existen varios diseños, para nuestro concepto utilizaremos dos compresores de gas, cada uno de ellos será capaz de manejar el 100 % de los vapores de gas natural de tal modo que cada uno de los motores duales consumirá el 50 % del gas proporcionado por el compresor que esté operativo, el otro podrá arrancarse manualmente en caso de fallo.

Un sistema de suministro gaseoso está influenciado por muchos parámetros, uno de ellos es la cantidad de BOG que dependerá de la etapa en la que se encuentre el buque (carga o viaje en lastre) y del nivel de presión del tanque.

Otros factores son el tipo de composición del gas, 'boil-off' forzado o natural, (fBOG o nBOG), la entrega de baja presión del gas a la GCU, grupos electrógenos duales y muchos más.

### 4.3.2. Componentes clave del compresor Laby®-GI



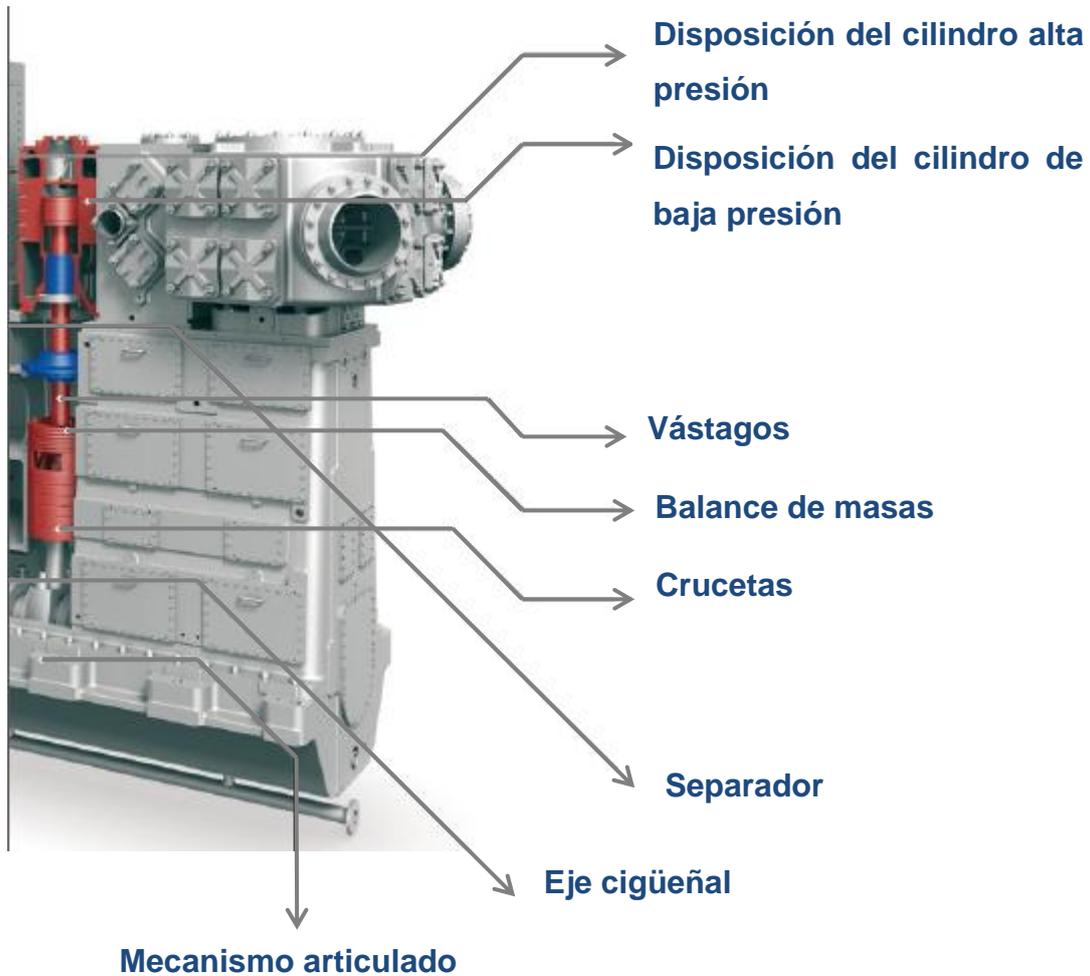


Figura 4.3.2.1: Componentes clave de un compresor Laby®-GI

### 4.3.3. Características principales

- Sistema de sello laberíntico en pistón y sello en vástago
- Sección de cilindros no lubricada. No necesita aceite, no hay contaminación del gas y por esta razón el gas contaminado no puede dañar el funcionamiento del compresor.
- Disposición vertical del vástago conductor del pistón
- Sistema conductor del pistón lubricado para alineamiento preciso y vida útil
- Válvulas del compresor de máxima calidad para alta fiabilidad

#### 4.3.4. Disposición de los compresores de gas

Después de cada etapa de compresión existe un enfriamiento para controlar totalmente la temperatura de entrada de la etapa posterior. En la figura 4.3.4.1 podemos observar un diagrama DTI simplificado del compresor.

Existen válvulas 'by-pass' en la primera etapa de compresión, desde la segunda etapa a la tercera y desde la cuarta a la quinta. Estas válvulas regulan el flujo del compresor en función de la presión requerida por el motor dentro de los límites definidos por el sistema. La idea es evitar el venteo a la atmósfera del BOG, cualquier BOG que se encuentre en el compresor puede ser retornado a los tanques de almacenamiento.

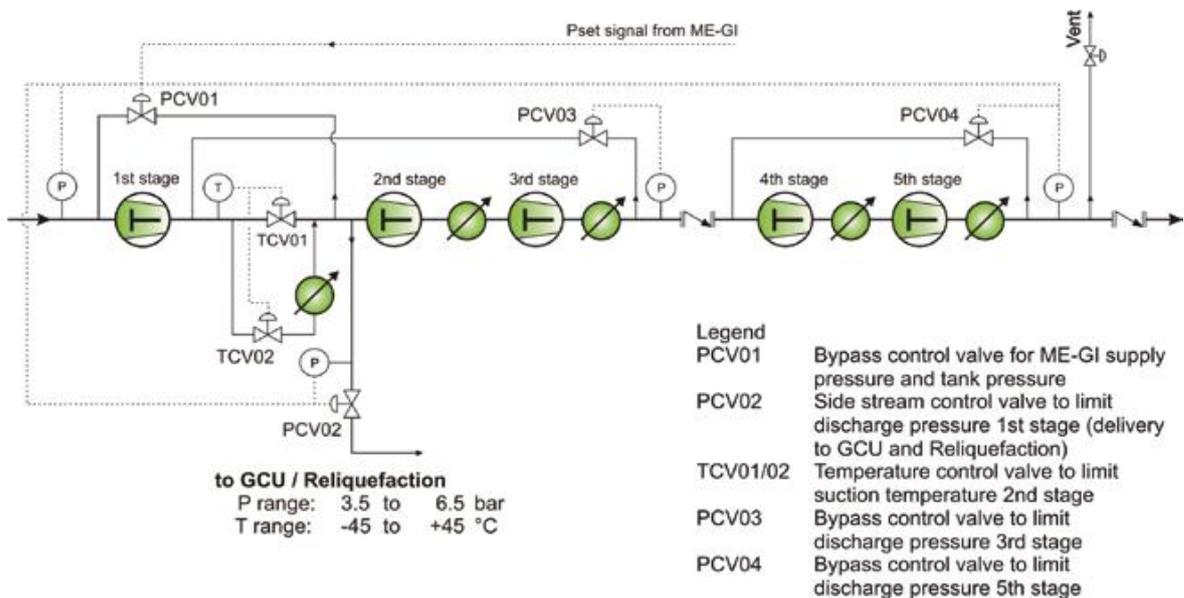


Figura 4.3.4.1: Diagrama DTI de un compresor de gas Laby®-GI

#### **4.3.5. Seguridad del compresor**

Las válvulas de seguridad están situadas a la descarga de cada etapa de compresión para proteger a los cilindros y al sistema de gas de sobrepresiones.

La función de las válvulas de alivio de presión, en su caso, es prevenir el exceso de carga.

La instrumentación para la presión y la temperatura en cada etapa aseguran un adecuado control de alarmas y cierre del sistema.

Los elementos de emergencia permiten hacer una parada segura, aislamiento y ventilación de la instalación de gas del compresor.

#### **4.3.6. Sistema de control del sistema de combustible gaseoso**

La función primordial del sistema es asegurar presión de descarga disponible para la demanda de los motores principales.

También se encarga de que la presión en los tanques sea adecuada, proporcionar suficiente BOG dependiendo de la fase en la que se encuentre el buque (carga o viaje en lastre) o el control para una adecuada temperatura de succión del compresor.

En el caso de que el la cantidad de nBOG descienda, el compresor pasará a trabajar con carga parcial para mantener una presión estable en tanques o fBOG será añadido al sistema de suministro.

Si el nBOG aumenta la presión en tanques también aumentará, en este caso el sistema de control enviará el exceso de gas a la GCU. El sistema de control es capaz de cambiar el modo de operación de los motores principales ya que será el encargado de proporcionar la presión de entrega (150-300 bares dependiendo de la carga).

#### 4.3.7. Modo de ahorro de energía

Para una regulación eficiente de un compresor multi-etapas resulta interesante recircular el gas por la primera etapa de compresión, la presión del motor se toma directamente de la válvula 'by-pass' de la primera etapa del compresor que se abrirá o cerrará hasta que la presión de descarga del mismo sea igual a aquella.

El control para la entrega de BOG al motor ME-GI se regula sin ninguna medición directa, el controlador es capaz de regular el fluido másico en el rango del 0 al 100 %. Ver figura 4.3.7.1.

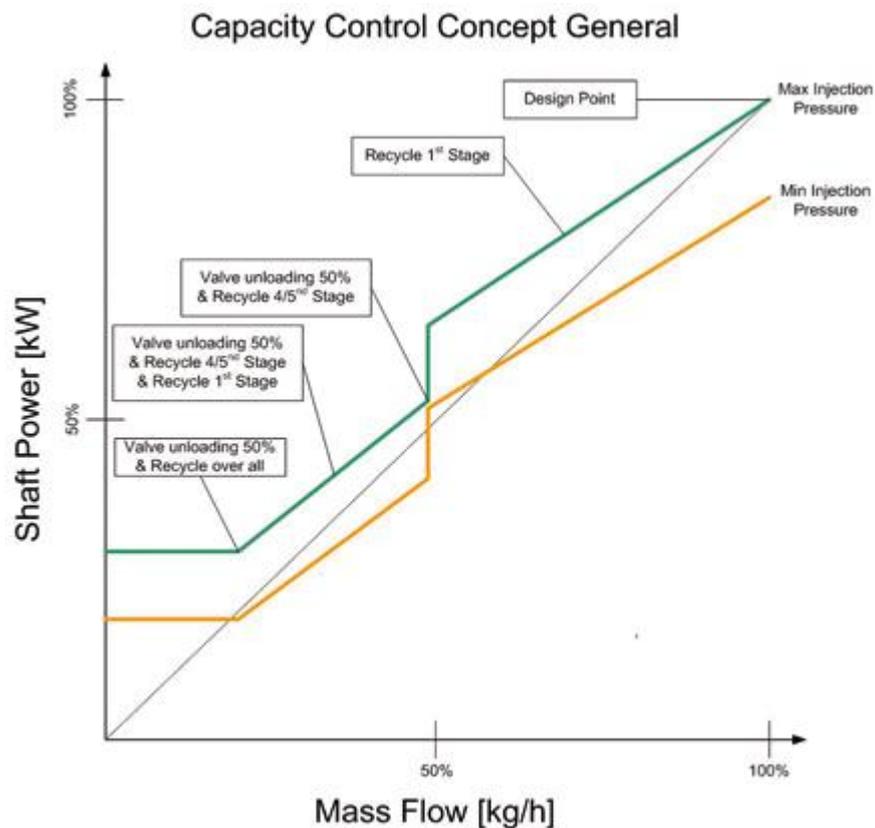


Figura 4.3.7.1: Control de capacidad por el compresor Laby®-GI

#### 4.3.8. HGS Laby®-GI

Se trata de una integración del compresor Laby®-GI en una planta de relicuefacción Mark III donde este compresor sustituye al compresor estándar.

Después de la primera o segunda etapa de compresión el gas se puede recircular parcialmente o completamente al sistema de relicuefacción.

Cuando el motor ME-GI está operando en modo gas, el BOG se envía directamente desde el compresor al motor.

Este 'by-pass' se utiliza en condiciones de lastre y para cuando hay demasiado poco BOG para alimentar el motor dual. Ver figura 4.3.8.1.

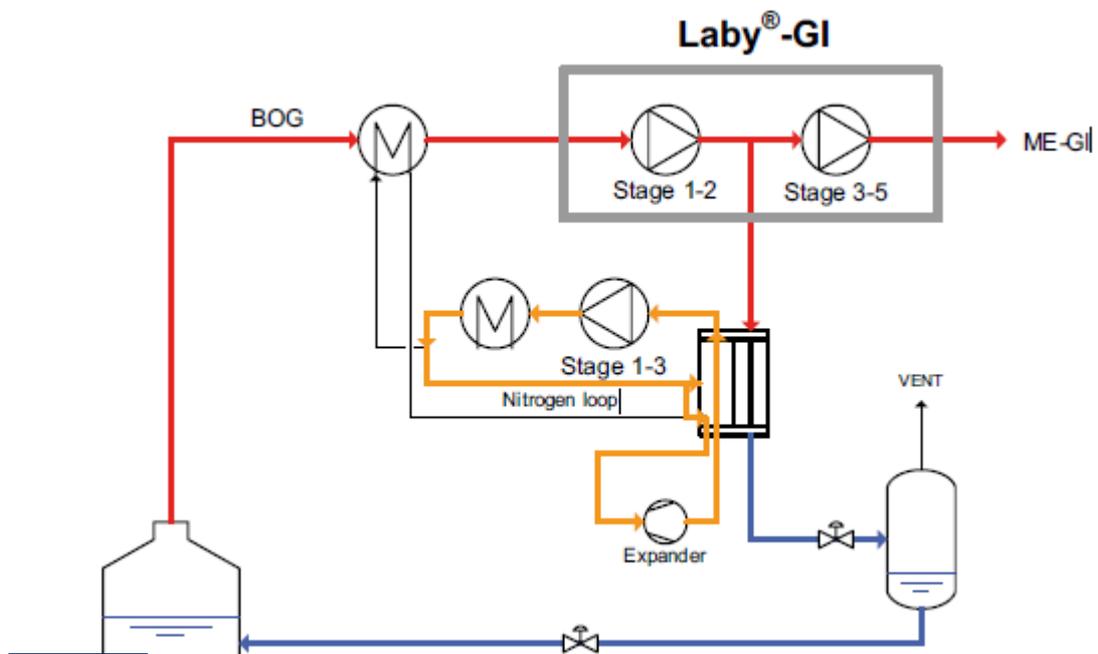


Figura 4.3.8.1: Compresor Laby®-GI integrado a planta de relicuefacción Mark III

#### 4.4. TGE Laby®-GI

Esta planta tiene la característica especial de que no usa el ciclo Brayton, sino un proceso en cascada con etileno de mayor eficiencia termodinámica.

En la figura 4.4.1 se muestra una comparación entre las plantas que utilizan una relicuefacción completa con sistema bomba HP, relicuefacción del exceso de gas con un ciclo de nitrógeno y relicuefacción con la tecnología del sistema en cascada.

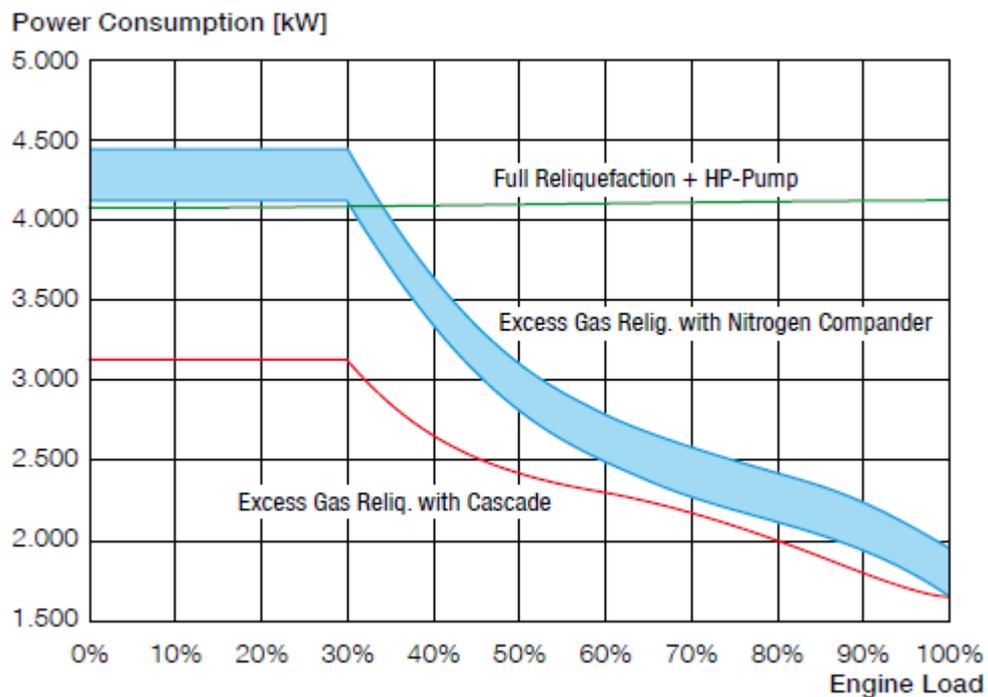


Figura 4.4.1: Comparación de los consumos entre diferentes sistemas de planta de relicuefacción

La planta, al igual que HGS Laby®-GI, está diseñada con la intención de usar un motor de combustión dual y utiliza un compresor distinto especialmente diseñado. Parte del BOG se redirige a la sala de máquinas sin pasar por la planta de relicuefacción.

Para visualizar el proceso y el diagrama del flujo podemos utilizar la figura 4.4.2.

El funcionamiento del ciclo en cascada es simple. El propileno se comprime en un compresor de tornillo independiente, se refrigera con agua de mar hasta los 40 °C, y posteriormente se expande hasta que se licua. Después se introduce en el intercambiador para refrigerar la corriente de etileno de alta presión procedente del compresor Laby®-GI hasta los -30 °C. Una vez el etileno ha alcanzado esa temperatura se introduce en el separador para mezclarse con el de más baja presión. Mientras, el BOG es dirigido hacia el compresor Laby®-GI hasta comprimirse en tres etapas refrigeradas. El etileno licuado procedente del separador puede refrigerar el BOG hasta condensarlo a -100 °C y 4.5 bares. El BOG baja la presión mediante válvulas hasta licuarse y un separador G/L lo separa.

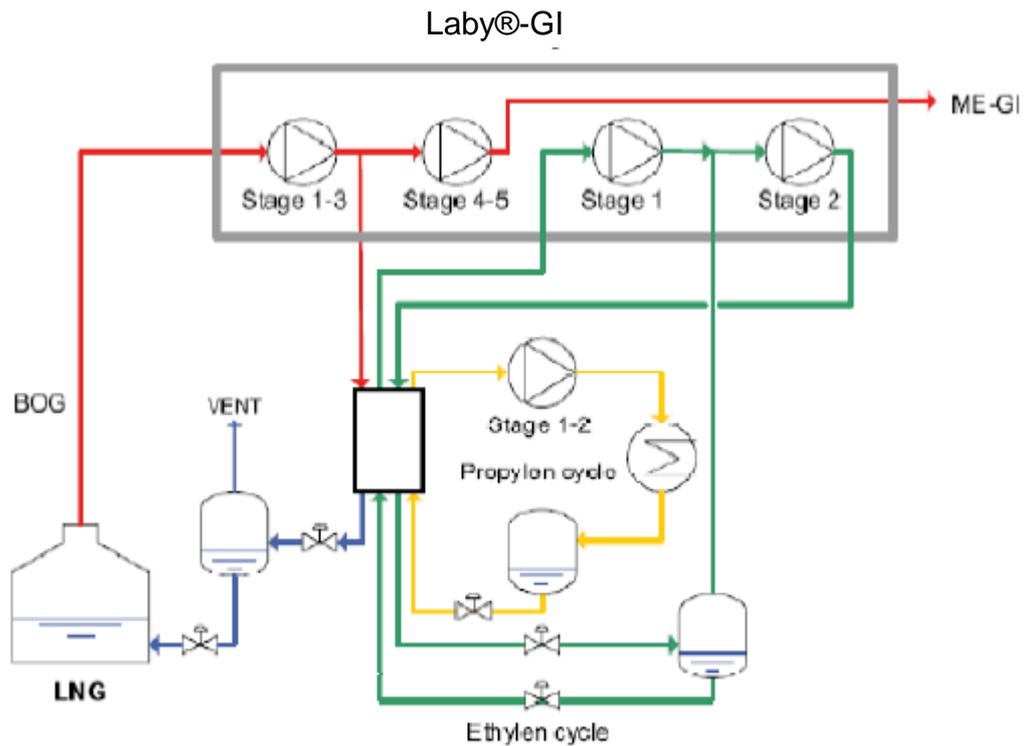


Figura 4.4.2: Diagrama de la planta TGE Laby®-GI

#### 4.5. Uso de LPG y de Metanol como combustible en motores ME-LGI

Los motores duales se diseñaron en un principio para buques LNG, pero en los últimos años, debido al aumento del precio de los combustibles y del estricto control de las emisiones, se empezó a pensar que sería interesante el uso de LPG como combustible tanto en buques portadores de esta carga como en otra clase de barcos.

El sistema de alta presión de gas utilizado en los motores ME-LGI ofrece la ventaja de ser insensible a la composición del gas. El motor es apto para la quema de gases con alto contenido en hidrocarburos.

El LPG normalmente contiene un contenido alto en hidrocarburos (propano y butano) pero puede ser utilizado como combustible sin alterar el rendimiento del motor en términos de velocidad, rendimiento térmico o potencia de salida.

Con respecto a los sistemas auxiliares que utilizará un motor para la combustión de LPG se tiene que tener en cuenta que este combustible es más denso que el gas natural, como resultado de esta diferencia los componentes LGI pueden tener un diseño mucho más pequeño, sin embargo, el LPG necesita ser presurizado a 550 bares en vez de los 300 que necesita el gas natural. Esta presión es necesaria para lograr una atomización completa del líquido en las boquillas de los inyectores. En comparación, el HFO, que tiene una densidad ligeramente superior, necesita una presión de inyección comprendida entre los 600 y 800 bares. Aparte del control de la presión en los motores ME-LGI, la temperatura también es controlada, el motor requiere una temperatura de combustible de unos 35 °C. Véase figura 4.5.1.

Hamworthy Gas System (HGS) junto con TGE son los proveedores más comunes para el suministro de los FGSS para buques LPG debido a sus competencias en este campo.

En los buques LPG, habitualmente distinguiremos entre dos tipos de LPG, habrá el LPG que se transportará como mercancía y el LPG que será empleado como combustible, lo cual supondrá una instalación adicional de un nuevo tanque en el buque provisto en la cubierta principal. Por supuesto, el uso de una bomba 'booster' sumergida en el tanque de carga LPG sería la opción más económica en términos de instalación.

El FGSS desarrollado, que se puede ver en la figura 4.5.2 ofrece la posibilidad de usar combustible directamente de la carga o desde el tanque de combustible de cubierta. Si se instala un tanque para combustible es recomendable aislarlo y controlarle la temperatura y presión. Para el transporte del LPG se utiliza una bomba de baja presión, en la que la temperatura habitual del propano en la carga es de -42 °C.

Después de pasar por la bomba de baja presión, el LPG que se encuentra en fase líquida, aumentará de temperatura hasta los 20 o 25 °C. Lo habitual es que utilice agua de mar en el intercambiador. Finalmente el LPG se presuriza en una bomba de alta presión a 550 bares. La cantidad de energía utilizada por las bombas es insignificante ya que disminuye un 0.5 % aproximadamente del rendimiento del motor.

Se ha estimado el coste que supone un sistema de suministro de gas junto con los componentes adicionales para la inyección de gas en el motor, esto se traduce en que su precio se verá incrementado en un 20-60 % dependiendo de la magnitud del motor. En esta incrementación del precio no va incluida el coste de la instalación en astillero, sin embargo, con la opción de disponer de gas como combustible es posible obtener beneficios en los momentos en que los precios del gas están bajos en comparación con los precios del HFO y viceversa.

Para los barcos que operen por las zonas ECA de la IMO, el LPG supone una alternativa barata en comparación con el MGO, ya que su precio está un 20 % por debajo del MGO.

Con respecto al tema de las emisiones, el uso del LPG para combustible se traduce en reducciones de emisiones de un 17% para el CO<sub>2</sub>, 12% en NO<sub>x</sub>, 95 % en SO<sub>x</sub> y un 37 % de reducción en partículas, véase tabla 4.5.1.

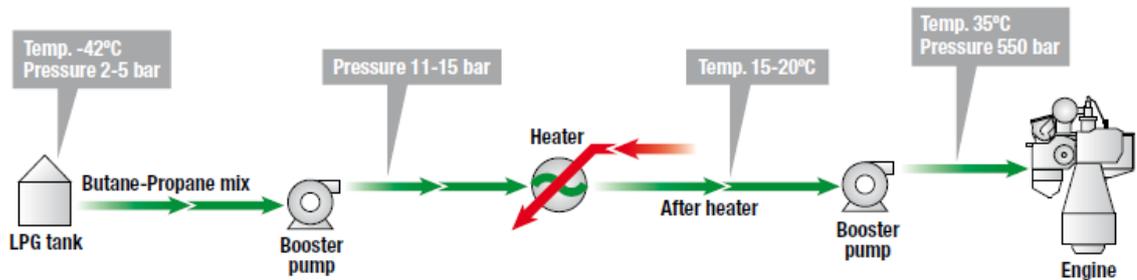


Figura 4.5.1: Temperaturas y presiones de los elementos que constituyen el FGSS de LPG

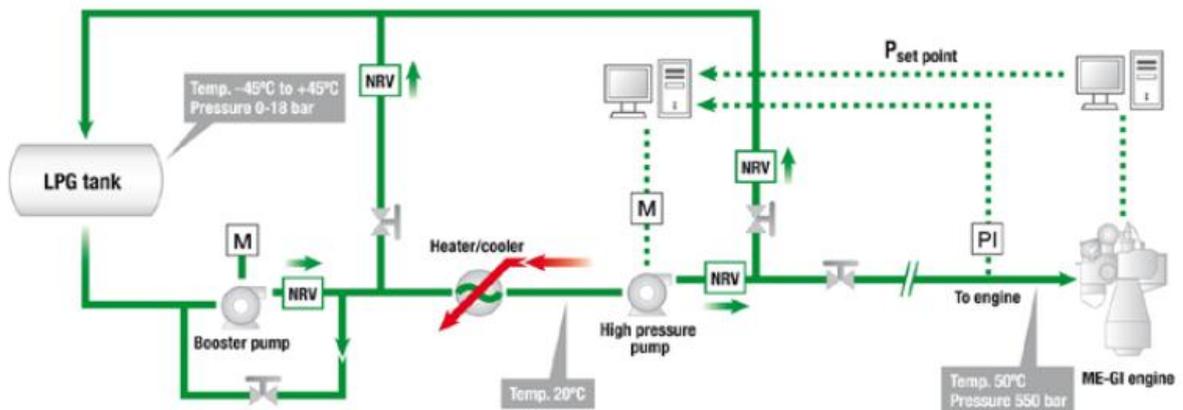


Figura 4.5.2: Sistema de suministro gaseoso LPG

<b>Emisiones estimadas HFO 3500 S.RW 1 6K50MC-C</b>		<b>Emisiones estimadas 8% combustible piloto-46% propano &amp; 46% butano 6S50ME-GI</b>	
100% Carga	g/kWh	100% Carga	g/kWh
CO <sub>2</sub>	556	CO <sub>2</sub>	469
O <sub>2</sub>	1223	O <sub>2</sub>	1255
CO	0.71	CO	0.89
NO <sub>x</sub>	11.97	NO <sub>x</sub>	10.51
HC	0.28	HC	0.57
SO <sub>x</sub>	10.57	SO <sub>x</sub>	0.85
PM (mg/m <sup>3</sup> )	0.49	PM (mg/m <sup>3</sup> )	0.31

Tabla 4.5.1: Comparación de emisiones entre un motor K50MC-C para quema de HFO y un motor S50ME-GI para quema de LPG

#### 4.5.1. Metanol como combustible

El uso del metanol como combustible para buques resulta interesante ya que no contiene azufre en su composición química. Para buques que operan en las zonas ECA de la IMO, el uso del MeOH como combustible es una solución factible para cumplir con los requerimientos con respecto a las emisiones de sulfuros, pero también hay existen otras ventajas que ofrecen estos nuevos combustibles.

En el año 2013 entra en vigor la adopción del EEDI por la Organización Marítima Internacional de obligatorio cumplimiento por todos los buques construidos después de 2013. Esta decisión sin duda altera a las soluciones para el control de emisiones en el sector naval por lo que combustibles alternativos como GN, LPG y MeOH se convierten en serios candidatos a ser utilizados como combustible y así reducir el EEDI. Naturalmente el GN, LPG y MeOH generan menos emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de combustión en comparativa con los demás combustibles. El metanol además resulta interesante ya que se puede obtener biometanol a partir de diferentes biomásas y ser mezclado con MeOH de origen fósil.

El MeOH es un combustible Otto caracterizado por tener un bajo índice de cetano, ver tabla 4.5.1.1.

Para la presión de inyección del MeOH se han estimado valores máximos de 400 bares. Este combustible se encuentra en fase líquida a temperatura ambiente por lo cual se dispondrá de una bomba en la parte baja del tanque para su manejo.

Combustible	DME	Metanol	Etanol	Diesel	HFO 45	Gasolina
Fórmula química	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> -OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -OH	C8-C25	-	C4-C12
% másico de C	52.2	38	52	85	-	86
% másico de O <sub>2</sub>	13	12	13	15	-	14
% másico de H <sub>2</sub>	34.8	50	35	0	-	0
Masa molar (kg/kmol)	46	32	46	183	-	114
Densidad líquida (kg/m <sup>3</sup> )	660	798	794	840	982	740
PCI (MJ/kg)	22.8	20.1	27.0	42.7	40.9	
Temperatura de ebullición (° C a 1 bar)	-24.9	65	78	180-360	-	27-245
Presión de vapor (bar a 20°C)	5.3	0.13	0.059	<<1	-	0.25-0.45

<b>Presión crítica (bar)</b>	53.7	81	63	30	-	-
<b>Temperatura crítica (°C)</b>	127	23904	241	435	-	0.25-0.45
<b>Viscosidad cinemática (cSt a 20°C)</b>	0.19-0.25	0.74	1.2	2.5-3.0	-	0.6
<b>Tensión superficial(N/m a 20°C)</b>	0.012	0.023	0.022	0.027	-	-
	1					
<b>Módulo de compresibilidad (Nmm<sup>2</sup> a 20°C 2Mpa)</b>	.549	823	902	553	-	1.300
<b>Índice de Cetano</b>	55	<5	8	38-25	-	-
<b>Índice de Octano</b>	Bajo	109	109	15-25	-	90-100
<b>Temperatura de autoignición (°C)</b>	350	470	362	250-450	-	250-460
<b>Entalpía de vaporización (kJ/kg a 1 bar)</b>	467	1,089	841	250	-	375
<b>Energía mínima de ignición (mJ/kg a 1 bar)</b>	0.33	0.21	0.65	0.23	-	0.8
<b>Aire estequiométrico</b>	9	6.5	9.1	14.6	13.5	14.7
<b>Temperatura máxima de llama (°C a 1 bar)</b>	1,780	1,890	1,920	2,054	-	2,030
<b>Límites de inflamabilidad</b>	3.4-18.28	6-36	3-19	0.5-7.5	-	1.4-7.6
<b>Temperatura de Flash (°C)</b>	-41	12	14	52	-	-45

Tabla 4.5.1.1: Propiedades químicas de los diferentes combustibles

#### **4.5.2. Otras consideraciones del uso de MeOH como combustible**

Desde que la nueva regulación IMO Tier III se encuentra en vigor es obligatorio que el motor disponga de sistema EGR, por lo que la sala de máquinas tiene que disponer de espacio suficiente para el sistema de tratamiento de gases de escape y su correspondiente sistema de tratamiento de aguas del 'scrubber'.

Se espera que no se produzcan formaldehidos en el proceso de combustión ya que el MeOH en el proceso de combustión supera temperaturas superiores a los 1400 °C por lo que todas sus moléculas se quemarán. Los formaldehidos se forman a temperaturas que oscilan entre los 400 y 600 °C.

Además los motores duales de MAN de dos tiempos no presentan posibilidad de fuga de combustible por lo que se evitará la formación de formaldehidos, de tal modo, no será necesario la instalación de un sistema a mayores aparte del EGR para el tratamiento de los gases de escape.

El coste de la estación de suministro de MeOH incluyendo los tanques es más barato en comparación con el mismo equipo para el LNG, e incluso más barato que para equipos de LPG. El coste de los tanques de MeOH es similar al coste de los tanques de HFO.

#### **4.6. Sistemas de contención de la carga**

##### **4.6.1. Tipos de tanques de carga**

El Código Internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel (Código IGC), de la IMO, identifica cinco tipos de tanques:

- Tanques independientes ('A', 'B' o 'C')
- Tanques de membrana (Technigaz/ Gaz transport)
- Tanques de semi-membrana
- Tanques integrales o estructurales (convencionales)
- Tanques de aislamiento interno

Los sistemas de contención a base de tanques independientes y de membrana son los más comúnmente utilizados por la mayoría de los buques gaseros.

#### 4.6.2. Tanques independientes

Los tanques independientes son completamente autosoportables y no forman parte de la estructura del casco, ni contribuyen a su resistencia. Dependiendo básicamente de la presión de proyecto, existen tres tipos diferentes de tanques independientes: Tanques tipo 'A', 'B' y 'C'.

##### 4.6.2.1. Tanque independiente tipo 'A'

Los tanques tipo 'A' (figura 4.6.2.1.1) están contruidos con acero para las bajas temperaturas, superficies planas y su forma prismática aprovecha al máximo el espacio del casco. La presión de vapor de proyecto será inferior a 0.7 bar, lo cual significa que las carga han de ser transportadas en ellos en régimen de completamente refrigerados a la presión atmosférica, o muy próximo a ella.

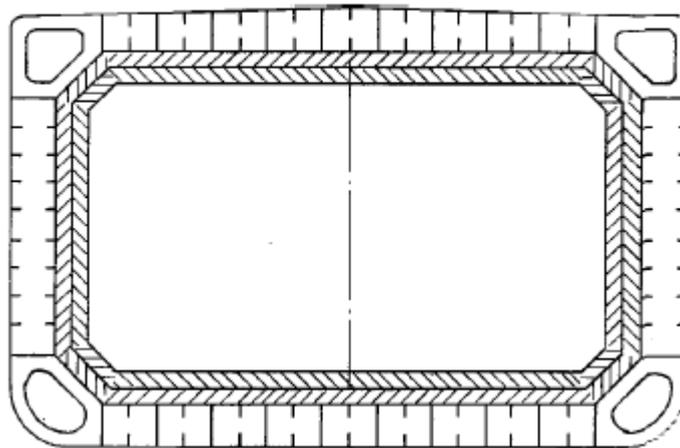


Figura 4.6.2.1.1: Perfil de un tanque independiente Tipo 'A'

Debido a las bajas temperaturas de la mercancía transportada, y con el objeto de alcanzar una seguridad ante el casco de una posible pérdida del tanque, se requiere disponer de un sistema de contención secundario, a fin de proteger el casco del buque de las bajas temperaturas (barrera secundaria,  $< -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Cualquier barrera secundaria debe poder contener las fugas del tanque por un período de 15 días. El espacio contenido entre los mamparos del tanque (barrera primaria) y la barrera secundaria se denomina 'espacio interbarreras'. Estos espacios de bodega se mantendrán inertizados en caso de transporte de mercancía inflamable, y de aire en caso de no inflamable.

En un típico gasero LPG totalmente refrigerado (temperaturas hasta  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), dado que la barrera secundaria debe ser capaz de contener las fugas del tanque, el costado del buque puede hacer de barrera secundaria siempre y cuando el casco haya sido construido con aceros especiales capaces de soportar estas temperaturas (la alternativa sería construir la barrera secundaria alrededor de cada tanque de carga).

Estos tanques están especialmente aislados (temperatura) y son estancos al vapor y al agua impidiendo la entrada de humedad circundante. El aislante lo conforman paneles de espuma de poliuretano, de 120 mm de grosor, recubierto de una chapa de aluminio.

#### **4.6.2.2. Tanques independientes tipo 'B'**

Los tanques tipo 'B' están contruidos por superficies planas, de forma generalmente esférica y la presión de vapor de proyecto será inferior a 0.7 bar, y también del tipo de recipiente a presión (véase figura 4.6.2.2.1). En ambos casos, el sistema empleado en el análisis de tensiones es mucho más avanzado y exacto que los de tipo 'A'. Han de ser proyectados con ayuda de modelos de prueba, avanzados instrumentos y métodos analíticos para determinar los niveles de esfuerzos, la resistencia a la fatiga y las características de propagación de grietas.

Los tanques tipo 'B' requieren solo de una barrera secundaria parcial. El espacio de bodega en este diseño se llena normalmente de gas inerte seco, aunque también puede ir con aire seco a condición de que el sistema sea capaz de inertizar el espacio en caso de fuga de vapores inflamables. Un domo protector de acero cubre la barrera principal por encima del nivel, de la cubierta. El tanque independiente tipo 'B' se diseñó, casi exclusivamente, para los buques LNG/c, donde la reducción del coste que supone la barrera secundaria parcial es una parte significativa del coste total, pero es también frecuentemente utilizado en el transporte de etileno.

El tanque es una gruesa esfera de aluminio aislado por dos capas, una de espuma de resina fenólica y otra de espuma de poliuretano, reforzado por una malla de alambre y cubierta con una plancha de aluminio.

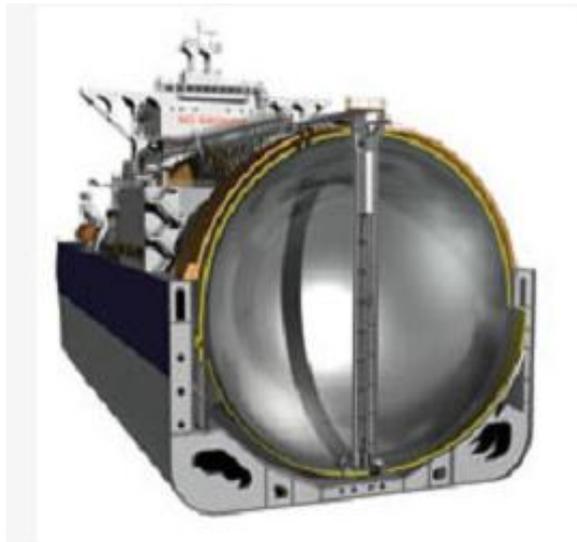


Figura 4.6.2.2.1: Tanque tipo 'B' Moss Rosenberg

#### **4.6.2.3. Tanques independiente tipo 'C'**

Los tanques independientes tipo 'C' son recipientes a presión, cilíndricos o esféricos, cuyas presiones de vapor de proyecto superan los 2 bares. Los recipientes cilíndricos se pueden montar ya sea en vertical u horizontalmente. Es el típico tanque de cubierta que se puede ver en los buques LPG/c.

Los tanques tipo 'C' se proyectan y construyen de acuerdo con las normas convencionales aplicables a los recipientes a presión, por lo que su análisis de tensiones se considera bastante exacto. Además, las tensiones de proyecto se mantienen razonablemente bajas, de suerte que con este tipo de sistemas, no se requiere una barrera secundaria, ni siquiera parcial, y el espacio de bodega se puede rellenar tanto de gas inerte como de aire.

#### **4.6.2.4. Tanques de membrana.**

Se utiliza una película delgada, o membrana, como elemento primario de contención de la carga. La instalación está soportada, a través de aislamiento, por el casco del buque. Aunque su estructura no forma parte del casco, poseen un buen grado de integración con este al estar separada la membrana del mismo, únicamente, por el aislamiento, a través del cual reciben un apoyo prácticamente total. La membrana ha sido proyectada de modo que las dilataciones y contracciones térmicas y de otra índole queden compensadas, sin que esto imponga un esfuerzo excesivo.

En general, la presión de vapor de proyecto no excederá los 0.25 bar. No obstante, se aumenta los escantillones del casco y, en los casos pertinentes, si se presta la debida atención a la resistencia del aislamiento del soporte, podrá aumentarse la presión de vapor de proyecto, pero conservándolo siempre por debajo de los 0.7 bar.

Los tanques de membrana se utilizan para el transporte de LNG. Los dos principales tipos de membranas han sido diseñados por las compañías Gaz Transport y Technigaz, que en la actualidad están fusionadas bajo el nombre de Gaz Transport Technigaz GTT.

Hasta ahora, los armadores de los grandes gaseros, hasta 135.000 m<sup>3</sup> podían elegir entre montar tanques con membrana o tanques esféricos tipo 'B', pero la tendencia a buques mayores hace exclusivo el uso de la membrana con objeto de aprovechar al máximo el espacio de bodegas.

#### **4.6.2.4.1. Sistema de membrana 'Gaz Transport'**

Es el sistema de membrana más frecuentemente montado a bordo de los buques LNG. Consta de dos membranas idénticas, barrera primaria y secundaria, construida con una capa de 0.7 mm de Invar (aleación de acero inoxidable con 36 % de níquel y hierro, con un factor de contracción prácticamente nulo) y un contrachapado relleno de perlita, de 200 mm, como material aislante.

El grosor de este aislamiento está diseñado para los actuales LNG, con un volumen determinado de carga y un tiempo de viaje concreto, consumiendo el buque los vapores producidos por el 'boil-off' de la carga. El aumento del tamaño de los buques LNG, y sus rutas más largas, hacen prever que se tenga que optar por la instalación de una planta de relicuefacción a bordo, en detrimento del sistema de membranas.

#### **4.6.2.4.2. Sistema de membrana 'Technigaz'**

En este sistema de membrana, la barrera primaria es de acero inoxidable con la superficie cruzada, en forma de rejillas, que permiten la expansión y la contracción.

Esta barrera primaria está soportada por una espuma aislante. Entre este sistema aislante lleva unas láminas de 'fibreglass' y aluminio que constituyen la segunda barrera, capaz de contener un derrame de la carga durante 15 días.

#### 4.6.2.4.3. Sistema Gaz Transport Technigaz, 'CS1'

Este sistema de aislamiento es un híbrido desarrollado a base de combinar las ventajas de los actuales sistemas Gaz Transport Technigaz: el No 96 y el MK III. Utiliza una barrera primaria de invar, del tipo paneles MK II, e incluye una segunda 'triplex' membrana (una hoja de aluminio entre dos capas de fibra de vidrio). Entre la barrera primaria y la secundaria se inyecta nitrógeno a baja presión, entre la segunda y el casco, nitrógeno a alta presión). La reducción del espesor en este tipo de aislante llega a suponer un aumento de hasta 8.000 m<sup>3</sup> por tanque. El primer buque con este sistema se botó a finales de 2006.

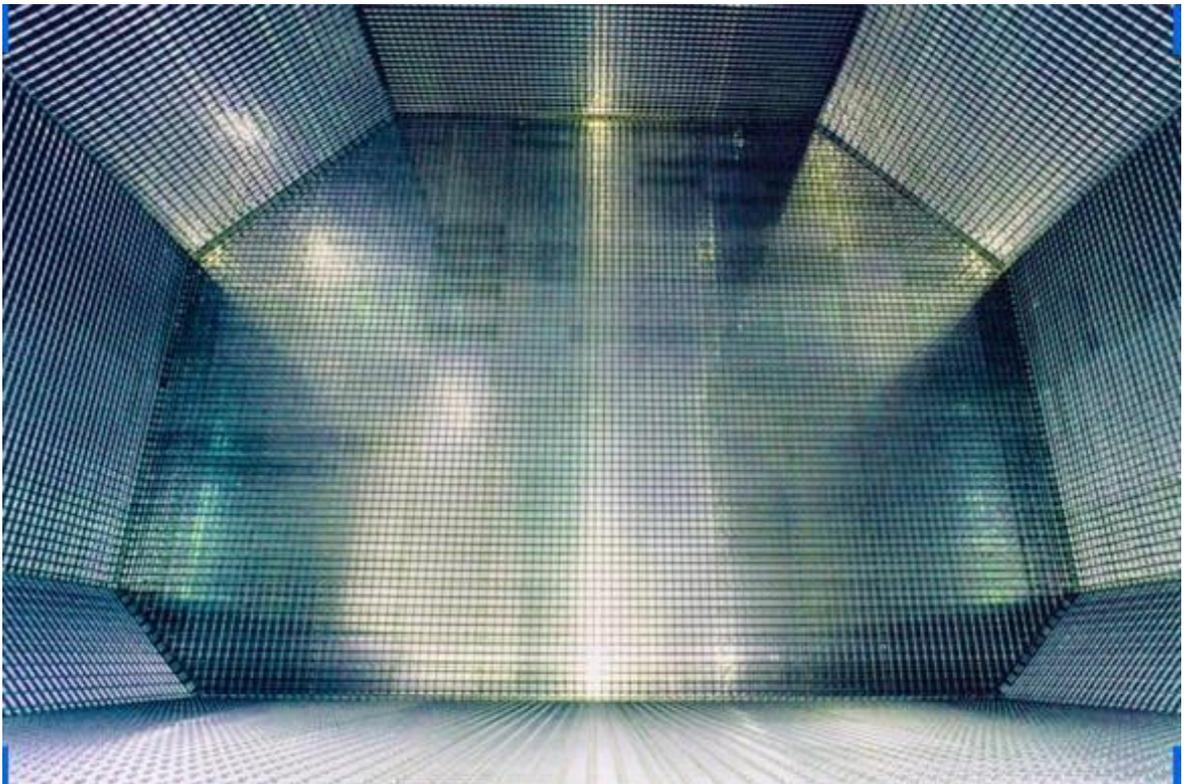


Figura 4.6.2.4.3.1: Diseño del tanque de membrana GTT MK III

#### **4.7. ME-GI para Portacontenedores, Petroleros y Graneleros**

En los últimos años el precio de los combustibles ha incrementado y pronto veremos/estamos viendo situaciones en donde es económicamente factible ver un barco portacontenedores que funcione con combustible gaseoso en vez del HFO convencional. Si la planta propulsora de un buque se compone por motores ME o ME-C es posible realizar la modificación para que pueda operar en modo gas.

El sistema que se usa en el Ferry de coches propulsado por gas M/F Glutra está basado en un sistema con tanques de LNG. Además se han realizado en la actualidad un gran número de estudios relacionados con la industria del gas para buques, por los grandes astilleros y Sociedades de Clasificación.

Básicamente el espacio que se requiera para instalar un tanque que contiene LNG es 2.5 ó 3 veces mayor al de un tanque convencional de HFO debido al poder calorífico inferior y a la alto aislamiento que requiere dicho tanque para que se mantenga frío.

El motor de inyección de gas requiere una presurización de combustible máxima de 300 bares. La tecnología para presurizar el LNG y evaporarlo a alta presión se ha desarrollado por HGS, TGE, DSME, Cryostar™, HHI y también por MHI.

Estos sistemas desarrollados por estos fabricantes tienen en común lo siguiente:

- Bomba alternativa de LNG para generar altas presiones
- Sistema automático para el control de la presión de acuerdo con la presión de entrega requerida por el motor principal.
- Intercambiador de calor para calentar el LNG de acuerdo con los requerimientos de temperatura.
- Volumen de tampón para amortiguar las pulsaciones generadas por los aumentos de presión

El sistema de suministro de gas utiliza bombas LNG de Cryostar™ alimentadas por las bombas de los sprays situadas en los tanques LNG, y con capacidad suficiente para ser utilizadas como bombas 'booster'. Estas bombas de alta presión de Cryostar™ son controladas por un variador de frecuencia variable por lo que la velocidad de la bomba se puede ajustar para que trabaje acorde con el motor principal.

La bomba de alta presión de LNG se utiliza para incrementar la presión a 250-300 bares y pasar a través del intercambiador de calor 'heliflow'. El gas se evapora y se transfiere a 300 bares al sistema acumulador.

Dependiendo de la disposición del sistema el volumen de tampón puede estar incluido en las tuberías de alta presión. El intercambiador de calor 'heliflow' también llamado evaporador de alta presión necesita un fuente de calor para evaporar el LNG, y esta fuente puede ser tomada directamente del agua caliente procedente del agua de refrigeración del motor ME-GI. También se puede utilizar vapor LNG o incorporar un ciclo intermedio de agua mezclada con glicol.

La energía consumida por la bomba HP es muy baja, corresponde a la reducción de menos de 0.5% de la eficiencia del motor ME-GI en comparación con un motor de tipo ME-C.

#### **4.7.1. Sistema de tanques LNG**

Para barcos mercantes nos encontramos un amplio margen de posibilidades para equipar un tanque LNG, para barcos de dimensiones inferiores, los tanques criogénicos prefabricados aislados al vacío son una buena opción, existen deferentes medidas y con respecto a la presión llegan a los 10 bares que es lo permitido por el código IGF. Algunos Ferris y buques de abastecimiento ya disponen de estos tanques.

Para buques de mayores dimensiones existen otras posibilidades, algunas de ellas están listadas a continuación:

- Diseño de tanque de membrana.  
Dominante en metaneros, pero susceptibles a 'sloshing'  
BOR ('boil-off' range) o tasa de evaporación: 0.14-0.2 % por día
- Tanques esféricos tipo Moss  
Autosoportados e invulnerables a 'sloshing', pero problemas de espacio y pocos fabricantes  
BOR: 0.14-0.2 % por día
- Tanques independientes tipo 'B' de IHI u otros  
Autosoportados e invulnerables a 'sloshing'. Tanques de baja presión, y construidos en determinados astilleros.  
BOR: 0.14-0.2 % por día o superior en tanques más pequeños
- Tanques independientes tipo 'C' de TGE u otros  
Diseño simple o bilobular con presión comprendida entre los 3 y 10 bares dependiendo de las dimensiones del tanque, materiales y requerimientos operacionales, el rango de 'boil-off' es mayor para los tanques de menor tamaño: 0.2-0.6 % por día, autosoportados e invulnerables a 'sloshing'

Los tanques independientes tipo 'B' de IHI junto con los tanques independientes tipo 'C' de TGE son los diseños más prometedores para buques convencionales de grandes dimensiones. Ambos diseños tienen en común que es posible realizar operaciones cuando los tanques se encuentran parcialmente copados, lo cual es un requisito básico cuando el tanque se utiliza como tanque de almacenamiento de combustible. Cualquiera de estos dos diseños es apto para utilizar combustible LPG.

Los diseños de estos tanques tienen sus ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, en el diseño del tanque de IHI es posible adaptar el tanque según la configuración del buque, ver figura 4.7.1.1. En el diseño del tanque de TGE, con el tanque bilobulado, solo se puede adaptar hasta cierto punto, ver figura 4.7.1.2. El volumen del tanque bilobulado mayor que nos podemos encontrar ronda los 20.000 m<sup>3</sup>.

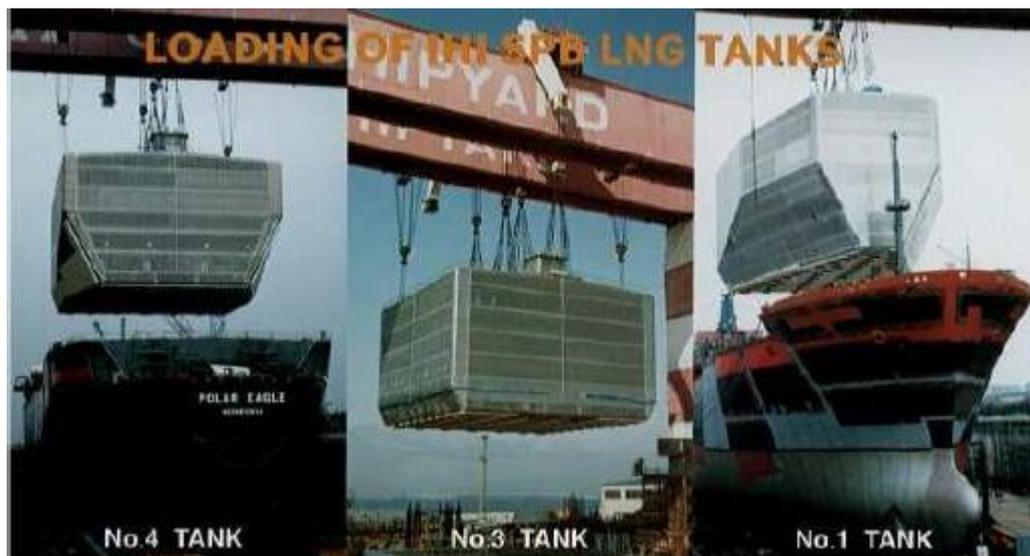


Figura 4.7.1.1: Diseño del tanque tipo 'B' por la casa IHI

Otra ventaja de la consta el tanque diseñado por TGE es la capacidad de albergar BOG en el interior del mismo durante las tareas de operación, debido a su permisible presión de trabajo que puede llegar a alcanzar los 10 bares de presión. Si se emplea un tanque que carezca de esta cualidad se le tiene que añadir un método alternativo para la gestión de gas al sistema de suministro gaseoso. En la figura 4.6.1.3 se puede observar una lista de diferentes alternativas para combinar con el sistema de suministro gaseoso de Cryostar™.

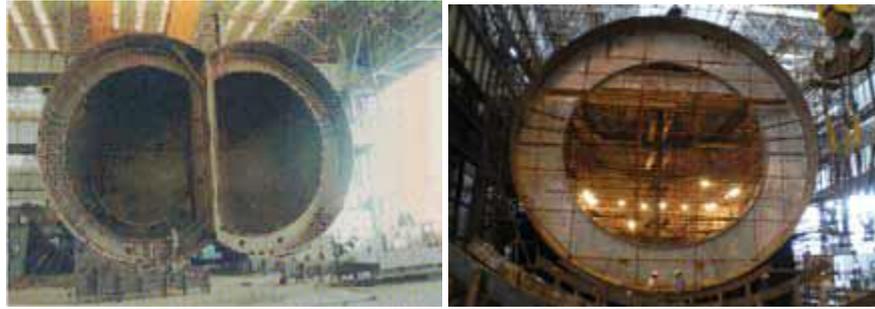


Figura 4.7.1.2: Tanque tipo 'C' de TGE bilobulado (derecha) y de diseño simple (izquierda)

Con lo mencionado anteriormente, se puede concluir que la tecnología para un motor ME-GI de dos tiempos impulsado a gas está disponible. Lo que se necesita es un pionero visionario en el negocio del transporte para tomar la iniciativa.

### Process flow diagram

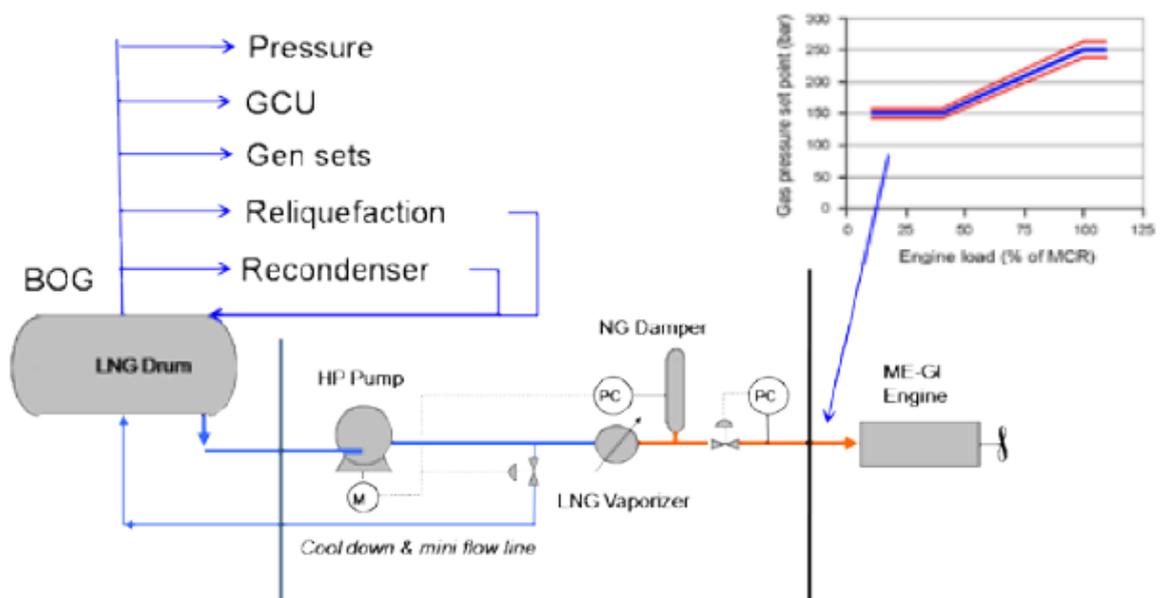


Figura 4.7.1.3: Sistema de suministro gaseoso empleando una bomba HP de Cryostar™.

---

## **5. SISTEMA DE CONTROL DUAL**

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y  
MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

## 5. SISTEMA DE CONTROL DUAL

A mayores de todo lo demás mencionado con anterioridad los motores duales están dotados de un sistema de control capaz de gestionar el motor cuando trabaja con combustible gaseoso comprimido, figura 5.1. Se podría decir que el sistema de control es un elemento que une todas las piezas en el sistema tanto internamente como externamente y a su vez, hace que el motor pueda operar en modo gas.

Este sistema para el control en dual fuel, se fundamenta en el sistema de control electrónicamente controlado o (ME) por lo que en el panel del puente, el Main Operation Panel (MOP) junto con el Local Operation Panel (LOP) permanecerán sin cambios. Todas las operaciones en modo gas se ejecutarán solamente desde la sala de máquinas.

Cuando está operando el control dual fuel, el control ME y el sistema de alarma se encontrarán en pleno funcionamiento.

Por razones de hardware el sistema de control dual fuel está dividido en:

- Control de la planta
- Control de combustible
- Control de seguridad

### 5.1. Control de planta

El cometido del control de planta es gestionar el cambio entre los dos estados:

- Estado gaseoso con condiciones seguras (sólo HFO)
- Estado dual fuel

El sistema de control de planta se encarga de regular los componentes que tienen relación con el tránsito del gas mostrados en la figura 2.5. Para que el control de planta pueda desempeñar su misión es necesario que el sistema de control de seguridad se lo permita de tal modo que este podrá anular y hacer que se vuelva al estado gaseoso en condiciones seguras.

## **5.2. Control de combustible**

La labor del control del combustible es determinar la cantidad adecuada de gas y de llama piloto de fuel en los diferentes modos de funcionamiento del motor mostrados en el apartado 2.3.

## **5.3. Control de Seguridad**

El control de seguridad se encarga de supervisar:

- Todos los equipos que trabajan con gas y sus relativos sistemas auxiliares
- La señal de apagado proveniente del sistema de seguridad ME
- El estado en el que se encuentra el cilindro del motor para a posteriori proceder a la inyección de gas

Si algo de lo mencionado arriba falla, será detectado por el control de seguridad y se llevará a cabo el cierre del sistema de combustible gaseoso que vendrá determinado por la siguiente secuencia:

La válvula 'Shut Down' V4 y la válvula maestra V1 se cerrarán. Las válvulas ELGI se anularán. El combustible gaseoso se ventea al exterior al ser abierta la válvula V2 y finalmente el sistema de tuberías gaseosas serán purgadas con gas inerte, para entender dicho procedimiento se aconseja ver la figura mostrada a continuación.

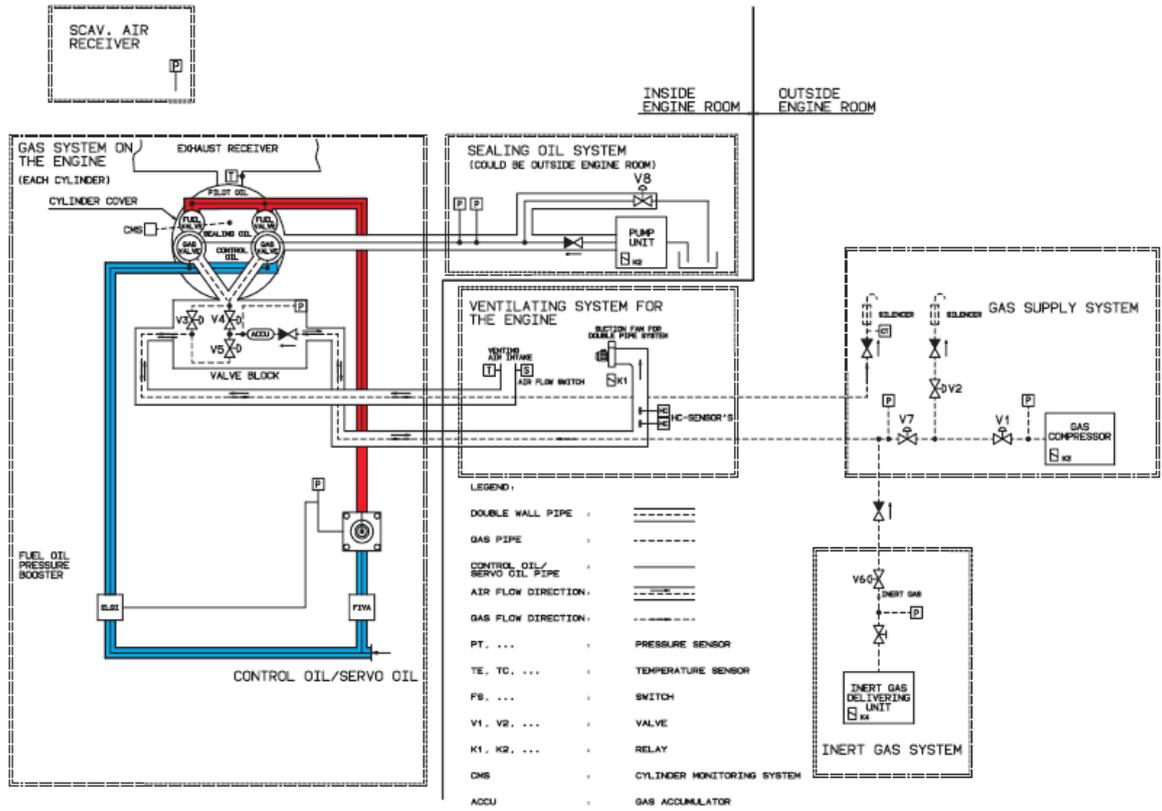


Figura 5.3.1: Sistema interno y externo para operaciones con sistema dual fuel

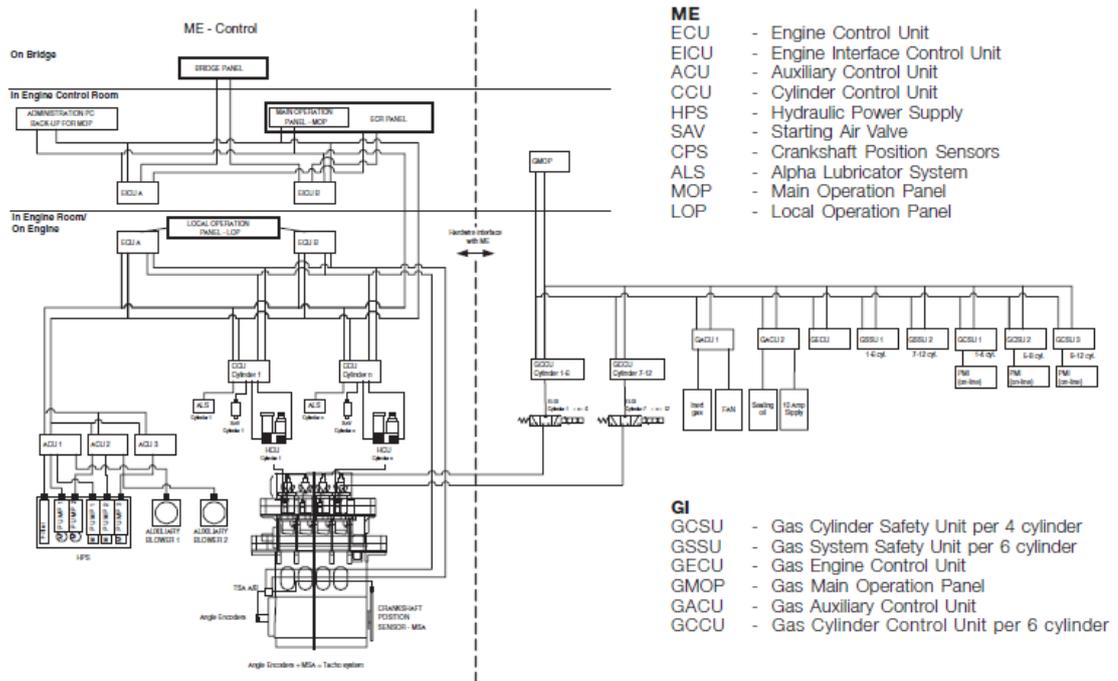


Figura 5.3.2: Sistema de control ME-GI

#### **5.4. Arquitectura del sistema de control de combustible dual**

El funcionamiento en dual fuel no es esencial para la maniobrabilidad del buque ya que el motor puede continuar trabajando con fueloil si ocurre una parada involuntaria de gas. La pretensión de la arquitectura y diseño del equipamiento de combustible gaseoso son las siguientes en orden de prioridad:

- La seguridad hacia el personal ha de ser, a lo sumo, del mismo nivel que para el motor principal.
- Un error o fallo de los equipos dual fuel causarán la parada de gas y cambiarán a modo seguro.

Estos dos propósitos, en cierto modo, se complementan entre sí.

El sistema de control dual fuel se diseñó para que en caso de fallo se proceda a trabajar en condiciones seguras y sin riesgos. Véase figura 5.4.1.

Debido a los fallos detectados durante el funcionamiento con combustible gaseoso y fallos detectados por el sistema de control, el sistema de control dual fuel llevará a cabo la parada del funcionamiento con gas, procederá al 'Shut Down' y pasará a funcionar completamente con fueloil seguido por un vaciado y purga de las tuberías de alta presión.

Si el fallo tiene relación con el sistema de purga es necesario purgar manualmente previo a si se va a desempeñar una reparación del motor principal va a llevara a cabo. (Este tema será tratado con más detalle más adelante).

A diferencia del sistema de purga en el cual se puede manipular manualmente el sistema de control dual no presenta esta característica, sino que los equipos que lo conforman se han hecho con redundancia para asegurar que una simple falta no provoque la parada o bloqueo del gas:

- La red de comunicación está por duplicado a fin de minimizar el riesgo de interrupción de comunicación entre las unidades de control.
- Los sensores primordiales se encuentran por duplicado de tal modo que un set de estos sensores está conectado a la planta de control y otro al sistema de seguridad. En consecuencia, un fallo del sensor no detectado no tiene ninguna consecuencia para el funcionamiento modo combustible seguro.

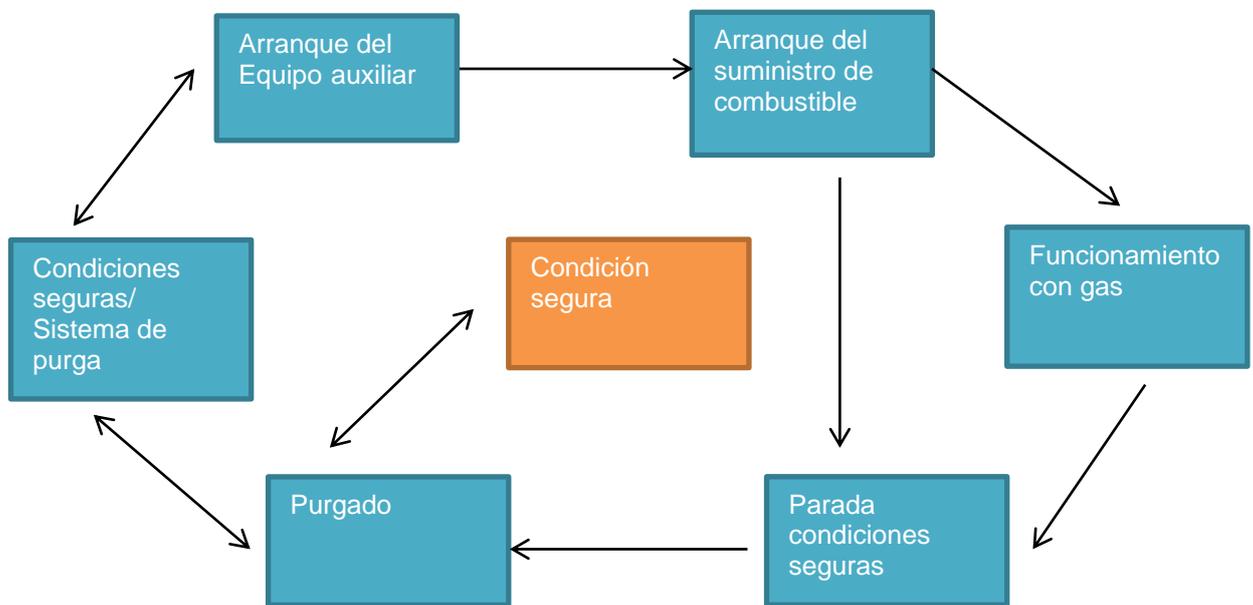


Figura 5.4.1: Modelo de estado para gas combustible

### **5.5. Control Unit Hardware**

Entre las diferentes unidades de control hardware, para este sistema de control, se encuentran:

- Multi Purpose Controller Units
- GCSU

El Multi Purpose Controller Unit se emplea para el seguimiento de las siguientes unidades: GECU, GACU, GCCU, y también GSSU, es recomendable visualizar la figura 5.1 para un mejor entendimiento.

### **5.6. Gas Main Operating Panel (GMOP)**

El panel principal para operaciones de gas resulta ser un panel extra para el control de la inyección de gas en motores ME-GI. Desde el, se realizan las operaciones manualmente, como por ejemplo, cambiar los modos de funcionamiento del motor, o cuando proceda, llevar a cabo el inicio del purgado del sistema de las tuberías de gas con gas inerte.

Este panel, a mayores, contiene las facilidades necesarias para proceder al arranque/paro sobre el gas combustible.

### **5.7. GECU, Control de Planta**

El GECU gestiona el control de planta en combinación con GCCU, que a su vez, gestiona el control de combustible.

Veámoslo con un ejemplo: Cuando el modo 'dual fuel' se inicia es porque ha sido activado manualmente por el operador. El control de planta arrancará la secuencia automática para proceder al arranque empezando por el sellado de la bomba de aceite. Cuando el motor, supervisado por GECU se encuentra en

condiciones para funcionar en 'dual fuel', el control de planta lanza 'la operación de arranque dual fuel' señal realizada por el GCCU (control de combustible).

Por lo tanto, el GCCU, en combinación con el GECU hará efectiva la inyección de gas siempre y cuando se cumplan todos los requisitos para su debido funcionamiento.

El control de planta supervisa las condiciones en las que se encuentran las siguientes unidades:

- Sensores HC
- Sistema de suministro de gas
- Sistema de sellado de aceite
- Ventilación de las tuberías
- Sistema de gas inerte
- Conexión de red a otras unidades del sistema dual fuel

Si ocurriera un fallo, automáticamente el control de planta interrumpiría la operación de arranque con gas y se retornaría al estado de planta en modo gas seguro.

Además, el GECU, contiene también el control de combustible, que incluye todos los instrumentos para calcular el dosado de gas y el combustible líquido necesario para la llama piloto, basados en la consigna del regulador de velocidad y el modo elegido de funcionamiento.

Basándose en estos datos y que incluye información acerca de la presión del gas combustible, el control de combustible calcula el tiempo de inicio y duración de la inyección, a continuación, envía la señal a el GCCU, que efectúa la inyección mediante el control de la válvula de ELGI.

### **5.8. GACU, Control Auxiliar**

El GACU se encarga del control de los siguientes sistemas auxiliares:

El ventilador encargado de la ventilación de las tuberías de pared doble, la bomba de aceite de sellado, el purgado con gas inerte y el sistema de suministro con gas.

O dicho con más exactitud, el GACU controla:

- Arranque/paro de las bombas, ventiladores, y FGSS
- Puntos estratégicos para la presión de aceite de sellado
- Puntos estratégicos para la presión del sistema de suministro gaseoso

### **5.9. GCCU, control sobre ELGI**

El GCCU controla la válvula ELGI basándose en los conceptos básicos de los datos calculados por el GECU.

A su debido tiempo, antes de cada inyección, la GCCU recibe información desde el GECU, acerca del ángulo de avance para la inyección del gas, y del tiempo de apertura de la válvula de inyección. Si el GCCU recibe una señal de CONFIRMACIÓN desde el sistema de seguridad y el GCCU no observa ninguna anomalía, entonces la inyección de gas combustible se llevará a cabo acorde con la posición de cigüeñal correspondiente.

### **5.10. GSSU, supervisión y control del sistema de gas combustible**

El GSSU ejecuta y supervisa el sistema de gas combustible y controla el 'Shut Down' del gas combustible.

Esta unidad supervisa lo siguiente:

- El estado de las temperaturas de gases de escape
- Ventilación de las tuberías de doble pared
- Presión del aceite de sellado
- Presión de gas combustible
- Señal de confirmación del GCSU

Si alguno de los parámetros anteriores, en referencia al estado de gas combustible difiere de los valores de servicio habituales, el GSSU anula cualquiera de las otras señales y se procederá al cierre o 'Shut Down'.

Solamente después de que se verifique la causa del cierre y sea corregida, el modo de operación con gas combustible podrá ser reiniciado de forma manual.

#### **5.11. GCSU, PMI on-line**

La encomendación de los GCSUs es supervisar el estado de los cilindros y así saber si estos se encuentren en aptas condiciones para que el gas presurizado sea inyectado, más concretamente el GCSU controla:

- Caída de presión en el depósito acumulador de gas
- Presión de inyección del combustible piloto de llama
- Presión del cilindro:
  - Baja presión de compresión
  - Detonación
  - Baja presión de expansión
- Presión de aire de barrido

Si se detecta que alguno de estos parámetros se encuentra en condiciones anormales, la válvula ELGI se cierra y el GSSU provoca un 'Shut Down' del gas combustible.

### **5.12. Aspectos a destacar con respecto a la seguridad**

El objetivo principal del sistema de control de combustible dual es asegurar un sistema de control de combustible dual que proporcione el mayor grado posible de seguridad para el personal. Consecuentemente, un fallo en el sistema de gas, generalmente causará el cierre del flujo de gas combustible con su consecuente purgado de tuberías y acumuladores.

El sistema de seguridad supervisa el funcionamiento con gas combustible, que en caso de fallo, dicho flujo será cortado. A su vez el funcionamiento con gas combustible es supervisado por el control de planta y por el control de combustible, el suministro de gas combustible se detendrá si cualquiera de estos dos sistemas detecta un fallo.

Como los parámetros esenciales para el funcionamiento con gas combustible están supervisados, tanto por el control de planta junto con el de combustible, y por el sistema de control de seguridad, estos, proporcionan un respaldo mutuo.

---

## **6. MOTORES MAN Y LAS TECNOLOGIAS DE REDUCCION DE EMISIONES NO<sub>x</sub> - IMO Tier III**

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y  
MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

## 6.1. Introducción

En relación con la reducción de emisiones contaminantes de los gases de escape, el objetivo de los fabricantes de grandes motores marinos, es cumplir con la nueva regulación IMO Tier III, cuya entrada en vigor se producirá en 2016.

Todas las legislaciones sobre reducción de emisiones prestan especial atención a los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) formados, en más de 90%, por las elevadas temperaturas que se alcanzan durante la combustión.

Hasta la fecha se han investigado diversos métodos para la reducción de emisiones de  $\text{NO}_x$ :

- Medidas internas: recirculación de los gases de escape (EGR por sus siglas en inglés), turbocompresión de doble etapa, 'timing' variable de válvulas y sistema de inyección 'common rail' (CR).
- Las denominadas Wet Technologies: Fuel Water Emulsion (FWE) e inyección de aire de carga humificado (HAM).
- Medidas secundarias o de tratamiento de los gases de escape: Reducción Catalítica Selectiva (SCR en sus siglas inglesas).

El gráfico muestra la evolución de los motores diesel desde el año 1950 hasta la actualidad y la reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera de los mismos.

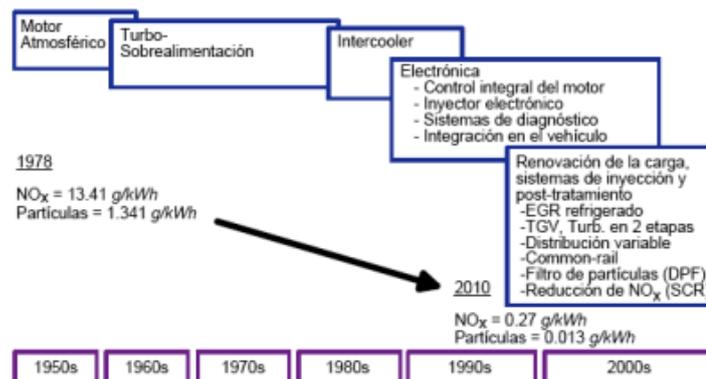


Figura 6.1.1: Evolución de los motores diesel a partir del año 1950 hasta la actualidad y la reducción de las emisiones de los mismos

Después de analizar los distintos métodos propuestos, se llegó a la conclusión que la recirculación de gases de escape y la reducción catalítica selectiva tienen el potencial suficiente como para alcanzar una reducción del 80 % de  $\text{NO}_x$  requerida por Tier III.

MAN Diesel & Turbo (MDT), valiéndose del 'know how' adquirido como proveedor de avanzadas tecnologías para los equipos de propulsión del buque, ha diseñado, fabricado e instalado el primer sistema EGR para un motor diesel de dos tiempos a bordo del buque portacontenedores Alexander Maersk.

El potencial de la recirculación de los gases de escape para la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en motores de dos tiempos quemando combustible pesado (HFO) ha sido investigado por MAN durante los últimos 10 años.

Esta técnica se basa en que la mayor capacidad térmica y el menor contenido de oxígeno de los gases de escape recirculados disminuye la temperatura máxima de combustión, responsable de la formación de los denominados  $\text{NO}_x$  térmicos.

El sistema EGR enfría y mezcla cantidades dosificadas de gases de escape con el aire fresco de admisión con el fin de reducir la temperatura máxima de combustión del motor, reduciendo con ello la proporción de óxidos de nitrógeno.

Se han realizado más de 50 pruebas diferentes con el sistema EGR, tanto con combustibles HFO como MDO, para hallar las tasas de recirculación de los gases de escape necesarias que cumplan con la normativa IMO Tier III, al tiempo que también se asegura un mínimo efecto en la eficiencia de la combustión y, por tanto, un menor aumento del consumo específico de combustible (SFOC por sus siglas en inglés).

Dichas pruebas dieron como resultado valores de admisiones de  $\text{NO}_x$  comprendidos entre los 3,4 g/kWh (establecido por Tier III) y los 5,1 g/kWh (valor que no se puede superar) para contenidos de oxígeno en el aire de barrido de un 15,5 % a un 18 %.

Los resultados obtenidos en el banco de pruebas y en el Alexander Maersk permiten afirmar que el futuro del EGR pasa por motores con inyección y escape controlado electrónicamente y equipados con turbosoplantes de geometría variable, dado que ofrecen un mayor control de los parámetros de inyección y aseguran una mayor relación de compresión de aire de carga.

## **6.2. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)**

Los primeros reactores SCR aparecen a finales de la década de los 70, los ingenieros de MAN Diesel Turbo (MDT) estuvieron implicados en las primeras aplicaciones para motores diesel de dos tiempos para barcos en el año 1989.

Esta tecnología todavía tiene que mejorar en algunos aspectos si nos referimos a aplicaciones para el mundo marino por lo que MDT, en colaboración con Hitachi Zosen, trabajan para ello.

### **6.2.1. Principio de funcionamiento**

- El proceso de SCR se basa en la reducción química de la molécula de  $\text{NO}_x$ , empleando un catalizador con sitios activados para incrementar la velocidad de la reacción de reducción.
- Un agente reductor (reactivo), es inyectado en forma controlada dentro del gas de postcombustión.
- El reactivo reacciona selectivamente con el gas de combustión  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrógeno) dentro de un rango específico de temperatura y en la presencia del catalizador y oxígeno para reducir al  $\text{NO}_x$  en nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Ver figura 6.2.1.1.

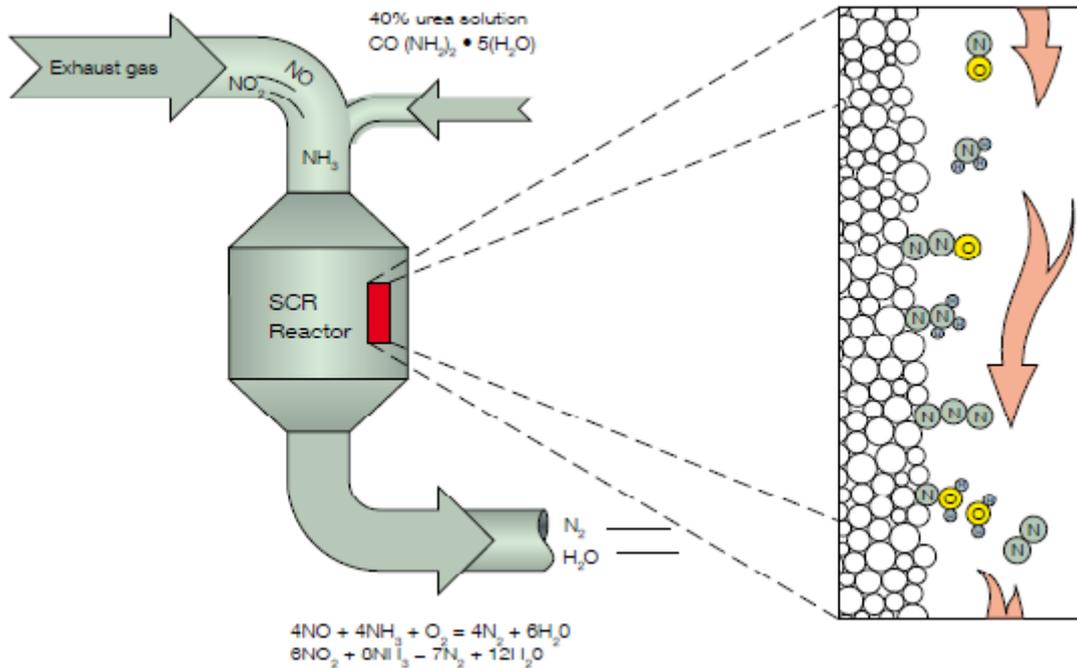


Figura 6.2.1.1: Principio de funcionamiento del sistema SCR

### 6.2.2. Modo de empleo

El amoníaco en forma de hidróxido amónico líquido, es vaporizado, diluido con aire e inyectado directamente en la corriente de gases a tratar a través de un distribuidor.

Los factores que influyen en la reducción son:

- Temperatura del gas de combustión
- Relación amoníaco- $\text{NO}_x$
- Concentración de  $\text{NO}_x$  a la entrada de la reducción catalítica selectiva
- Ubicación del sistema dentro del proceso
- Gasto volumétrico
- Condición del catalizador

### 6.2.3. Sistema SCR para motores MAN

Debido a la alta eficiencia energética de los motores marinos de dos tiempos, la temperatura de los gases de escape es baja después del turbocompresor. Estas temperaturas oscilan entre los 230 y 260 °C después del turbo, esta temperatura se ve afectada por diferentes parámetros como puede ser la temperatura ambiente, o bien, la carga del motor. Estas temperaturas causan problemas cuando se combustiona HFO.

La temperatura de los gases de escape idónea a la entrada del SCR sería de 330-350 °C cuando el motor trabaja con HFO.

Para la contribución de aumentar la temperatura de los gases de escape se dispondrá del reactor SCR en la zona de alta presión de la turbina.

Dependiendo de las carga del motor, esto hace posible obtener temperaturas de escape superiores comprendidas entre 50 °C y 175 °C más.

Esto quiere decir que el sistema SCR trabaja en función con lo siguiente: Cuando se precisa de reducción de  $\text{NO}_x$ , los gases de escape se dirigen al SCR en concordancia con el flujo ilustrado en la figura 6.2.3.1. Cuando no se precisa del funcionamiento del reactor SCR, los gases de escape fluyen directamente a la turbina permaneciendo sellado el SCR por dos válvulas.

$T_{\text{amb}} = 10^\circ\text{C}$	25% carga	50% carga	75% carga	100% carga
$T_{\text{in turb.}} (^\circ\text{C})$	299	308	337	395
$T_{\text{out turb.}} (^\circ\text{C})$	245	217	207	221
$T_{\text{gain}} (^\circ\text{C})$	54	92	130	174

Tabla 6.2.3.1: Temperaturas antes y después de la turbina basadas en un motor 6S50ME-C

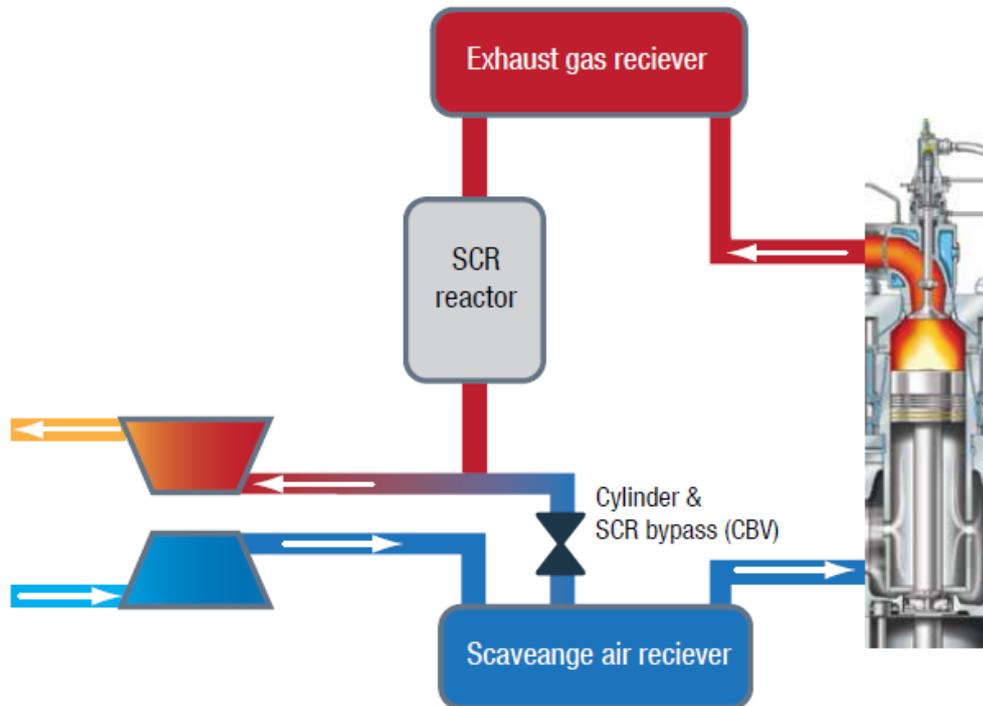


Figura 6.2.3.1: Esquema de un motor MAN con reactor SCR

La tabla 6.2.3.1 nos revela que aun colocando el reactor antes de la turbina, la temperatura de los gases de escape es todavía baja a cargas por debajo del 50%, por lo que se ha desarrollado un nuevo 'método de baja carga' capaz de incrementar la temperatura de los gases de escape, se trata de la válvula CBV mostrada en la figura 6.2.3.1.

Esta válvula (CBV) aumenta la temperatura de los gases de escape, mediante la reducción de la masa de aire a través de los cilindros, en una cantidad fija de la combustión de combustibles. Esto se traduce en que se obtienen temperaturas aceptables para el sistema SCR. Con este método la masa de aire que atraviesa el turbo permanece casi inalterada o, lo que es lo mismo, la presión del aire de barrido se mantiene con apenas variación en el proceso de combustión.

Desde el punto de vista de la cámara de combustión, el ‘método de baja carga’ conforma un desafío, ya que la masa de aire de refrigeración de los cilindros disminuye.

El sistema contará con un mecanismo electrónico para la gestión de los gases de escape, se trata de un ECU. Este equipo es necesario porque el SCR alberga una cantidad significativa de capacidad calorífica. Como el SCR está situado antes del turbocompresor se necesita de un mecanismo capaz de gestionar un equilibrio de la energía entre el turbo y el motor. Además será necesario un ‘by-pass’ para que los gases de escape pasen directamente al turbocompresor para el arranque o aumento de carga de tal modo que llegue suficiente energía a la entrada de la turbina.

### 6.3. Sistema de recirculación de gases EGR

El sistema EGR se ha probado en un motor de MAN 4T50ME-X de dos tiempos, este sistema está basado en la reintroducción de los gases de escape antes del enfriador de barrido, ver figura 6.3.1.

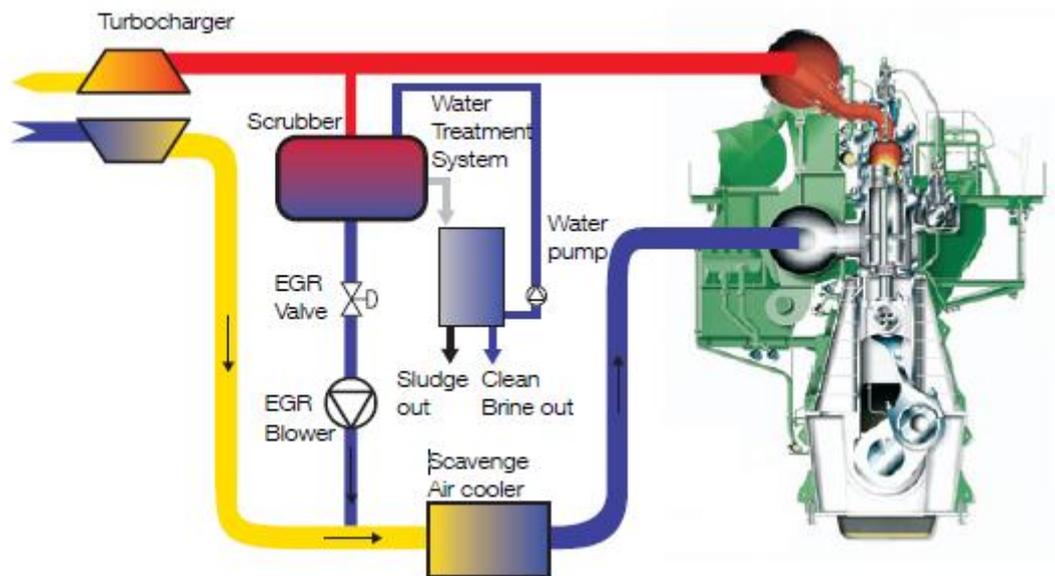


Figura 6.3.1: Esquema principal del sistema de recirculación de los gases de escape en un motor 4T50ME-X de MAN

Parte de los gases de escape se reintroducen en el motor desde el receptor de gases de escape pasando a continuación por el sistema de aire de barrido y turbosoplante. Un soplador eléctrico de alta presión (EGR 'blower') fuerza el gas de escape (3.3 bar) a través del depurador húmedo de los gases de escape (wet 'scrubber') hacia el enfriador de aire de barrido (scavenge air cooler) (3.7. bar).

El 'scrubber' elimina las partículas de  $\text{SO}_x$  y de hollín, y enfría el gas por humidificación previa a la reintroducción a la cámara de combustión. Los enfriadores de aire de carga enfrían la mezcla de gases de escape recirculados y limpian el aire hasta el punto de barrido de ajuste de temperatura de aire.

La figura 6.3.2 muestra la instalación real del sistema EGR aplicado al motor de prueba 4T50ME-X de MAN. Se trata de un sistema compuesto por un soplador de alta presión, 'scrubber', válvula de control, sistema de tratamiento de aguas y una unidad para el control basada en un mecanismo PLC para controlar el sistema de tratamiento de aguas. Un sistema dosificador de NaOH neutraliza el azufre de las aguas del depurador de los gases de escape.



Figura 6.3.2: Sistema EGR del motor 4T50ME-X de MAN

#### 6.4. Principio de un EGR

- La recirculación del gas de escape aumenta la capacidad de calor debido a la sustitución de  $O_2$  por  $CO_2$
- Se disminuye, por lo tanto, el contenido de  $O_2$  y se aumenta la capacidad de calor
- Alta capacidad de calor y baja emisión de  $O_2$  en el aire de barrido ofrece bajas temperaturas de combustión
- Las bajas temperaturas de combustión reducen las emisiones de  $NO_x$ , pero aumenta el SFOC

#### 6.5. Resultados de la investigación EGR del motor 4T50ME-X

A continuación se exponen los resultados de como un EGR influye en los diferentes parámetros de un motor MAN de dos tiempos, concretamente para el motor 4T50ME-X.

El estudio de las variaciones de los parámetros del motor durante funcionamiento con EGR revelan los siguientes efectos sobre el SFOC y emisiones, estos resultados se pueden comprobar en la tabla 6.5.1.

La reducción en la energía en la parte de la turbina del turbocompresor puede alcanzar el 40 % cuando el sistema EGR del motor se encuentra operativo, esto provoca un descenso en la presión del aire de barrido y por lo tanto efectos negativos con respecto al SFOC.

Esto pone de manifiesto la necesidad de realizar medidas para compensar esta pérdida de energía útil, una solución consiste hacer una derivación (bypass) de flujo de aire y gas que pasa por el cilindro para compensar la disminución de la presión de aire de barrido.

La figura 6.5.2 muestra las dos áreas diferentes en las que trabaja el turbocompresor cuando se encuentra en funcionamiento el sistema EGR y cuando no, correspondiéndose esta última con la solución 'cut-out' del turbo antes mencionada.

Como se puede ver en la figura 6.5.3 el calor liberado solo se ve afectado ligeramente por el EGR. Incrementado la presión hidráulica de la inyección se compensa la reducción del calor liberado en la primera parte de la reacción de combustión.

	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>dSFOC</b>	<b>CO</b>	<b>P<sub>max</sub></b>	<b>% EGR</b>	<b>O<sub>2</sub></b>
	<b>(g/kWh)</b>	<b>(g/kWh)</b>	<b>(g/kWh)</b>	<b>(bar)</b>		<b>(%vol)</b>
<b>No EGR</b>	17.8	0	0.65	152	0	-
<b>Max. EGR</b>	2.3	+4.9	40.17	151	39	16.0
<b>EGR ref</b>	3.7	+3.0	2.57	151	36	16.8
<b>Incr. P<sub>com</sub>/P<sub>barrido</sub></b>	4.0	+2.5	2.18	156	36	16.8
<b>Incr. P<sub>hidráulica</sub></b>	4.2	+2.8	1.83	151	37	16.6
<b>Incr. P<sub>barrido</sub></b>	3.6	+1.9	2.12	156	37	16.6
<b>Incr. T<sub>barrido</sub></b>	3.9	+3.6	2.82	156	34	16.8
<b>Tier III</b>	3.4	+0.6	1.34	157	41	16.2

Tabla 6.5.1: Resultados del test sobre las variaciones en los parámetros del motor para una carga del 75%(energía empleada en disminución de EGR, depuradora de combustible y bombas no incluidas en dSFOC).

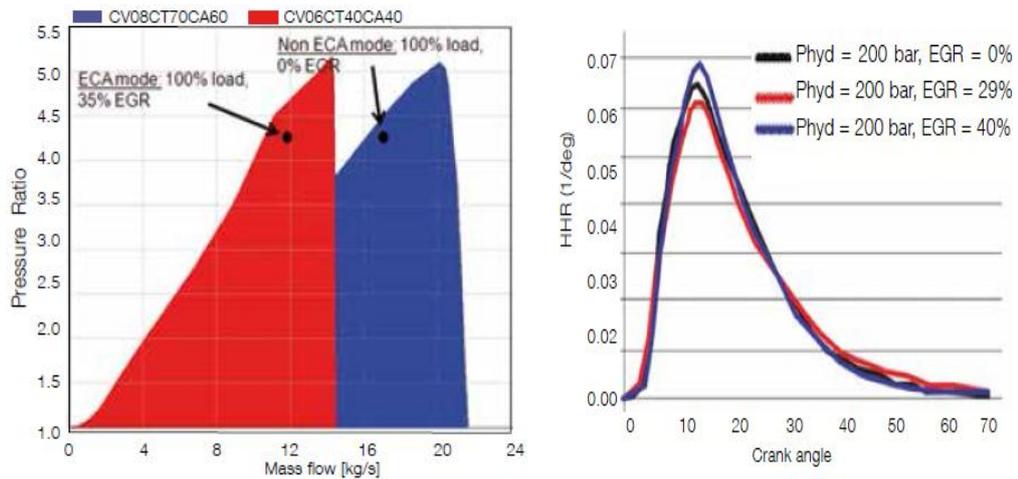


Figura 6.5.2: Curvas de operación del turbocompresor y calor liberado con y sin EGR

### 6.5.1. Efectos del sistema EGR con respecto al SFOC

- Incrementa la relación  $P_{\text{comp}}/P_{\text{barrido}}$ , contribuyendo a un aumento del SFOC
- Incrementa la  $P_{\text{hidráulica}}$ , contribuyendo a un aumento del SFOC
- Incrementa la  $P_{\text{barrido}}$ , contribuyendo a un aumento del SFOC
- Incrementa la  $T_{\text{barrido}}$ , contribuyendo a un descenso del SFOC

### 6.5.2. Efectos del sistema EGR con respecto al $\text{NO}_x$

- Incrementa la  $P_{\text{barrido}}$ , lo que supone un efecto ligeramente positivo con respecto al  $\text{NO}_x$ .
- Incrementa la  $P_{\text{hidráulica}}$ , lo que supone un efecto moderadamente negativo sobre la formación de  $\text{NO}_x$
- Incrementa la relación  $P_{\text{comp}}/P_{\text{barrido}}$ , lo que supone un efecto ligeramente negativo sobre la formación de los  $\text{NO}_x$
- Incrementa la  $T_{\text{barrido}}$ , lo que supone un efecto ligeramente negativo sobre la formación de los  $\text{NO}_x$

### 6.5.3. Efectos del sistema EGR con respecto al CO

- Incrementa la  $P_{\text{hidráulica}}$ , lo que supone un efecto positivo significativo con respecto al CO
- Incrementa la  $P_{\text{barrido}}$ , lo que supone un efecto moderadamente positivo sobre el CO
- Incrementa la relación  $P_{\text{comp}}/P_{\text{barrido}}$ , lo que supone un efecto moderadamente positivo sobre el CO
- Incrementa la  $T_{\text{barrido}}$ , lo que supone un efecto moderadamente negativo sobre la formación del CO

### 6.6. Repercusión en cilindros causado por EGR

Cuando el sistema EGR se encuentra operativo en motores lentos de dos tiempos funcionando en modo gasoil, la composición química del aire de barrido que entra en la cámara de combustión se ve alterada. El contenido en  $O_2$  es inferior, sin embargo, el contenido de  $CO_2$  y CO (trabajando con WIF) aumenta al ser recirculados a la cámara de combustión. Lo mismo ocurre para el contenido de  $SO_x$  ( $SO_2$  y  $SO_3$ ) hasta cierto punto, lo cual dependerá de la eficiencia de la depuradora de gases. También incrementa la cantidad de hidrocarburos, hollín y  $H_2O$ .

Tanto los  $SO_x$  (en forma de ácido sulfúrico) como el  $H_2O$  se consideran potencialmente peligrosos con respecto a los cilindros (corrosión) si se presentan en forma de gotas.

La presencia de gotitas de agua que entran en la cámara de combustión debe ser reducida al mínimo por el sistema de agua nebulizada, y la presencia de  $SO_x$  debe ser controlada mediante la adición de NaOH al agua del depurador.

El estado en el que se encuentran los cilindros se ha investigado antes y después de 100 horas de funcionamiento con EGR, como conclusión del test podemos añadir que no hay efectos negativos sobre las camisas, pistones, anillos etc, ver figura 6.6.1.

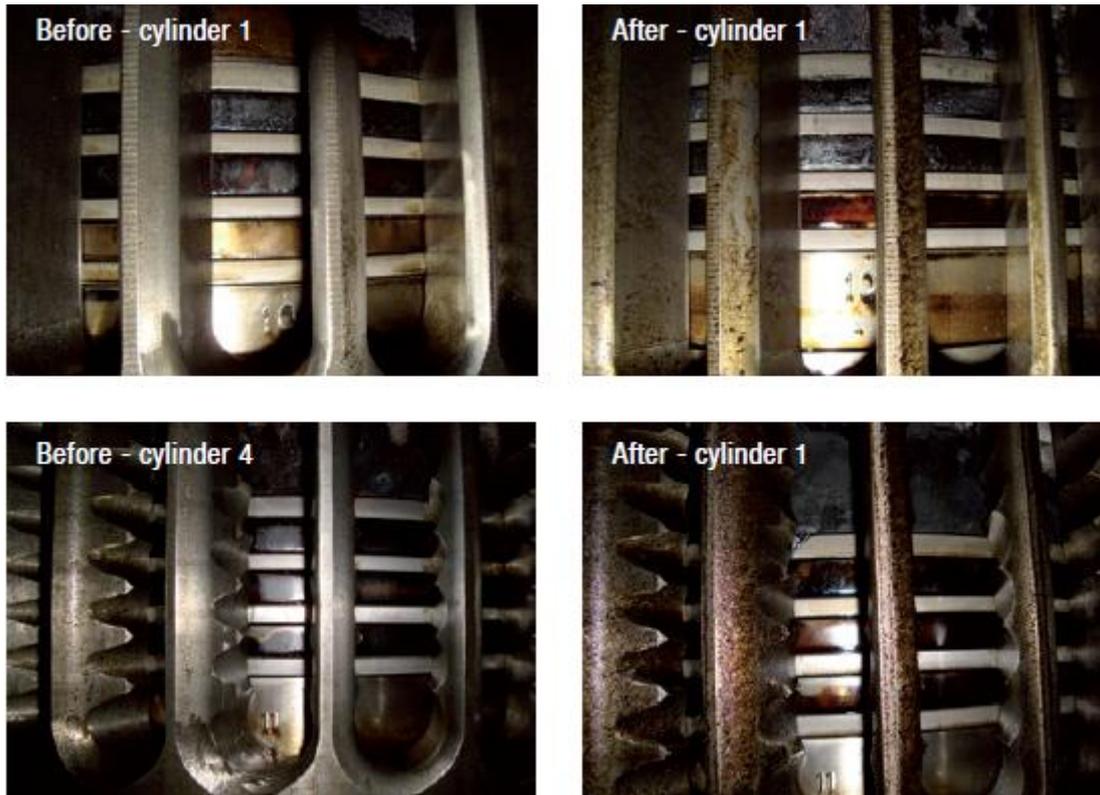


Figura 6.6.1: Estado de los cilindros antes y después de más de 100 horas de funcionamiento con EGR

### 6.7. Rendimiento del 'scrubber'

Recientemente, un test de un EGR 'scrubber' se llevó a cabo sobre el motor 4T50ME-X para investigar la influencia en la eficiencia de lavado en húmedo debido a la variación de los diferentes parámetros en el proceso de lavado.

El cometido de la depuradora de gas es proteger la cámara de combustión, así como los otros componentes del motor expuestos al ácido sulfúrico junto con el hollín provocado por la quema HFO con un alto contenido de azufre.

Parámetros que varían:

- Flujo de agua en el 'scrubber'
- variaciones de flujo previas al 'scrubber'
- Variaciones del pH
- Las variaciones de piezas de hardware internas en el 'scrubber'

La investigación concluyó que el proceso de lavado en húmedo elegido resulta ser un modo eficiente para limpiar los gases de escape. Los resultados de la prueba mostraron las siguientes cifras genéricas:

- Hasta un 98 % de eliminación para el SO<sub>2</sub> con respecto al 90 % típico
- Hasta un 92 % de eliminación de hollín (ISO8178) con respecto al 70-80 % típico

La eliminación de SO<sub>2</sub> en el proceso de depuración mostró una clara relación con la cantidad de NaOH agregada en el agua de lavado, y por lo tanto a los valores del pH.

La figura 6.7.1 muestra la eliminación partículas sólidas (hollín) en el 'scrubber' durante un programa de prueba realizado en agosto de 2011. Como se puede ver en la figura, la eliminación de hollín o PM (particulate matter por sus siglas en inglés) resulta entre el 60 y 95 %, lo que es mejor que lo que se ve normalmente en las torres de lavado de postratamiento. Se espera que el rendimiento optimizado de depuración es a causa del hecho de que las propiedades del hollín aguas arriba de la turbina son diferentes a las propiedades del hollín en condiciones ambientales.

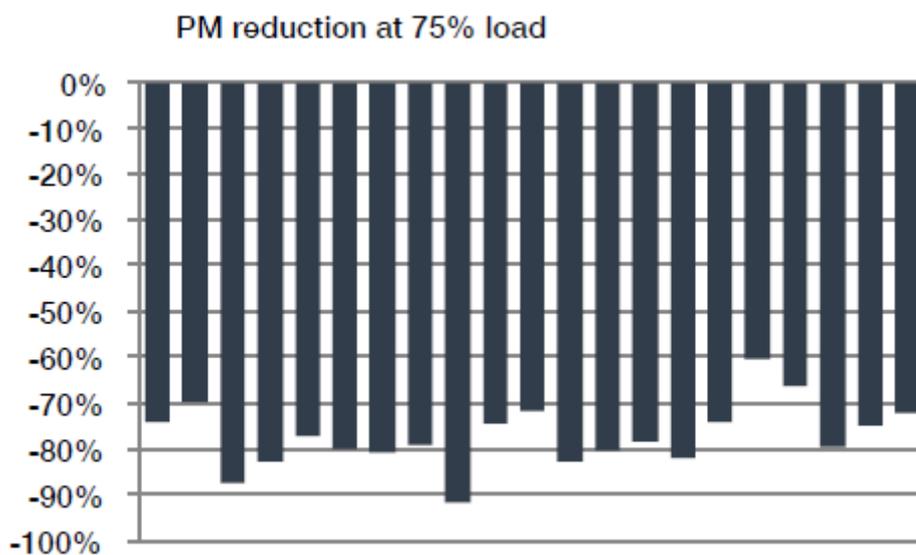


Figura 6.7.1: Reducción de las partículas sólidas en el 'scrubber'

La figura 6.7.2 muestra un análisis referente a la composición química de las partículas de hollín antes y después de su paso por el 'scrubber' y después de su paso por el turbocompresor. El depurador elimina todas las cenizas y carbono elemental del gas de escape.

En el agua del 'scrubber' podemos encontrar  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  provocadas por la reacción del azufre con el agua, también podemos encontrar  $\text{H}_2\text{SO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por causa de los  $\text{NO}_x$ .

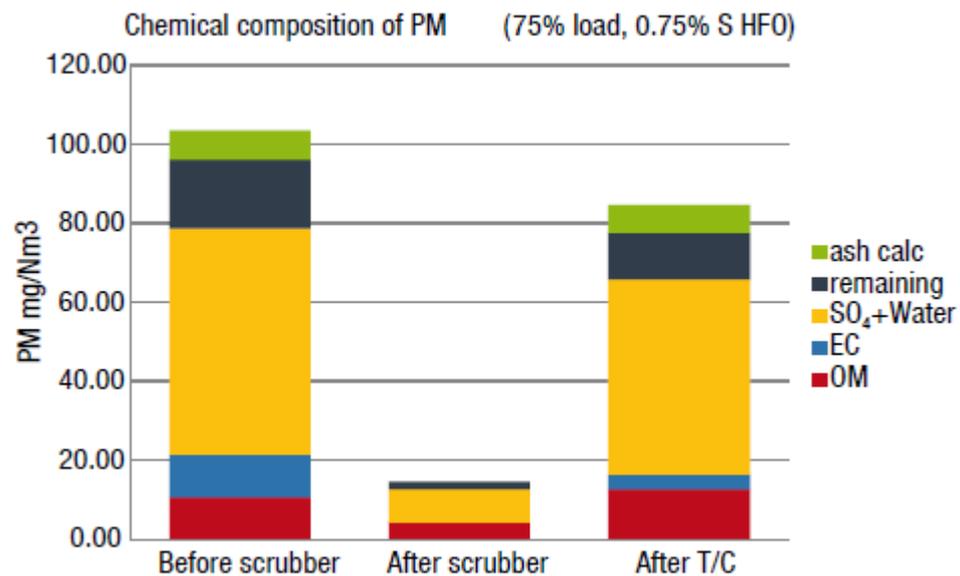


Figura 6.7.2: Reducción de inquemados a través del 'scrubber'

Las conclusiones de los test realizados a los wet 'scrubber's son las siguientes:

- La buena eliminación de  $\text{SO}_2$  está significativamente vinculada a la adición de cierta cantidad de  $\text{NaOH}$  al agua del 'scrubber'.
- La buena eliminación de partículas sólidas (hollín) está ligeramente influida por algunos detalles del diseño constructivo.
- Las cenizas junto con el carbón elemental son casi eliminados por completo

- Se debe evitar el contacto del agua procedente del 'scrubber' con elementos constructivos del buque con el fin de evitar riesgos de contaminación por causa del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### **6.8. Water treatment system (WTS)**

El EGR WTS system forma una parte importante del sistema EGR ya que el agua procedente del 'scrubber' contiene partículas sólidas que tienen que ser eliminadas y así evitar obstrucciones en el sistema. Además, el agua formada durante el procedimiento de la combustión que se condensa en el EGR cooler, se tiene que evacuar al mar (en condiciones óptimas), y así evitar grandes tanques de almacenamiento a bordo.

El WTS fundamentalmente está formado por el dosificador de NaOH, el control para el flujo del agua y el control para la descarga.

Para hacer que la instalación WTS sea una instalación flexible, el módulo WTS está dividido en dos unidades:

- Módulo WTS1, ver figura 6.8.1, formado por los separadores, bombas de los 'scrubber's, dosificador de NaOH, etc.
- Módulo WTS2, (módulo de recogida de tanque) para el transporte del agua del 'scrubber' (WTS1) hacia la zona de abajo del motor situada cerca de la unidad EGR que se encuentra en el motor.

El WTS system es un sistema auxiliar necesario para el funcionamiento con sistema EGR debido a las siguientes funciones:

- Control de la correcta entrega de agua al EGR 'scrubber'.
- Fiabilidad y condiciones limpias en el 'scrubber' system.
- Correcta dosificación de NaOH
- Control de la concentración de sales en el agua del 'scrubber'.
- Conformidad con las regulaciones de la IMO con respecto a las aguas de descarga a la mar.
- Mínima producción de 'sludge'.

Como se puede observar en la figura 6.8.2, el WTS sistema está dividido en dos módulos. El módulo 1 incluye los separadores, ambos para la limpieza del agua del 'scrubber' suministrada a la unidad EGR y también para la limpieza del agua de descarga a la mar. Toda agua suministrada al EGR 'scrubber' se limpia o depura con el fin de garantizar un funcionamiento fiable evitando la formación de nuevos depósitos. El módulo WTS1 controla la cantidad de agua del 'scrubber' en el sistema por descarga de agua o adición de agua dulce. El WTS system cumple con los criterios de la IMO con respecto a la depuración de las aguas que van a ser vertidas a la mar.

Los siguientes parámetros definen los requisitos del motor con respecto al WTS system:

- Flujo de agua del 'scrubber' en la admisión
- Presión de admisión para el agua del 'scrubber'
- Temperatura en la admisión en el agua del 'scrubber'
- Calidad en la admisión del agua del 'scrubber'

- *Valor del pH*

- *Concentración de sales*

- *Sólidos*

- *Capacidad de drenaje*

El objetivo de los estudios actuales es definir todos los valores específicos necesarios para los parámetros mencionados anteriormente.

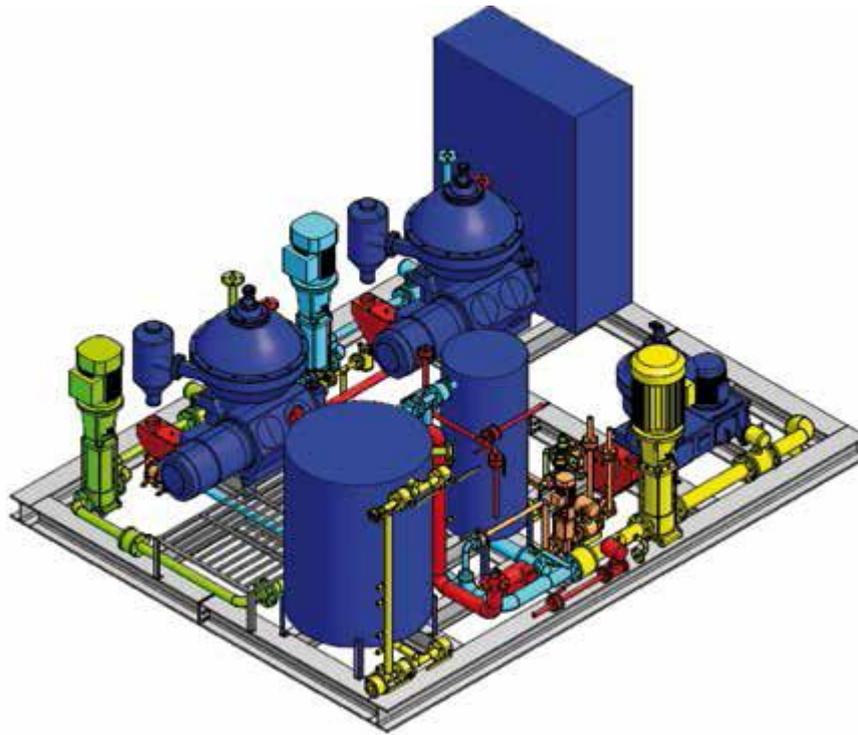


Figura 6.8.1: Módulo WTS1 de Alfa Laval para motor de 23 MW (4x5m)

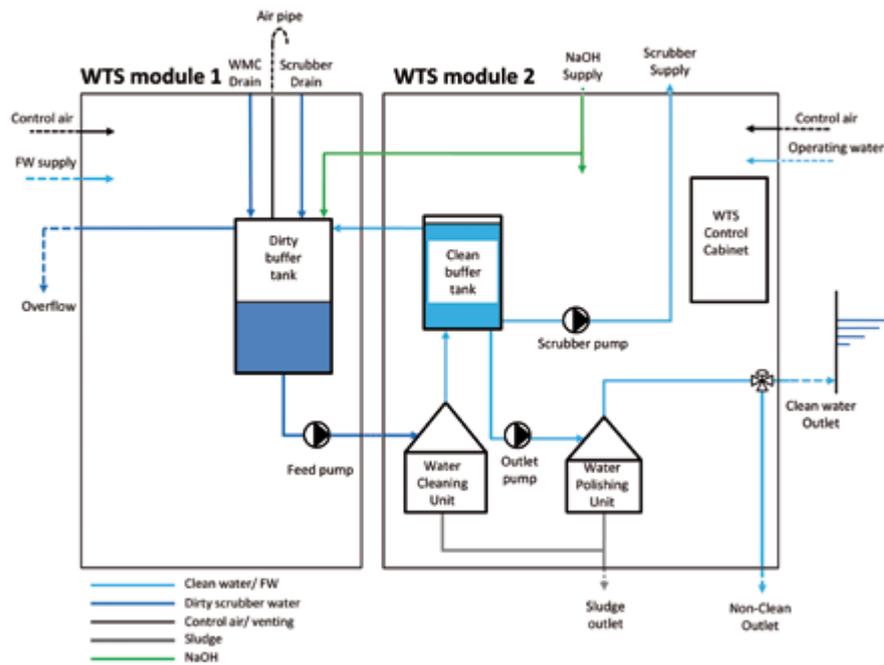


Figura 6.8.2: Diagrama de flujos en WTS system

### 6.9. EGR 'blower' de alta velocidad

MAN Diesel & Turbo se ha involucrado en el desarrollo del nuevo EGR 'blower' de alta velocidad para así mejorar el proceso EGR, particularmente en la reducción de potencia auxiliar. El EGR 'blower' de alta velocidad tiene de una eficiencia termodinámica significativamente superior a los diseños anteriores, este equipo está basado en un turbocompresor radial que trabaja con velocidades 2-3 veces superiores que un turbocompresor radial convencional.

La figura 6.9.1 muestra el EGR 'blower' empleado con el motor 4T50ME-X mencionado anteriormente. Sus características son las siguientes:

- Potencia: 200 kW
- Incremento de presión: 600 mbar
- Flujo másico: 4 kg/s (para 31°C de temperatura de admisión)
- Peso: 600 kg
- Flujo de aceite para la lubricación: 60 l/min
- Flujo de agua de refrigeración: aprox. 2 m<sup>3</sup>/h



Figura 6.9.1: EGR 'blower' empleado para el sistema EGR del motor 4T50ME-X de MAN

---

## **7. CONCLUSIONES**

---



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA Y  
MÁQUINAS**

**JUNIO 2015**

## 7.1.CONCLUSIONES GENERALES

Los motores de dos tiempos MAN B&W ME-GI o ME-LGI son idóneos para todos los casos en que se necesite disponer de producción de energía fiable, flexible y con un reducido consumo.

Aparte de los combustibles tradicionales, como el fueloil y el gas natural, es posible emplear metanol, etanol, biocombustibles, biocombustibles sintéticos y biogases sintéticos obtenidos a partir de residuos vegetales o de pirolisis.

Actualmente, la falta de instalaciones de abastecimiento o 'bunkering' de combustibles alternativos parece ser el mayor obstáculo a superar, sin embargo, hay proyectos en curso para establecer facilidades. Consecuentemente en Estocolmo o en el puerto de Zeebrygge contarán con un 'bunkering' de LNG en los años venideros. Lo mismo sucederá con muchos otros lugares de todo el mundo.

## 7.2.CONCLUSIONES RELATIVAS A FGSS:

- **Metaneros de nueva construcción**

Para metaneros de nueva construcción la tasa de evaporación (boil-off rate) se reduce del 0.15% al 0.10% por día, debido al aumento de la capa de aislamiento en los tanques de carga LNG. Esto ha dado lugar a que el exceso de BOG se ha ido consumiendo con el motor ME-GI en funcionamiento. Debido a esto el compresor simple de Laby-GI resulta una solución económicamente atractiva para los armadores que consideren únicamente el gas como combustible en sus metaneros.

- **Metaneros con flexibilidad de combustible**

Para armadores interesados en metaneros que ofrezcan flexibilidad de combustible se recomienda instalar un sistema de suministro gaseoso combinado con una planta de relicuefacción.

- **Buques LPG/c y otros**

Para buques LPG y otros que utilicen un motor ME-LGI, el uso del LPG como combustible está disponible, debido a que fabricantes como Hamworthy Gas Systems y TGE ofrecen sistema de suministro gaseoso para estos casos.

Se conseguirán niveles de emisiones más bajos y costos de combustible inferiores si comparamos los precios del LPG con el fueloil.

### 7.3.CONCLUSIONES CON RESPECTO A SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

- **Reducción Selectiva Catalítica (SCR)**

La aplicación de la reducción selectiva catalítica SCR en un motor MAN B&W de dos tiempos se demostró por MAN Diesel & Turbo junto con Hitachi Zosen Corporation. Se ha concluido con que el SCR ofrece una reducción suficiente de los NO<sub>x</sub> que aseguran el cumplimiento del IMO Tier III.

El método de baja carga proporciona la temperatura de operación mínima deseada que suprime la precipitación no deseada de bisulfito de amonio en los elementos catalizadores. Además, se ha encontrado que el sistema de control del motor recién desarrollado es capaz de cumplimentar con la regulación IMO Tier III en todos los aspectos: calentamiento del sistema, de aceleración / deceleración y arranque / parada del sistema SCR.

Mejoras con respecto al motor:

- ❖ Pre-turbina SCR para el más alto nivel posible de temperatura
- ❖ Método de baja carga para asegurar temperatura idónea
- ❖ Sistema de control

Mejoras con respecto al sistema SCR

- ❖ Inyección y mezcla de urea
- ❖ Elementos SCR para asegurar funcionamiento con HFO
- ❖ Sistema de control SCR
- ❖ Correcta instalación

- **Sistema de recirculación de los gases de escape (EGR)**

El sistema de recirculación de gases EGR para motores MAN B&W de dos tiempos ha sufrido mejoras en la última década ya que se han optimizado los siguientes equipos:

- ❖ Sistema de pulverización de agua para pre enfriar los gases de escape
- ❖ Enfriadores húmedos capaces de resistir a la corrosión provocada por la condensación de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- ❖ 'Scrubbers' con alta capacidad de eliminación de  $\text{SO}_2$  y partículas sólidas
- ❖ EGR 'blowers' de alta velocidad y alta eficiencia
- ❖ 'Water treatment systems' capaces de eliminar partículas sólidas de manera eficiente
- ❖ Sistema de control sencillo con pulsador para controlar funcionamiento de EGR
- ❖ Estrategias de control que aseguran un rendimiento óptimo del motor para la regulación IMO Tier III en zonas ECA.

## 8.REFERENCIAS

Para la realización de este proyecto se consultaron las siguientes fuentes bibliográficas:

- Informe técnico: Service Experience of Mitsui Gas Injection Diesel Engines, Mitsui-MAN B&W 12K80MC-Gi-S and Mitsui8L42MB-G, Copenhagen 1998
- Informe técnico: Service Experience of the World's First Large-Bore Gas-Injection Engine, ISME Tokyo 2000
- Informe técnico: ME Engines - The New Generation of Diesel Engines, P412, Octubre de 2003
- Informe técnico: Basics Principles of Ship Propulsion, p.254-01.04, Enero de 2004. MAN B&W Diesel A/S.
- Informe técnico: LNG with Low Speed Diesel Propulsion, Ole Grøne, The SNAME Texas Section 14 th Annual Offshore Symposium, Noviembre de 2004, Houston, Texas.
- Informe técnico: ME-GI Engines for LNG Application, System Control and Safety, Febrero de 2005. Ole Grøne, Kjeld Aabo, Rene Sejer Laursen, MAN B&W Diesel A/S, Steve Broadbent, Flotech.
- Informe técnico: Guidelines for Fuels and Lubes Purchasing, 5510-0041-00ppr, Febrero de 2009
- Two-stroke Low Speed Diesel Engines – for Independent Power Producers and Captive Power Plants, 5510-0067-00ppr, Mayo de 2009

- Informe técnico: Tier III compliance Low Speed Engines, 5510-0088-00ppr, Julio de 2010, Dinamarca
- Buques de Transportes Especiales. E.T.S.N.M. de la U.D.C. Julio Louro.
- Informe técnico: ME- GI dual Fuel MAN B&W Engines, A Technical, Operational and cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas, 5510-0063-03ppr, Marzo de 2012
- Informe técnico: Stationary MAN B&W MEGI-S, Engines for Dual Fuel Applications, 5510-0097-00ppr, Agosto de 2010
- Informe técnico: Tier III Two-Stroke Technology, MAN Diesel & Turbo, 5510-0125-00ppr, Agosto de 2012, Dinamarca
- Informe técnico: ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines, A Technical Operational and Cost –effective Solution for Ships fuelled by Gas, 5510-0063-05ppr, Octubre de 2013
- Informe técnico: Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series, 5510-0172-00ppr, Agosto de 2014
- Informe técnico: Laby®-GI Compressors, Octubre de 2014, Suiza.