PROYECTO FINAL DE CARRERA

INSTALACIÓN Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE PARA UN BUQUE RO-RO

INGENIERÍA TÉCNICA NAVAL
ESPECIALIDAD EN PROPULSIÓN Y SERVICIOS DEL BUQUE

SEPTIEMBRE 2014

AUTORA: **MIHAELA SIN**

DIRECTOR: **RAMÓN GRAU MUR**

Facultat de Nàutica de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

INTRODUCCIÓN

En este proyecto final de carrera se ha estudiado la problemática de la presencia del azufre en el origen de los combustibles marinos, así como sus consecuencias por las reacciones que se llevan a cabo en la combustión, que dan lugar a emisiones de óxidos de azufre perjudiciales para la atmósfera.

Debido a las futuras normativas que entrarán en vigor regulando las emisiones de contaminantes perjudiciales para el medio ambiente, se ha realizado una descripción de las medidas que existen en el mercado para los barcos, tanto de nueva construcción como aquellos ya en servicio, para el cumplimiento con las regulaciones respecto a las emisiones de óxidos de azufre, diferenciándose entre medidas para evitar la formación de óxidos de azufre y medidas para eliminar los óxidos una vez formados por la combustión.

En la segunda parte del proyecto se ha centrado el estudio en los sistemas de limpieza de gases de escape de los buques, es decir, una vez producidos los óxidos de azufre, haciendo una descripción de los distintos tipos de sistemas, secos y húmedos.

A continuación, se ha aplicado la instalación de un sistema de limpieza de gases de escape a un buque mercante RO-RO que actualmente está operando con un combustible de alto contenido en azufre. Por último, una vez obtenidos los resultados del diseño de la instalación y su situación en el buque se ha analizado su viabilidad técnica.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 3
ÍNDICE 5
ÍNDICE DE TABLAS 7
ÍNDICE DE FIGURAS 7
1 PROBLEMÁTICA DEL AZUFRE 9
1.1 ORIGEN 9
1.2 PRESENCIA EN EL COMBUSTIBLE Y SUS CONSECUENCIAS 9
1.2.1 SALUD Y MEDIO AMBIENTE 10
2 CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA 13
2.1 NORMATIVA INTERNACIONAL Y EUROPEA 13
2.2 MEDIDAS PROPUESTAS PARA EL CUMPLIMIENTO 17
2.2.1 MÉTODOS PRIMARIOS 17
2.2.2 MÉTODOS SECUNDARIOS 30
3 SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE 33
3.1 SCRUBBER DE TIPO SECO 34
3.2 SCRUBBER DE TIPO ABIERTO 35
3.2.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE TIPO ABIERTO 37
3.3 SCRUBBER DE TIPO CERRADO 38
3.3.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE TIPO CERRADO 39
3.4 SCRUBBER DE TIPO HÍBRIDO 43
3.5 MARCO LEGAL DE LOS SISTEMAS SCRUBBER 45
3.5.1 PLAN A 46
3.5.2 PLAN B 48
3.6 MONITOREO DE LAS EMISIONES DEL SCRUBBER Y ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES 50
4 APLICACIÓN DEL SISTEMA A UN BUQUE RO-PAX 57
4.1 DESCRIPCIÓN DEL BUQUE DEL PROYECTO 57
4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GASES DE ESCAPE 59
4.1.2 SISTEMA DE TUBERÍAS DE LOS GASES DE ESCAPE 60
4.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE EN EL BUQUE 61
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA 61
4.2.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA 66
4.2.3 CÁLCULO DE LOS DETALLES DEL SISTEMA DE LGE SOx 71

4.2.4 CÁLCULOS 71
4.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA IMPLEMENTADO 76
4.3.1 DISPOSICIÓN DEL SISTEMA EN EL BUQUE 76
5 CONCLUSIONES 79
6 BIBLIOGRAFÍA 81
6.1 LIBROS 81
6.2 DOCUMENTOS Y ARTÍCULOS 81
6.3 WEBGRAFÍA 83
7 ANEXOS 85
7.1 Modelo de Certificado de Cumplimiento de las Emisiones de SOx 85
7.2 Prueba del Método basado en la Relación SO_2/CO_2 86
7.3 DATOS DE LOS MOTORES DEL BUQUE RO-PAX ZURBARÁN 90
7.4 PLANOS DEL BUQUE ZURBARÁN 93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Estado de los Anexos del Convenio MARPOL a fecha de 30 de Septiembre 2012..... 13
Tabla 2 - Límites establecidos para el contenido en azufre del combustible usado a bordo 14
Tabla 3 - Áreas de Control de Emisiones y fechas de entrada en vigor. 16
Tabla 4 – Características del Fuel Oil Intermedio..... 19
Tabla 5 – Características del Gas Oil Marino..... 20
Tabla 6 – Características del Diesel Oil Marino 21
Tabla 7 – Variación del precio del Combustible desde 1990 hasta 2009..... 22
Tabla 8 – Variación del precio del Combusible desde 2012 hasta 2014. 22
Tabla 9 – Costes de explotación de buque según la medida adoptada. 23
Tabla 10 – Número de barcos que navegan por las ECAs y tiempo que lo realizan. 23
Tabla 11 - Límites del contenido de azufre del fueloil y valores de emisión 46
Tabla 12 – Características y dimensiones del buque Zurbarán..... 58
Tabla 13 – Eficiencia requerida por los sistemas Scrubber. 62
Tabla 14 – Especificaciones Técnicas de la solución de Soda Caústica. 68
Tabla 15 – Capacidad del tanque de Circulación del sistema cerrado..... 69
Tabla 16 – Características de los motores de la planta propulsora del buque RO-PAX..... 71
Tabla 17 – Consumo de sustancia de NaOH por l/h para los dos sistemas scrubber 73
Tabla 18 – Solución de NaOH consumida. 73
Tabla 19 – Producción de lodos según el perfil de navegación del buque. 74
Tabla 20 – Consumo de agua dulce según el perfil de navegación del buque. 74
Tabla 21 - Consumos según perfil de navegación del buque 75
Tabla 22 - Consumo absoluto utilizando circuito abierto/cerrado 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Contenido en azufre en los combustibles marinos. 24
Figura 2 - Fluctuación de los precios del combustible entre Octubre 2006 y Marzo 2009 28
Figura 3 – Esquema de un sistema marino de limpieza de gases de escape 33
Figura 4 – Ejemplo de instalación de Scrubber Seco a bordo de un buque..... 34
Figura 5 – Esquema básico del Sistema Marino de Scrubber de Agua de Mar tipo Abierto 35
Figura 6 – Sistema Básico del Sistema Marino de Scrubber de Agua Dulce tipo “Cerrado”..... 38
Figura 7 – Esquema de un circuito híbrido de un Sistema LGE. 39
Figura 8 – Esquema de Funcionamiento del circuito cerrado de un sistema LGE. 40
Figura 9 – Esquema de las mediciones y valores límites de pH del agua de lavado 51
Figura 10 – Esquema de las mediciones de los valores de pH para calibrar el límite..... 52
Figura 11 – Buque RO-PAX Zurbarán atracado en el Puerto de Mahón 58
Figura 12 – Esquema de la conexión de las tuberías de gases de escape del motor..... 59
Figura 13 – Especificación del diámetro de las tuberías de gases de escape del motor. 59
Figura 14 – Elementos del Sistema Externo de Gases de Escape de un Motor Diesel. 60
Figura 15 – Ejemplo de sistema híbrido de Limpieza de Gases de Escape en un buque. 67
Figura 16 – Esquema de la disposición de los elementos del sistema en la sala de máquinas .. 76
Figura 17 – Esquema de la Planta de la Sala de Motores Principales y Auxiliares..... 77
Figura 18 – Instalación Scrubber en el buque RO-PAX Ficaria. Fuente: MAN Diesel & Turbo.... 78

1 PROBLEMÁTICA DEL AZUFRE

1.1 ORIGEN

Las emisiones de óxidos de azufre, SOx, entre los que se encuentran el dióxido de azufre, SO_2, y el trióxido de azufre, SO_3, son resultados directos del contenido en azufre del combustible. Durante el proceso de la combustión del combustible con contenido en azufre, éste se oxida rápidamente dando lugar a la formación de SO_2. Y una pequeña fracción del dióxido de azufre formado, el 3-5%, puede además oxidarse, entre la cámara de combustión y el conducto de escape como trióxido de azufre, SO_3.

La cantidad real de emisiones depende de la temperatura de combustión y la presión, del exceso de aire y del contenido en azufre del combustible. El proceso se promueve por la presencia de óxidos de hierro y vanadio que actúan como catalizadores. En los gases de escape, ocurre una reacción entre el SO_3 y el vapor de agua que forma el ácido sulfúrico (H_2SO_4). Por encima de 450º C el ácido sulfúrico será disociado casi completamente, pero a medida que la temperatura decrece, aumentará proporción presente como vapor ácido que se enfría y se expone sobre superficies relativamente frías, condensándose y llegando al punto de rocío.

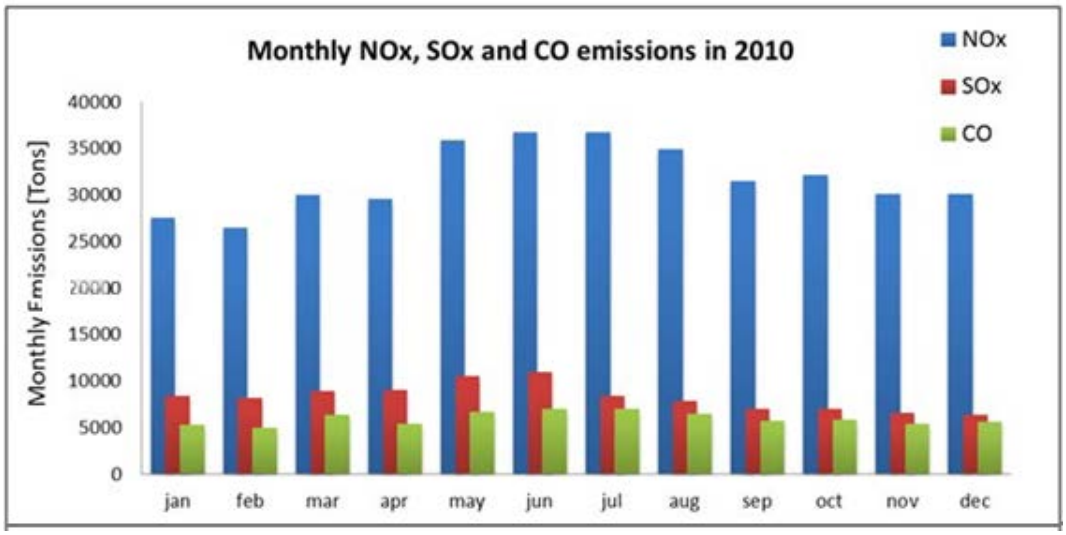


Figura 1 - Emisiones del transporte marítimo en el Norte de Europa durante el 2010. Fuente: Helcom.fi

1.2 PRESENCIA EN EL COMBUSTIBLE Y SUS CONSECUENCIAS

El azufre es un elemento que se produce de forma natural en el petróleo crudo y que se concentra en el residuo de destilación de la refinería. La cantidad de azufre en el combustible, depende, principalmente, de la fuente del petróleo crudo y, por lo tanto, en menor grado, de los procesos de refino. El contenido en azufre del combustible residual de todo el mundo puede variar desde un 1% en peso (LSFO – Low Sulphur Fuel Oil) hasta más de un 4% siendo la media de un 2.7% en peso de azufre.

Durante la combustión en un motor diesel, el azufre del combustible se oxida dando lugar a dióxido de azufre (SO_2). Una pequeña parte de del SO_2, aproximadamente un 3% - 5%, se va oxidando hasta dar lugar a trióxido de azufre (SO_3). Estos productos oxidantes tienen efectos tanto en la maquinaria del buque como en el medio ambiente cuando son emitidos a la atmósfera.

Dentro de los cilindros de los motores, se producen desgastes debidos principalmente a la corrosión creada por la condensación del ácido sulfúrico, creada en la reacción de SO_3 con el vapor de agua de los gases de escape. Este problema es contrarrestado por el diseño del motor, su correcta operación y lubricación. Para motores de velocidad media es necesario utilizar aceites lubricantes con una alcalinidad que sea compatible con el contenido en azufre del combustible que se quema tal como recomienda el fabricante.

1.2.1 SALUD Y MEDIO AMBIENTE

El SO_2 es un gas tóxico que afecta directamente a los humanos. Es más pesado que el aire y en una concentración de alrededor de 500 ppm (partes por millón) puede ser mortal para los humanos. A niveles más bajos, el dióxido de azufre puede ser el responsable de problemas respiratorios tanto en humanos como en animales e irritaciones de los ojos, además se pueden agravar enfermedades ya existentes, como el infarto de miocardio. Los efectos dependen de la concentración y tiempo de exposición, pero no tiene porque aparecer ningún tipo de enfermedad en una persona sana si la concentración es menor de 20 ppm.

La concentración de azufre en la atmósfera es normalmente menor de 10 ppm, según la información de la EPA[1] que indica que la concentración anual actual en los Estados Unidos es del rango de 1 a 6 partes por millón aproximadamente.

En la corriente de los gases de escape también se forman las partículas finas o aerosoles, que afectan a su vez, a la función respiratoria y pueden llegar a dañar el tejido pulmonar. Estas deposiciones secas del gas y partículas no sólo afectan a la población humana sino también dañan la vida vegetal por el contacto con las hojas y follaje.

Los óxidos de azufre no afectan al lugar donde se emiten, sino que se pueden transportar a distancias considerables, y en el proceso se convierten en ácidos al reaccionar con el vapor de agua de la atmósfera. Los aerosoles resultantes precipitan en forma de niebla, nieve o la llamada “lluvia ácida” en un proceso conocido como “deposición húmeda”. Sin la contribución del hombre, la contaminación del agua de lluvia es ligeramente ácida, aproximadamente con un pH 5-6, debido a la formación de ácido carbónico de CO_2 disuelto. Pero la lluvia ácida se ha medido con niveles por debajo de un pH 3, que correspondería a vinagre.

La lluvia ácida tiene impactos directos e indirectos sobre los ecosistemas. Algunos suelos alcalinos y aguas tienen la capacidad de neutralizar los ácidos, pero en zonas donde no existe el nivel suficiente de alcalinidad, los efectos son bastante mayores. Uno de los daños que pueden sufrir los suelos es la eliminación de sus nutrientes esenciales que impide el

[1] **EPA:** U.S. Environmental Protection Agency

crecimiento de vegetación. En cuanto a la flora, la resistencia a enfermedades y al ataque de insectos se reduce, así como su reproducción. Los sistemas acuáticos pueden sufrir a una acidificación que les conviertan en tóxicos. En definitiva, se puede llegar a una pérdida total del hábitat de muchas especies suponiendo esto, una reducción de la diversidad biológica.

En cuanto a los medios urbanos, la lluvia ácida también repercute en el considerable deterioro de los edificios y patrimonio arquitectónico. La superficie expuesta de los edificios, las fachadas de piedra caliza ($CaCO_3$), material usado para muchos edificios históricos, se convierte en yeso ($CaSO_4$), que es un material con una densidad más baja y más soluble en agua, por lo tanto, sufre de humedecimientos y hasta roturas.

2 CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA

2.1 NORMATIVA INTERNACIONAL Y EUROPEA

La mayoría de las emisiones de NOx, SOx y partículas en las zonas marítimas de la UE son emitidas por buques de carga superior a 500 TRB y aproximadamente el 20% de las emisiones se emiten dentro de las 12 millas de mar territorial. Es importante tener en cuenta que las emisiones procedentes de los buques pueden viajar cientos de kilómetros y por tanto, pueden contribuir a problemas de calidad del aire incluso en zonas de ciudades y/o tierras que no tengan acceso a la costa. Esto es relevante por la deposición de los compuestos de azufre y nitrógeno que causan la acidificación de los ecosistemas naturales y amenazan a la biodiversidad.

Diversos estudios indican que con ausencia de políticas, las emisiones de los buques a fecha de 2050 podrían crecer en un 150% desde la fecha de hoy, como resultado del aumento del transporte marítimo.

Por ello, la entrada en vigor del Anexo VI del Convenio MARPOL de la OMI el 19 de Mayo 2005 fue un paso muy significativo para el inicio del cuidado del medio ambiente a nivel mundial por parte de las emisiones provenientes del transporte marítimo.

Anexo MARPOL	Entrada en vigor	Número de ratificaciones	Flota (%)
Anexo I	2 Octubre 1983	152	99,20
Anexo II	6 Abril 1987	152	99,20
Anexo III	1 Julio 1992	138	97,59
Anexo IV	27 Septiembre 2003	131	89,65
Anexo V	31 Diciembre 1988	144	98,47
Anexo VI Protocolo 1997	19 Mayo 2005	71	94,29

Tabla 1 - Estado de los Anexos del Convenio MARPOL a fecha de 30 de Septiembre 2012
Fuente: MARPOL Edition 2013, IMO, Londres

El Anexo VI figura en el Anexo del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978, que fue adoptado por la Conferencia internacional de las Partes en el Convenio MARPOL en septiembre de 1997.

El Anexo VI se aplica a todos los buques, excepto en aquellas donde se disponga lo contrario. A diferencia de otros Anexos del MARPOL, el Anexo VI controla un rango de diferentes fuentes contaminantes junto con ciertos aspectos relacionados con las operaciones de buques que pueden dar lugar a la contaminación del medio ambiente. La contaminación del medio ambiente no tiene las causas directas y efectos asociados, como por ejemplo, un incidente de derrame de combustible. Más bien, su efecto es acumulativo, el cual contribuye sobre todo a la calidad del aire de una población de gran entorno y que afecta tanto a medio ambientes

naturales como artificiales y que directamente repercute a distancias considerables desde el punto de emisión, es decir, alejado del mar.

El cumplimiento de los requisitos pertinentes del Anexo VI se indica mediante la emisión de un Certificado de Prevención de Contaminación Atmosférica (IAPP) para los buques de arqueo bruto igual o superior a 400 G.T. y para plataformas y buques de perforación que realicen viajes internacionales. Para los buques de 400 G.T. o más, se requiere la emisión de un Certificado Internacional de Eficiencia Energética (IEE). Para los buques de menos de 400 G.T. se deben desarrollar las medidas apropiadas por la Administración a fin de demostrar el cumplimiento necesario.

Los controles del Anexo VI regulan lo siguiente:

- ✓ Sustancias destructoras del ozono liberadas de los sistemas de refrigeración y equipos de extinción de incendios. Estas sustancias también se encuentran en algunos tipos de espumas de aislamiento
- ✓ Emisiones de Óxidos de Nitrógeno de la combustión de motores diesel
- ✓ Emisiones de Óxidos de Azufre y Partículas volátiles de la combustión de carburantes que contienen azufre
- ✓ Componentes orgánicos volátiles, vapores de hidrocarburo desplazados de los tanques de carga de los buques
- ✓ Incineración a bordo
- ✓ Calidad del combustible en la medida en que está relacionada con una serie de problemas que afectan a la calidad del aire

En cuanto a las emisiones de SOx y partículas, el control por parte de la normativa es de aplicación a todo combustible usado a bordo de los buques, en el que se incluyen los motores principales y todos los auxiliares junto con los equipos como generadores de vapor y generadores de gas inerte. Estos controles están divididos entre aquellos que son de aplicación en las zonas de control de emisiones (ECA) y aquellos controles aplicables fuera de dichas zonas.

Principalmente, los objetivos serán alcanzados mediante la limitación del máximo contenido de azufre en el combustible suministrado a los barcos y consecuentemente usado a bordo. Los límites de azufre en el combustible (expresados en términos de % m/m, en masa) están sujetos a una serie de cambios a lo largo de los años como se observa en la tabla de más abajo.

FUERA de la zona ECA	DENTRO de las zona ECA
4,50% m/m antes de 01 Enero 2012	1,50% m/m antes de 01 Julio 2010
3,50% m/m en y después de 01 Enero 2012	1,00% m/m en y después de 01 Julio 2010
0,50 % m/m en y después de 01 Enero 2020*	0,10% m/m en y después de 01 Enero 2015

*Depende de revisión, para ser concluida en 2018, según la disponibilidad del combustible requerido, esta fecha puede ser aplazada al 1 de Enero de 2025.

Tabla 2 - Límites establecidos para el contenido en azufre del combustible usado a bordo
Fuente: MARPOL, Edition 2013, IMO, Londres

Las nuevas regulaciones, como se puede ver en la tabla anterior, fijan el valor límite de azufre por debajo del 0,1% en peso en las zonas SECA a partir del 1 de Enero de 2015 y el valor límite por debajo de 0,5% en peso en las demás zonas globales a partir del 2020, con posibilidad de revisión hasta el 2018 para entrar en vigor en 2025, según los estudios sobre el suministro y disponibilidad de este combustible. Aunque según las previsiones la disponibilidad de combustibles de bajo contenido en azufre serán suficientes hasta después de 2015[2].

La Organización Marítima Internacional (OMI) fue adoptando unos límites más estrictos para el contenido de azufre en los combustibles marinos. Con la entrada en vigor el 19 de Mayo de 2005, del Anexo VI de MARPOL se inició la limitación del contenido en azufre en los combustibles a nivel global al 4,5% en masa y en las zonas de Control de Emisiones de Azufre (ECA de SOx – SECA) se permitía hasta un 1,5% de azufre en masa que en esos momentos comprendía únicamente al Mar Báltico debido a que era una región bajo el riesgo de acidificación. Aunque en las enmiendas de 2005[3] de este Anexo VI se designaba la zona del Mar del Norte como nueva zona de control de las emisiones de SOx, que entraría en vigor el 22 de Noviembre de 2006.

Pero actualmente, las zonas ECA que hay establecidas son las siguientes:

- **Para el control de NOx** (TIER III – Previsto para ser aplicado en los barcos construidos después del 1 de enero de 2020 operando en las zonas designadas como ECA):

    1. Zona de Norte América (desde Agosto 2012) – Es decir, alrededor de 200 millas de la línea de costa de EE.UU (incluyendo Hawái) y Canadá junto con el territorio de las aguas de Saint-Pierre-et-Miquelon;

    2. Áreas del Mar Caribe de los Estados Unidos – Desde 1 de Enero 2014

De momento sólo hay estas dos zonas determinadas como NECA's pero en la número 66 del Comité de Protección del Medio Ambiente Marino (MEPC) se acordó el compromiso para implementar fechas de entrada en vigor para las zonas del Mar del Norte y el Mar Báltico. En el Mar Báltico el envío de emisiones de óxidos de nitrógeno es de más de 13.000 tn[4] en el mar, equivalente a cerca del total de las emisiones de nitrógeno desde tierra de países como Rusia o Suecia. Según un estudio de HELCOM[5], si el Mar Báltico se estableciera como una zona ECA de control de NOx, se esperaría reducir la contaminación de óxidos de nitrógeno en dicha zona alrededor de 7.000 tn anuales, puesto que una vez esté en vigor, se requerirá que cumplan con los estándares estrictos de las emisiones de NOx del Tier III definidas en el Anexo VI del Convenio MARPOL.

[2] **Fuente:** Conclusiones del estudio realizado sobre el impacto ambiental llevado acabo por Finlandia, según la industria Sueca del petróleo y también según los análisis de EE.UU. y Canadá sobre la incroporación de sus costas a las Áreas de Control de Emisiones.
[3] **Enmiendas de 2005 al Anexo VI del Convenio MARPOL:** Resolución de MEPC. 132 (53).
[4] **Contaminación anual por Nitrógeno en el Mar Báltico –** Fuente de datos HELCOM – www.helcom.fi
[5] **HELCOM – Baltic Marine Environment Protection Commission:** Gobierna la Convención de Protección del Medio Ambiente Marino del Área del Mar Báltico, conocido también bajo el nombre de La Convención de Helsinki.

En la sesión anterior del MEPC (abril 2014), se acordó posponer los límites internacionales de las emisiones de NOx del 2016 al 2021, sin embargo, en las enmiendas recientes de transición se incluye mantener la fecha inicial de aplicación (2016) para las zonas de Norte América y Mar de Caribe de EE.UU que ya están designadas como NECAs.

- **Para el control de SOx y partículas:**

1. Zona del Mar Báltico; Como es definido en el Anexo I MARPOL
2. Zona del Mar del Norte; Como es definido en el Anexo V MARPOL
3. Zona de Norte América – como anteriormente descrita. – Como es definido en el Apéndice VII del Anexo VI MARPOL
4. Zona del Mar Caribe de los Estados Unidos.

Anexo VI: Prevención de la Contaminación por los buques (Áreas de Control de Emisiones)			
ÁREA ESPECIAL	**Adoptada**	**Entrada en vigor**	**En práctica**
Mar Báltico (SOx)	26 Sept 1997	19 May 2005	19 May 2006
Mar del Norte (SOx)	22 Jul 2005	22 Nov 2006	22 Nov 2007
América del Norte (SOx, NOx y PM)	26 Mar 2010	1 Ago 2011	1 Ago 2012
ECA del Mar Caribe de EE.UU. (SOx, NOx y PM)	26 Jul 2011	1 Ene 2013	1 Ene 2014

Tabla 3. Áreas de Control de Emisiones y fechas de entrada en vigor.
Fuente: Organización Marítima Internacional

En la regulación 18, norma 14, de este Anexo VI se determina la calidad del combustible a ser suministrado en el buque y también los requisitos para su almacenamiento. Se establece el requisito de mantener un registro riguroso y que los combustibles no se mezclen durante el aprovisionamiento, para asegurar que no se infringen los límites. Sin embargo, hay otros métodos por los que se controlan los niveles equivalentes de emisión de SOx y de partículas.

Los métodos equivalentes de control pueden ser divididos en primarios (evitar la formación del contaminante) y secundarios (el contaminante se forma y después se elimina, previamente a descargarse a la atmósfera en la corriente de los gases de escape).

Por tanto, uno de los niveles de control de los combustibles marinos es sobre el contenido de azufre en el combustible suministrado. Este valor debe ser declarado por el proveedor del combustible mediante el comprobante de entrega del combustible, también conocido como *Nota de Entrega.* En el caso de que se esté suministrando combustibles para el uso dentro de las zonas SECA, la tripulación del buque deberá asegurar que aquellos combustibles no serán mezclados con otros combustibles de alto contenido en azufre. Por ejemplo, se necesitaría evitar rellenar un tanque parcialmente lleno, como tanques de sedimentación o servicio diario que contuvieran combustibles no aptos para las zonas SECA. Por tanto, se tendrá que asegurar que la disposición de los tanques de almacenamiento, sedimentación y servicio diario, junto

con los sistemas asociados de trasiego, tratamiento y servicio está diseñados e instalados de tal manera que los diferentes combustibles se mantienen separados. Adicionalmente, los sistemas de servicio de todas las unidades de quema de combustible deben ser capaces de cambiarse al combustible adecuado según la demanda de la zona de navegación. La capacidad de los tanques de almacenamiento de combustible y su disposición deberá ser la adecuada para las zonas previstas de operación del buque, teniendo en cuenta los puertos desde los cuales será suministrado el combustible y la proporción de tiempo que se dedicará dentro y fuera de cada una de las zonas.

En cuanto a la normativa Europea para la regulación del valor límite de azufre en los combustibles marinos, según la directiva UE 1999/32/EC, Artículo 4, junto con las enmiendas para la normativa UE 2012/33/EC, el contenido de azufre en los combustibles marinos dentro de las aguas territoriales de un Estado miembro de la Unión Europea, no debe exceder del 0,1% en peso. Esto es aplicable a todos los buques, independientemente de su bandera. De esta forma, desde el 1 de Enero de 2010 tampoco podrá exceder el 0,1% de contenido en azufre en los combustibles marinos ningún buque que esté en puerto con la excepción de que sea una estancia corta (demora) inferior a 2 horas.

2.2 MEDIDAS PROPUESTAS PARA EL CUMPLIMIENTO

Como se ha mencionado en apartados anteriores, existen disponibles en el mercado varios métodos para el control del contenido en azufre en los combustibles en métodos para limitar la equivalencia en emisiones de dióxido de azufre. Estos métodos pueden ser: primarios o secundarios.

- **Métodos Primarios:** Aquellos que evitan la formación del contaminante (combustibles destilados, alternativos, operaciones de refino del combustible pesado, etc).

- **Métodos Secundarios:** Aquellos que una vez formado el contaminante por la quema de combustibles con cierto contenido en azufre, los dióxidos de azufre se eliminan previamente a ser descargados a la atmósfera junto con la corriente de los gases de escape por la chimenea).

2.2.1 MÉTODOS PRIMARIOS

2.2.1.1 DESULFURIZACIÓN DEL CRUDO

Tal y como se ha visto en apartados anteriores, la OMI a través del convenio MARPOL, ha ido reduciendo la permisividad en cuanto a emisiones de SOx, instaurando límites sobre el contenido de azufre del combustible dependiendo de la zona de navegación.

Si se analizan los tratamientos pre-combustión, el más importante es el de desulfuración, que tiene lugar en la refinería. Pero antes de este tratamiento, el crudo pasa por diferentes etapas y procesos.

2.2.1.1.1 El Refino Del Petróleo

En la refinería el petróleo crudo se somete en primer lugar a un proceso de destilación o separación física y luego a procesos químicos que permiten extraerle buena parte de la gran variedad de componentes que contiene. La refinación se cumple en varias etapas. Es por esto que una refinería tiene numerosas torres, unidades, equipos y tuberías.

En una de las etapas de refinación del petróleo, el ácido sufhídrico contenido, es transformado en azufre sólido. De esta manera, la mayor parte de azufre de las fracciones de petróleo es recuperada como tal, evitando emitirlo a la atmósfera en forma de SO_2. También, en las mismas plantas donde se realiza esta etapa, el amoníaco (NH_3) que se produce en las unidades de tratamiento de aguas residuales ácidas es transformado en nitrógeno elemental, sin efecto contaminante.

El objetivo de la refinación del petróleo es su transformación y depuración para producir, con un mínimo impacto medioambiental, diferentes productos que cubran las necesidades de la humanidad y servir de base para otras transformaciones química que crean productos demandados por la sociedad (fibras, fármacos, resinas, etc).

Los productos que se obtienen del proceso de refinación se llaman derivados y los hay de dos tipos: los combustibles, como la gasolina, diesel, etc.; y los petroquímicos, tales como el etileno, propileno, etc.

Los procesos de refino comprenden tres series de operaciones:

- Procesos físicos de fraccionamiento del petróleo crudo por destilación ("topping").

- Procesos físico-químicos de conversión destinados a incrementar el rendimiento de un crudo determinado en ciertos productos.

- El refino propiamente dicho, que comprende operaciones de carácter físico y químico destinadas a producir una amplia gama de productos terminados que satisfacen normas y especificaciones comerciales.

- Principales procedimientos de refino:
    - Destilación a presión atmosférica y al vacío.
    - Craqueo catalítico.
    - Craqueo con vapor.
    - Reformado.
    - Isomerización.
    - Alquilación.
    - Desulfuración.
    - Reducción de viscosidad.
    - Coquización.
    - Hidrotratamientos.

2.2.1.1.2 Combustibles Marinos

Una vez realizados los distintos procesos de para refinar el petróleo crudo, se obtienen diferentes combustibles, entre ellos los utilizados en el sector marítimo. Estos son producidos a partir de una mezcla homogénea de hidrocarburos provenientes del refinamiento del petróleo. Para el mejoramiento de las características del combustible se le agregan pequeñas cantidades de aditivos. En relación con la normativa vigente y la que entrará en vigor, podemos dividir los combustibles obtenidos de los procesos de refino en los que cumplen con los límites de contenido en azufre y los que no:

Marine Fuel Oil (MFO) y Light Marine Fuel Oil (LMFO)

Son los "aceites pesados". Están compuestos en esencia por aceites residuales. Se clasifican en función de la viscosidad a 50ºC, junto con otros parámetros relacionados: IFO 30 cSt, IFO 80 cSt, IFO 180 cSt, IFO 380 cSt. Poseen suficiente cantidad de vanadio para asegurar que no se forman compuestos como el pentóxido de vanadio, que es causante de severos ataques corrosivos al motor. El Light Marine Fuel Oil se distingue porque contiene una menor cantidad de residuos, por ejemplo azufre.

Aplicaciones:

Se utilizan como combustibles en motores marinos. Se usan en los motores principales y en las calderas que alimentan de vapor las turbinas de los buques.

Specifications for Marine Residual Fuels/ ISO 8217 2010	RME 180	RMG 380	RMB 30
Density at 15º C kg/m^3 max	991	991	975
Kinematic viscosity at 50º C mm^2/s max.	180	380	30
Flash point º C min	60	60	60
Pour point (upper) ºC winter quality max	30	30	0
Summer quality max	30	30	6
Cetane index min			
Carbon residue, 10% (V/V) destilation bottoms% (m/m)	15	18	10
Ash % (m/M) max	0	0,10	0
Water % (V/V) max	0,5	0,5	0,5
Sulphur (m/m) max	4,5	4,5	3,5
Total sediment, potential % (m/m) max	0,1	0,1	0,1
Vanadium mg/kg max	150	350	150
Aluminium plus silicom mg/kg max	50	60	40
Used lubricating oil (UOL) Zinc mg/kg max	15	15	15
Phosphorus mg/kg max	15	15	15
Calcium mg/kg max	30	30	30

Tabla 4 – Características del Fuel Oil Intermedio
Fuente: ISO 8217 Fuel Standard, Third Edition, 2005.

Marine Gas Oil:

Combustible hidrocarburo líquido, que pertenece a los "destilados puros". Se trata de un combustible con un contenido relativamente bajo de azufre.

Su calidad de ignición se caracteriza por el índice de Cetano o el Número de Cetano. El primero es calculado a partir de algunas propiedades de destilación y debe tener un valor mínimo de 43; El segundo es más preciso ya que está medido en un motor bajo unas condiciones estándar.

Funciones

Es un excelente combustible para motores diesel que operan bajo condiciones de alta exigencia. Posee aditivos mejoradores de flujo, lo que le permite fluir a la más baja temperatura ambiente, circulando a través de los ductos de alimentación sin obstruir filtros y sistema de inyección. Tiene un adecuado nivel de residuo carbonoso que contribuye a la uniformidad de las operaciones y evita la formación de depósitos que disminuyen la eficiencia.

Aplicaciones

Destinado para motores principales de ciclo diesel para pequeños barcos, pequeñas embarcaciones, pesqueros buques de guerra o plantas auxiliares de generación de energía para buques mercantes.

Specifications for Destillates Fuels/ ISO 8217 2010	DMA
Density at 15º C kg/m^3 max	890
Kinematic viscosity at 50º C mm^2/s max.	
Viscosity a 40º C mm^2/s min	2
Viscosity a 40º C mm^2/s max	6
Flash point º C min	60
Pour point (upper) ºC winter quality max	-6
Summer quality max	0
Cetane index min	40
Carbon residue, on 10% (V/V) destilation bottoms % (m/m) max	0,3
Ash % (m/M) max	0,01
Water % (V/V) max	
Sulphur (m/m) max	1,5
Total sediment, existent % (m/m) max	
Total sediment, potential % (m/m) max	

Tabla 5 – Características del Gas Oil Marino
Fuente: ISO 8217 Fuel Standard, Third Edition, 2005.

Marine Diesel Oil:

Combustible destilado o carburante mixto. Se caracteriza por una buena calidad de ignición, que como mínimo debe ser de 38. Se distingue del anterior por valores, en general, más altos de la viscosidad, la densidad y el contenido de azufre, así como también por unas tolerancias notablemente mayores.

Aplicaciones:

Es un combustible destinado a motores principales diesel que operan bajo condiciones de alta exigencia, para embarcaciones pequeñas y buques de guerra o plantas auxiliares de energía para buques mercantes.

Specifications for Destillates Fuels/ ISO 8217 2010	DMB
Density at 15º C kg/m^3 max	900
Kinematic viscosity at 50º C mm^2/s max.	
Viscosity a 40º C mm^2/s min	2
Viscosity a 40º C mm^2/s max	11
Flash point º C min	60
Pour point (upper) ºC winter quality max	0
Summer quality max	6
Cetane index min	35
Carbon residue, on 10% (V/V) destilation bottoms % (m/m) max	0,3
Ash % (m/M) max	0,01
Water % (V/V) max	0,3
Sulphur (m/m) max	2
Total sediment, existent % (m/m) max	0,1
Total sediment, potential % (m/m) max	

Tabla 6 – Características del Diesel Oil Marino
Fuente: ISO 8217 Fuel Standard, Third Edition, 2005.

Precios

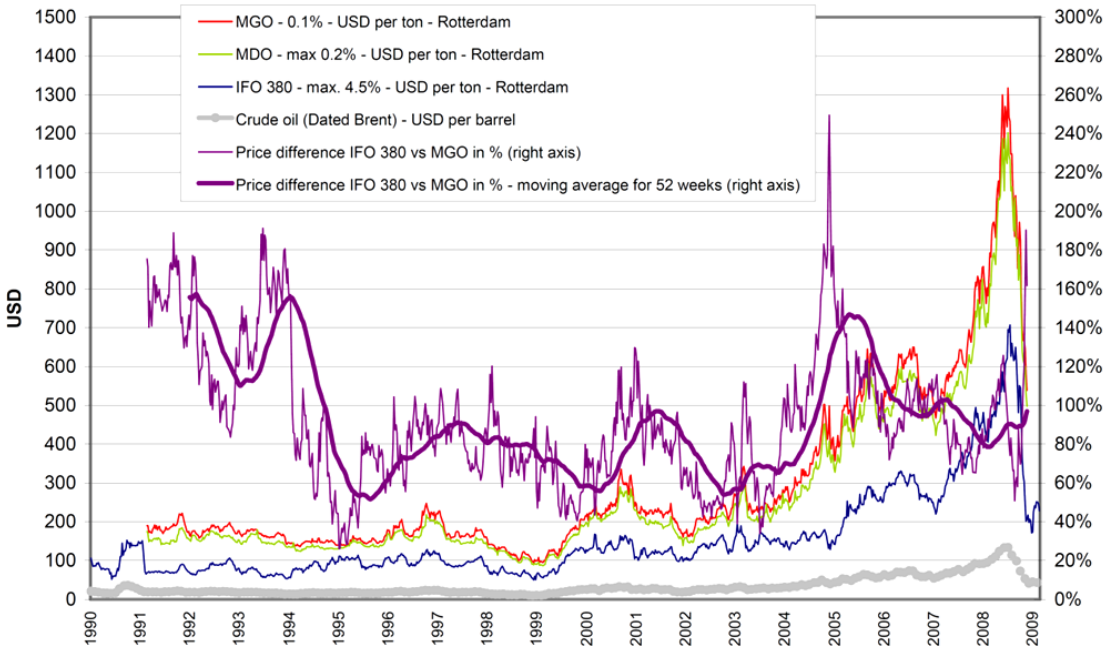


Tabla 7 – Variación del precio del Combustible desde 1990 hasta 2009.
Fuente:

La diferencia de precios entre el combustible pesado (IFO) y los combustibles destilados (MDO y MGO) ha sufrido diferencias a lo largo del tiempo. Partiendo de los años 90 con una diferencia de alrededor de los 100$ por tonelada, en los años 2000, con distintas crisis energéticas llego a superar los 300$ por tonelada.

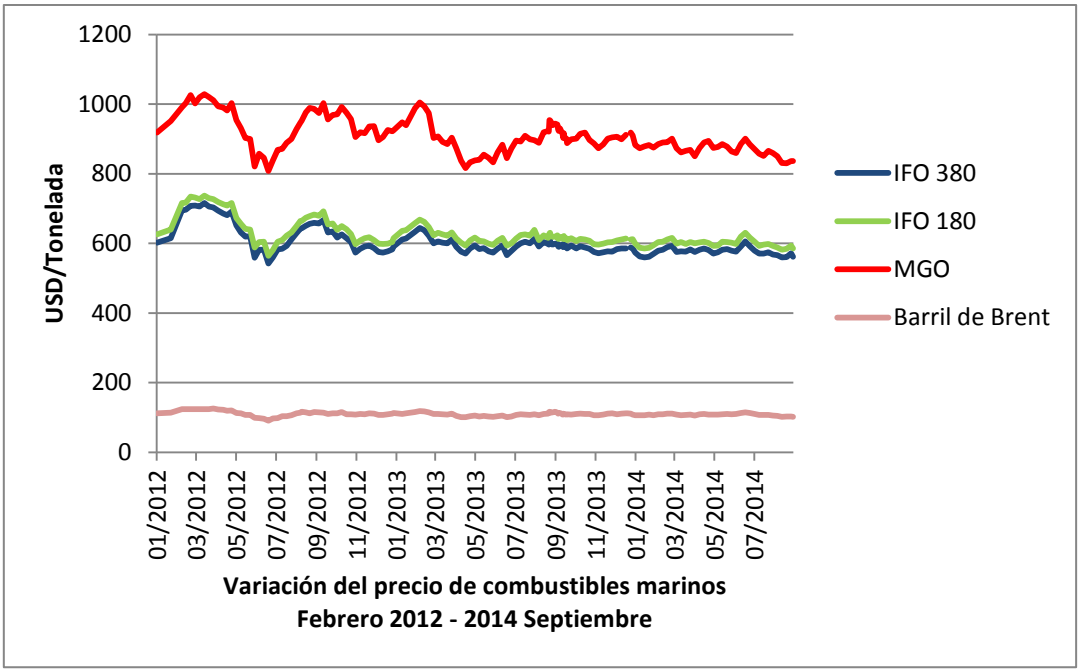


Tabla 8 – Variación del precio del Combusible desde 2012 hasta 2014.
Fuente: Creación propia a partir de datos de Bunkerworld.com

Las diferencias de la década de los 2000 se fueron estabilizando hasta llegar a los últimos dos años, en los que el precio de los combustibles pesados, ya sea IFO 180 o 380 es muy similar, y mantiene una diferencia constante de poco más de 200$ por tonelada.

Con la actual normativa, y la que en breve entrará en vigor, y pese a que los consumos actuales de los sistemas propulsivos tienden a reducirse, el coste de explotación asociado al consumo de combustible que cumpla con los límites prescritos, encarecerá en sobre medida los gastos. Es por ello que han surgido otras soluciones como el uso de scrubbers.

Vessel Type & fuel usage per year: IFO (with total vessel power)	Indicative Scrubber cost (US$)	Increased fuel cost averaged at $80 over 5 years (1.5% then 1%)	Increased fuel cost averaged at $80 over 10 years (1.5% then 1%)
Ferry 23,850 tons (34MW)	3,400,000	7,200,000	14,400,000
Tanker 28,000 tons (30MW)	2,400,000	11,200,000	24,400,000
Cruise 40,000 tons (40MW)	3,200,000	16,000,000	32,000,000

Vessel Type & fuel usage per year: Distillate (with total vessel power)	Indicative Scrubber cost (US$)	Increased fuel cost averaged at $500p/t over 5 years	Increased fuel cost averaged at $500p/t over 10 years
Ferry 23,850 tons (34MW)	3,400,000	45,000,000	90,000,000
Tanker 28,000 tons (30MW)	2,400,000	70,000,000	140,000,000
Cruise 40,000 tons (40MW)	3,200,000	100,000,000	200,000,000

Tabla 9 – Costes de explotación de buque según la medida adoptada.
Fuente: Bunkerindex.com

Como queda de relieve en esta tabla, pese a que el scrubber tiene un coste de instalación importante, el análisis a 5 y 10 años sobre la opción de uso de combustibles de bajo contenido en azufre, pone de manifiesto que la opción más rentable es la instalación del sistema de retención del azufre a bordo.

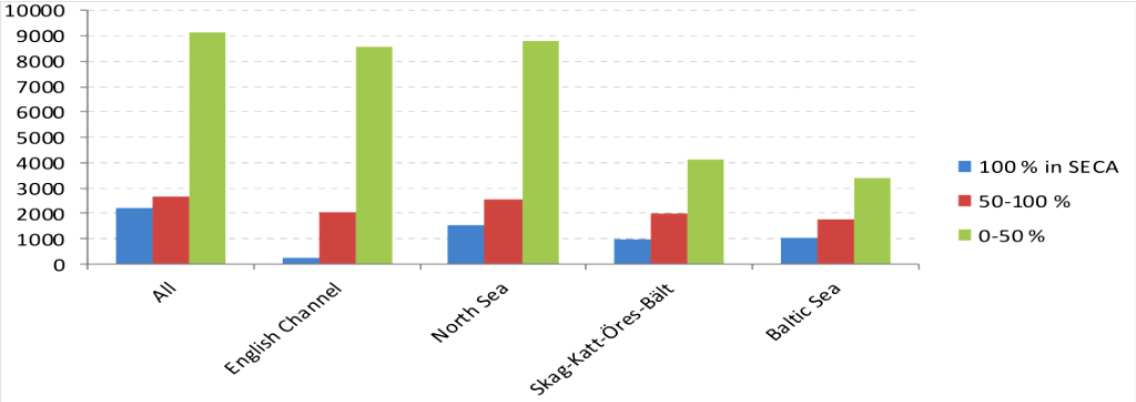


Tabla 10 – Número de barcos que navegan por las ECAs y tiempo que lo realizan.
Fuente: ESN – Way Forward SECA Report.

Aunque también hay que tener en cuenta que el uso de los combustibles de bajo contenido en azufre permitirá a buques que no tengan como zona de navegación exclusiva las ECA, navegar por esas zonas sin tener que instalar ningún sistema adicional. Así como también se plantea como solución rápida para aquellos buques que en 2015 no hayan tenido tiempo de instalar los sistemas de retención y naveguen por dichas zonas.

Tal y como se observa en la gráfica, del total de barcos que navegan por las ECA, alrededor de un 60% de estos pasa menos de un 50% de su tiempo de navegación por zonas de control de emisiones.

2.2.1.1.3 Disponibilidad de los Combustibles

Hoy en día tanto las refinerías como las organizaciones y gobiernos competentes en esta materia han afirmado que no surgirán problemas de disponibilidad de combustibles de bajo contenido en azufre.

Pero por otro lado, la OMI ha puesto en cuestión la adopción del límite del 0.5% de contenido en azufre a nivel global del 2020. La entrada en vigor se ratificará o se prorrogará en función de un estudio que va a realizarse en relación a la disponibilidad de combustible que cumpla con la normativa, que será publicado durante el 2018.

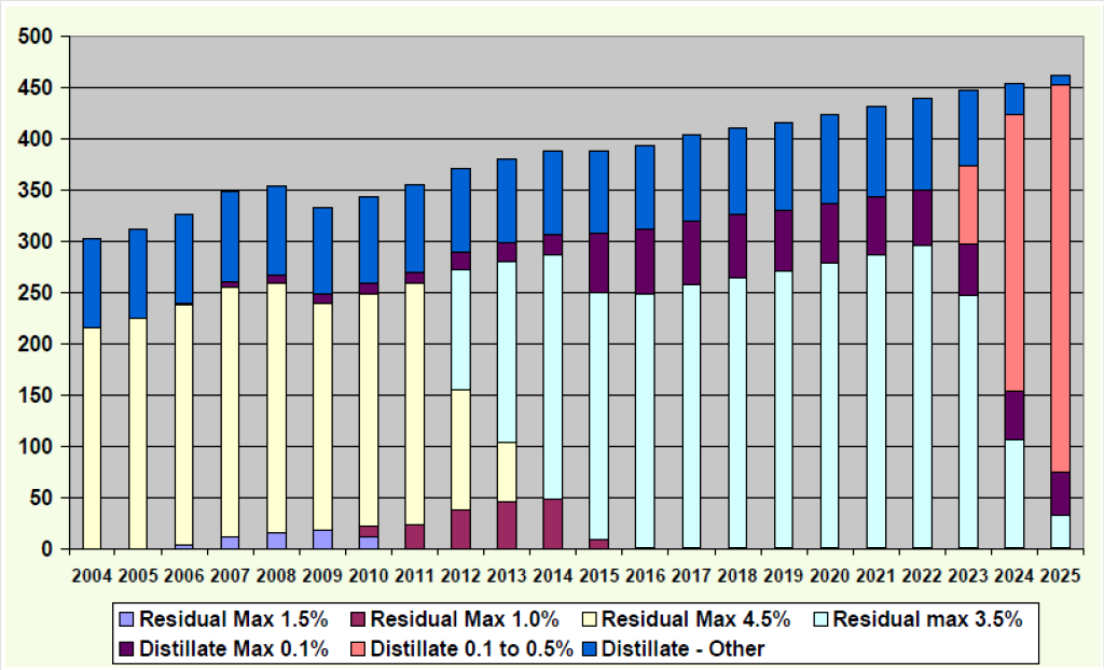


Figura 1 – Contenido en azufre en los combustibles marinos.
Fuente: Study on the Impacts of the new IMO Regulations on transportation costs

La gráfica muestra la previsión de demanda de distintos combustibles hasta el 2025, y como se puede apreciar, en función de los años de entrada en vigor de las normativas la tendencia sufre cambios importantes. Y sobretodo el aumento a partir del 2012 en el uso de combustibles residuales con 3.5% de azufre, consecuencia de la aplicación a nivel global de este límite. Así como también el aumento de MDO a parir del 2023, suponiendo una prórroga del límite del 0.1% de azufre.

2.2.1.1.4 Proceso de Desulfurización

A día de hoy el MGO y el MDO permitirían cumplir con el límite de contenido en azufre en las zonas ECA, pero de cara a la nueva regulación para el año 2015 en las zonas de control de emisiones, la cantidad debería reducirse ya que el límite quedará establecido en el 0.1% de contenido en azufre.

Para resolver este problema en la mayoría de los casos, se pasa a realizar la elaboración del fueloil reduciendo el uso de la parte residual y aumentando el uso de *cutter stocks*[6] en el *blending*[7] del fueloil, que tienen menor concentración de azufre por el hecho de ser fracciones más ligeras. Adicionalmente, también se podrían tratar estos *cutter stocks* sometiéndolos a procesos de desulfuración, este proceso permitía utilizar más cantidad de residuo, pero incrementaba el valor de las fracciones más volátiles de la mezcla.
Para reducciones por debajo del 1% de contenido en azufre es obligado a plantearse, por parte de las refinerías, unos caminos a seguir para hacer frente a las necesidades a satisfacer. En un primer momento se plantearon tres posibilidades: reducir la cantidad de azufre de los *cutter stocks*, reducir la cantidad de azufre del residuo o reducir la cantidad de azufre del crudo.

La primera posibilidad (reducir la cantidad de azufre de los *cutter stocks*) ya se había adoptado, en algunos casos, para conseguir unos combustibles con una cantidad de azufre menor al 3.5%. Consiste en someter a los destilados que forman los *cutter stocks* a un proceso denominado hidrodesulfuración (HDS), en el que consigue reducir la cantidad de azufre presente en este tipo de componentes. Al reducir la cantidad de azufre presente en los *cutter stocks* se reduce la cantidad de azufre en el fueloil final.
Reducir la cantidad de azufre del residuo es una técnica que entraña mucha dificultad. Consiste en aplicar técnicas de hidrodesulfuración a los residuos atmosféricos y/o de vacío. La dificultad de esta técnica reside en la capacidad de extraer átomos de azufre de cadenas de hidrocarburo muy largas, además de necesitarse para realizar este proceso una gran cantidad de hidrógeno, que es de difícil obtención. La introducción de esta técnica en el proceso de refino supone una adaptación grande y costosa de la refinería. Es por este motivo que no haya sido la técnica más adoptada para conseguir LSFO.

Por último, está la opción de reducir la cantidad de azufre presente en el crudo. Esta opción presenta dos posibilidades. La primera es la utilización de crudos con una cantidad de azufre reducida. Existen crudos con cantidades de azufre del 0.10% o 0.12%. La utilización de estos crudos permite obtener residuos con concentraciones de azufre bajas, que mezclados con *cutter stocks* desulfurados hacen posible la obtención de fueloil con concentraciones máximas de azufre del 1.0%. La segunda posibilidad es realizar una desulfuración a un crudo con alto contenido en azufre para obtener un crudo de bajo contenido en azufre. Esta técnica plantea serios problemas en cuanto a la cantidad de crudo a tratar y el hecho que del crudo se obtendrán productos que no están sometidos a las regulaciones del azufre, por lo que se estará tratando más cantidad de la necesaria.

A pesar de que existan técnicas para conseguir obtener LSFO, las normativas internacionales van reduciendo periódicamente la cantidad máxima de azufre que puede contener el combustible.
Esta reducción drástica de la cantidad de azufre permitida en las zonas ECA's supone un dramático problema. La obtención de un fueloil con menos de un 0.10% de azufre es

[6] *Cutter stocks*: elementos que serán mezclados en el proceso de *blending*
[7] *Blending*: mezcla entre dos o más hidrocarburos

extremadamente difícil de conseguir. Muy pocos de los crudos mayoritariamente comercializados en Europa pueden cumplir estas especificaciones realizando el *blending* con residuo y productos destilados, ni siquiera con una desulfuración de los residuos. Esto obliga a que para conseguir un combustible con una concentración de azufre menor al 0.10% haya que recurrir a combustibles procedentes de productos destilados.

A modo de recopilación, todos los métodos mencionados para la obtención de combustibles con bajos niveles de azufre, se elaboran mediante la inclusión de algún proceso de eliminación del azufre de las fracciones petrolíferas.

2.2.1.1.5 Proceso de Hidrodesulfuración (HDS)

Los hidrotratamientos son procesos realizados en la refinería mediante la adición de hidrógeno que tiene como objetivo mejorar la calidad del producto final. Para ello se utiliza un reactor catalítico, separadores tipo flash, sistemas de recirculación y sistemas de aumento de la presión y la temperatura de los distintos componentes a tratar.
Uno de estos tratamientos es la hidrodesulfuración (o HDS), que se aplica a crudos pesados y algunos productos destilados.

Durante el proceso se eliminan los compuestos sulfurados principalmente en forma de sulfuro de hidrógeno. Durante este tratamiento son una serie de reacciones en cadena las que permiten separar el azufre del combustible.

La eficiencia de este proceso depende del tipo de petróleo a tratar y su procedencia, ya que cada pozo tiene distintas propiedades y proporciones de azufre, así como también del tipo de catalizador utilizado y de las condiciones y clase de proceso.
Este proceso se divide entre la sección de reacción, la sección de gas de reciclo, y la sección de recuperación del producto.

En la primera, la sección de reacción se realiza la conversión del azufre contenido en el combustible a sulfuro de hidrógeno, gracias al uso de un catalizador dentro del reactor.

En la sección de gas de reciclo se purifica el hidrógeno para ser reaprovechado.
Finalmente la sección de recuperación del producto, mediante el uso de separadores instantáneos tipo flash se separa la mezcla en productos gaseosos y líquidos.

Problemáticas

Como se ha visto la opción del uso de combustibles con bajo contenido en azufre trae consigo varios problemas.

La baja disponibilidad empuja a las refinerías inviertan en sistemas e instalaciones para producir mayores cantidades, aumentando el precio del combustible. Pero no son pocas las que viendo la variabilidad en cuanto a normativa de emisiones, no se quieren arriesgar a invertir grandes sumas de dinero para poder ofrecer dichos combustibles. Por lo tanto habrá que analizar la progresión a medio y largo plazo de la opción del uso de estos combustibles como medida para el cumplimiento de la normativa de SOx.

2.2.1.2 GNL COMO COMBUSTIBLE MARINO

Además del uso de combustibles destilados como el Gasoil marino (MGO) o tecnologías para la equivalencia de las emisiones de SOx del transporte marítimo, hay otra solución que es cambiar al uso de combustibles alternativos, como el gas natural licuado (GNL).

El gas natural es un combustible fósil que se encuentra en reservas subterráneas y es producido en plantas especiales de gas o en paralelo con la producción de combustibles petróleos. Las reservas de gas en el mundo ya son mayores que las reservas de petróleo y continuamente se van encontrando nuevas reservas. Por tanto, la situación de los recursos mundiales de gas natural está mejor que para el petróleo en cuanto a términos de reservas-producción. Los principales productores de gas natural son Rusia, Irán y Qatar. El gas natural puede ser licuado (GNL) o comprimido (GNC), pero este último no muestra demasiado interés en cuanto a su distribución y transporte.

El gas natural es el combustible fósil más limpio, se compone de metano con pequeñas concentraciones de hidrocarburos más pesados, tales como el etano y el propano. Utilizando el GNL como combustible en los barcos, no son necesarias medidas adicionales de reducción de emisiones para cumplir con los requisitos de la OMI como sí ocurre con los combustibles pesados que necesitan de una instalación de sistemas de limpieza de gases de escape. El GNL ha empezado a utilizarse como combustible marino sólo a partir del año 2001, siendo Noruega el país precursor de la propulsión de los buques con GNL. El primer buque de la historia que fue propulsado por gas natural fue el ferry llamado *Glutra,* puesto en servicio en el año 2000 y operado por Fjord Lines.

Como se muestra en el siguiente gráfico, el precio del GNL es el que menos ha fluctuado comparado con los precios de los demás combustibles marinos en el periodo relevante. El GNL es bastante más barato que el precio medio del MGO en el momento de pico de su precio (Junio – Septiembre 2008), y aún más barato que el HFO durante casi todo el periodo de muestra. El precio bajo de esos periodos se debe en parte a la decreciente economía global y que resultó en la reducción de la demanda del gas natural, y en parte, en el incremento de la producción del gas natural, generalmente gas de esquito.

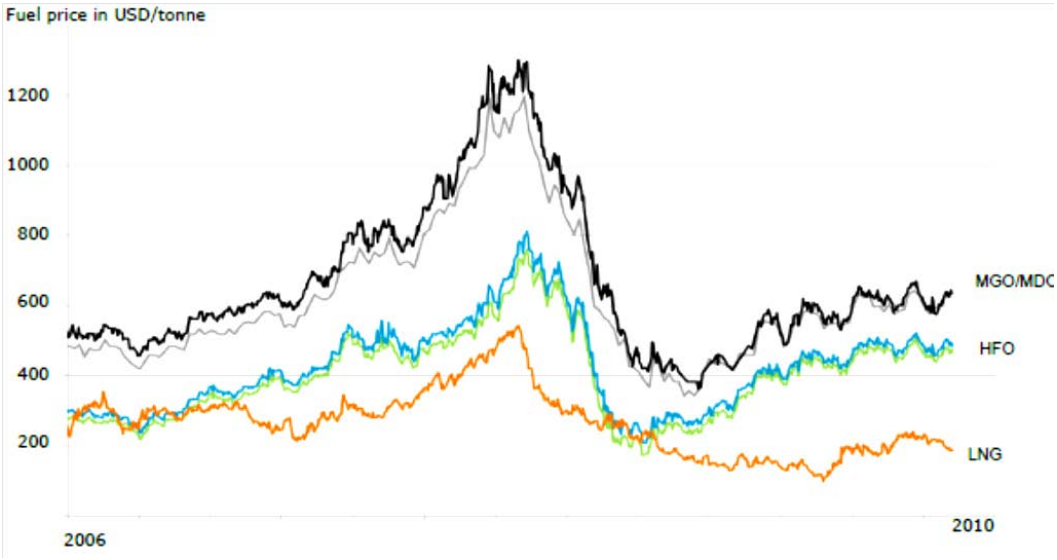


Figura 2 Fluctuación de los precios del combustible entre Octubre 2006 y Marzo 2009
Fuente: Wärtstilä, www.lngoneworld.com, 2010

El uso de GNL para la propulsión de buques representa una alternativa verde en cuanto a las emisiones a la atmósfera. Se basa en una completa reducción de los dióxidos de azufre y las partículas y cerca del 90% de reducción de los NOx. En cuanto a los gases de efecto invernadero, el factor de reducción del carbono del GNL, interviene en una reducción de alrededor del 28% e las emisiones de CO_2 comparado con los combustibles refinados. Por otro lado, se incluye la emisión de metano que no ha reaccionado en la combustión, también conocido como "desplazamiento de metano" y hecho que los fabricantes de motores están tratando de buscar soluciones para reducirlo. Para los buques nuevos entregados, Roll Royce ha estimado que si se tiene en cuenta el desplazamiento de metano incluyendo las emisiones equivalentes de CO_2 de gases de efecto invernadero, la reducción estaría todavía un 22% por debajo de las emisiones usando combustibles pesados (Heavy Fuel Oil – HFO). Otra ventaja del GNL es que no produce lodos y que no hay humo visible por la combustión.

Los requisitos ambientales cada vez más estrictos para los buques y la combinación con las condiciones económicas favorables, dan como resultado a un gran interés por el uso de GNL como combustible en los barcos en los últimos años y futuro próximo. Actualmente hay más de 40 buques operando con GNL (además de los buques gaseros que no se consideran en el dato) en el Mar del Norte y Báltico, la mayoría de ellos con base en Noruega. En la variedad de tipos de buques propulsados por GNL se incluyes ferries RO-RO, buques suppliers, y buques guardacostas.

Wärtsilä, Rolls Royce Marine, Mitsubishi y MAN son los fabricantes líderes de motores duales o motores marinos de GNL para buques. Los países Europeos también son los pioneros en la mayoría de las tecnologías y equipamientos relevantes relacionados con la propulsión con GNL de los buques.

El uso de Gas Natural Licuado (GNL) como combustible alternativo es la opción más destacada para cumplir con las nuevas regulaciones sobre las emisiones de óxidos de azufre (SOx) en el Mar Báltico y Mar del Norte.

2.2.1.2.1 Motores Marinos Para Gas Natural Licuado

Cada vez los fabricantes ofrecen más modelos de motores marinos para GNL, y ya se pueden distinguir hasta dos categorías de ellos: motores duales de combustible (por ejemplo, Wärtsilä, MAN) y motores de gas con tecnología lean-burn (por ejemplo, Roll-Royce, Mitsubishi). Por un lado, los motores duales pueden funcionar tanto con GNL como con combustibles convencionales. Es una solución muy práctica cuando la disponibilidad del suministro de LNG es incierta (por ejemplo, la falta de estaciones de suministro GNL en puerto). Mientras que la segunda opción, son motores de un solo combustible y es una solución para aquellos buques que operan en regiones con un gran desarrollo en cuanto a la instalación de estaciones de suministro de GNL.

2.2.1.2.2 COSTES PARA LA CONVERSIÓN DEL BUQUE A GNL

No todos los buques son adecuados para la propulsión por GNL. A vista de tener una gama más limitad que los combustibles a base de petróleo, el gas natural licuado es más conveniente para el transporte en comercios costeros (transporte marítimo de corta distancia) y teniendo en cuenta la limitación de la infraestructura a las orillas para el suministro de este combustible, el concepto es más apto para buques que realizan un comercio regular, como visión a corto plazo por lo menos. Por ello, ciertos segmentos del transporte marítimo, tales como buques del servicio del puerto, RO-RO, ferries RO-PAX y buques de alta velocidad, se han considerado ser particularmente interesantes en este aspecto.

Además hay grandes desafíos para la implementación a gran escala del GNL como combustible marino. Uno de los retos más importantes es el gran espacio a bordo que se requiere para los tanques de almacenamiento del GNL, lo que conlleva a la pérdida de espacio de carga para el buque. Por ejemplo, se necesitaría alrededor de 1,8 veces más volumen en el buque que usando MDO con un contenido energético equivalente. Si además se le añade el aislamiento necesario para el tanque, el volumen sería de 2,3 veces más grande.

Para los buques de nueva construcción es más fácil encontrar una solución para el problema del espacio de los tanques de almacén del GNL, pero para los buques ya en operación es muy difícil encontrar un espacio sin uso tan grande y por ello es una conversión complicada. Y aun encontrado un sitio para la ubicación de los tanques de almacén de GNL, y sin perder demasiado espacio de la carga, la autonomía operacional del buque se vería afectada dado que la capacidad de reposición del buque se reduciría.

Según un estudio llevado a cabo por MARINTEK[8] los costes adicionales para un buque propulsado por GNL serían de alrededor 10%-15% de los costes totales de un buque convencional. Estos costes adicionales están prácticamente relacionados con los grandes

[8] **MARINTEK:** Maritime Gas Fuel Logistics

tanques de almacén de GNL y el sistema de tuberías. Se estima que para un buque RO-RO típico, de 5600 DWT, el coste adicional será de alrededor 3,2 millones de Euros.[9]

Para el año 2020, Det Norske Veritas estima que habrá 1000 buques nuevos que operarán con GNL (se consideran tanto los buques con motores duales como los buques con sólo GNL), de los cuales 400 buques operarán en el Norte de Europa. Aunque si se compara este número con los 5000 buques que operan en las zonas SECA, se puede observar que con los buques propulsados por GNL no será suficiente para afrontar los requisitos de la normativa para dicha zona para el año 2015.

2.2.2 MÉTODOS SECUNDARIOS

Las opciones disponibles en el mercado para aquellos armadores que van a cumplir con la normativa de la limitación del azufre del Anexo VI mediante otros métodos que no sean de cambiar al uso de combustibles destilados son o bien usando combustibles de alto contenido en azufre junto a tecnologías que obtienen los niveles "equivalentes" de emisiones o cambiando a combustibles que no contienen azufre.

En cuanto al actual desarrollo tecnológico de la primera opción, se supone la instalación de uno o más *scrubbers* en el buque con el fin de reducir el azufre de los gases de escape, mientras que la opción del uso de combustibles alternativos significa principalmente el uso de gas natural licuado (GNL), y en menor proporción, el uso de biocombustibles.

A continuación se explicarán detalladamente las opciones que se ofrecen en el mercado ante estas posibilidades alternativas al uso de combustibles destilados.

2.2.2.1 SISTEMAS DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE – SCRUBBER

El sistema scrubber ha sido utilizado en tierra con éxito para reducir las emisiones de SOx de las plantas industriales desde los años 1930. El principio básico es tener un fluido que sea capaz de absorber SOx y neutralizar los residuos que están en contacto con los gases de escape. El SO_2 que se absorbe reacciona con el material alcalino en el líquido, formando SO4. El azufre que contenía el producto sale del scrubber con los demás residuos y los gases de escape *desulfurizados* a través de la chimenea. Los residuos, o también conocidos como lodos, se almacenan a bordo para ser entregados a una instalación receptora en tierra.

El agua de mar, gracias a su alcalinidad neutral, ha tenido éxito usándose como fluido para los scrubbers de los gases de escape de las calderas en los petroleros desde 1960 y ahora es ampliamente usada para la limpieza de los gases de escape de las plantas de calderas de los buques tanque obteniendo un gas inerte limpio y previniendo las mezclas explosivas de gas/aire. Desde los años 90, esta tecnología ha sido adaptada para utilizarse en la limpieza de

[9] **Fuente de datos: MARINTEK –** Maritime Gas Fuel Logistics – *Developing LNG as a clean Fuel for Ships in the Baltic and North Seas,* Diciembre 2008, s.18.

los gases de escape de los motores principales y auxiliares. Los resultados de las pruebas y ensayos de la reducción de las emisiones de SOx en los proyectos implementados en los buques muestran una eficiencia de la limpieza del SOx del 90%.

Según la configuración del buque se realiza un diseño particular para cada motor principal o auxiliar, de los sistemas de limpieza de los gases de escape (LGE en adelante – también conocido como EGCS – Exhaust Gas Cleaning System). Por las restricciones del espacio y los costes se han ido desarrollando unidades LGE integrados que con solo una unidad para los motores principales y auxiliares es suficiente. Aunque existe también la posibilidad de una configuración más básica que consiste en que la unidad LGE esté vinculada únicamente al motor principal, ya que en algunos casos los motores auxiliares sólo funcionan con combustibles destilados, y por tanto, no necesitan un sistema de limpieza de los gases de escape.

En cuanto a los aspectos relacionados con el ruido, la estabilidad, la calidad del agua de limpieza y su impacto en el ambiente y la toxicidad de los lodos han sido abordados por los fabricantes asegurando su optimización. Con esta información aportada por los fabricantes, tanto los scrubber que funcionan con agua dulce como los de agua salada han demostrado la idoneidad para las aplicaciones marítimas y según los fabricantes están listos para su instalación y uso.

Por lo tanto, los buques que dispongan de una instalación con scrubbers pueden seguir usando combustibles con alto contenido en azufre después de la entrada en vigor de la normativa en enero de 2015 en las zonas ECAs y en 2020 en las demás zonas, por ello es un punto importante que influye en las decisiones de inversión de las refinerías.

Desde la OMI se han establecido las normativas correspondientes para los vertidos del agua de lavado que contiene azufre de los scrubber abiertos que usan agua salada. Esta agua tiene una alta cantidad de sal y alta alcalinidad con el fin de neutralizar las emisiones de los ácidos y por tanto es un problema para los islotes, ríos y otros ambientes sujetos a la acidificación. Por ejemplo, en la zona del Mar Báltico donde se necesitarían grandes volúmenes de agua con el fin de disminuir el impacto ambiental a un nivel aceptable.

En cambio, y como verá en más detalles en el siguiente capítulo, los sistemas scrubber cerrados de agua dulce neutralizan el azufre desde el flujo de los gases de escape en el barco con ayuda de soda caústica y desde el punto de vista medioambiental son más aceptables con la condición de que no hay emisiones en el medioambiente marino. Sin embargo se crean nuevos problemas en cuanto a la seguridad del trabajo en las instalaciones de recepción establecidas en los puertos que requieren un cierto cuidado y manejo de los residuos peligrosos teniendo unos costes correspondientes para el transporte y destrucción. Estos residuos en ningún caso podrán ser mezclados con lodos o derrames de combustibles ya que los tratamientos para éstos son diferentes.

3 SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE

Existen distintos diseños de sistemas marinos de limpieza de gases de escape (conocidos normalmente como scrubbers) que eliminan los óxidos de azufre de los gases de escape de los motores y calderas de los buques. Se diferencian dos grupos de sistemas:

- Sistema Húmedo: circuito abierto, circuito cerrado o circuito híbrido.

- Sistema Seco

La mayoría de estos sistemas tienen tres componentes básicos:

- Un recipiente que permite que el flujo de gases de escape desde los motores o calderas sean mezclados bien con el agua – tanto agua dulce como agua salada. Por razones de espacio disponible y acceso, las unidades de limpieza de gases de escape suelen ser situadas arriba del todo en el buque o alrededor del área del guardacalor.

- Una planta de tratamiento para eliminar los contaminantes del agua de "lavado" después del proceso de limpieza "scrubbing".

- Una instalación de manejo de los lodos – el lodo eliminado por la planta de tratamiento con agua de lavado debe ser retenido a bordo para disposición en tierra y no puede ser quemado en los incineradores del buque.

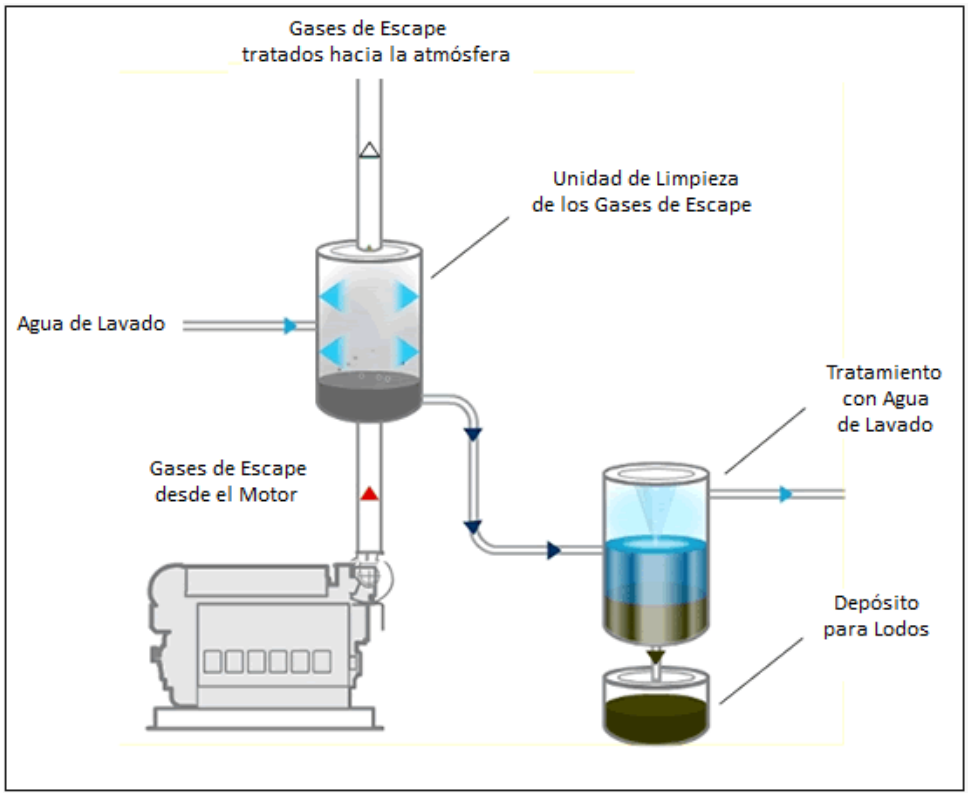


Figura 3 – Esquema de los componentes básicos de un sistema marino de limpieza de gases de escape
Fuente: www.egcsa.com

3.1 SCRUBBER DE TIPO SECO

La mayoría de los sistemas actuales que hay instalados y se instalan a bordo de los buques se basan en el método de scrubber húmedo, mientras que la posibilidad de instalar un scrubber de tipo seco últimamente también se está desarrollando en el sector marino. Estos sistemas pueden llegar a eliminar hasta el 99% del SOx mediante la utilización de un reactor lleno con hidróxido de calcio granulado.

Algunas de las ventajas de los sistemas de limpieza de gases de escape de tipo seco son:

- El consumo energético del sistema es insignificante.
- Se pueden eliminar tanto los NOx como los SOx con un solo sistema de limpieza de gases de escape, y de esta manera cumplir con las normativas respecto a ello, sin tener que instalar otros dispositivos como los circuitos de Reducción Catalítica Selectiva para la eliminación de NOx.
- El material que se utiliza para la reacción es en forma granulada que proporciona la ventaja de que es más fácilmente manejable y reciclada.
- Por otro lado, con este sistema no se transmiten contaminantes al mar durante su uso.

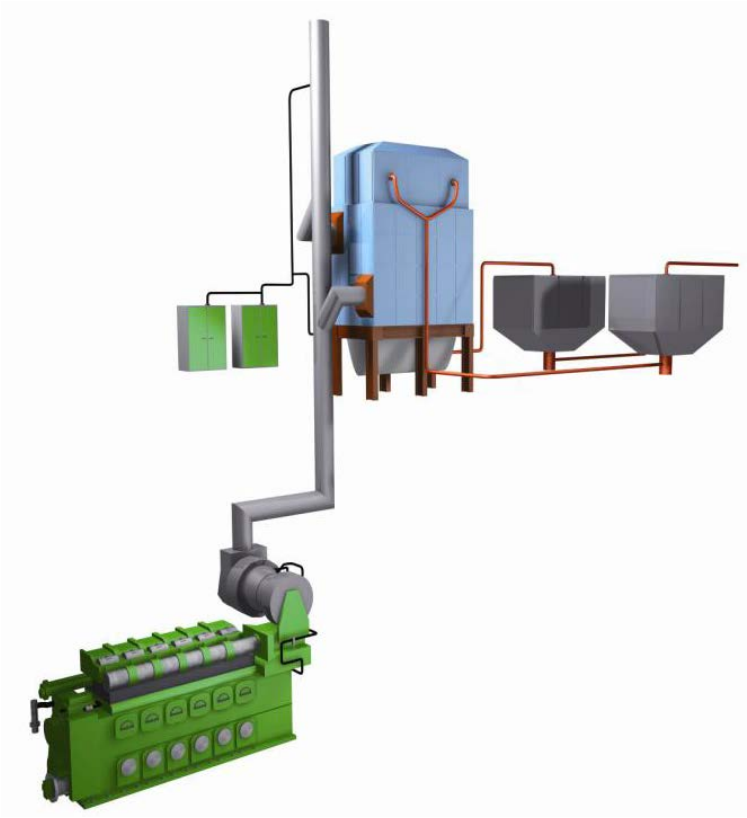


Figura 4 – Ejemplo de instalación de Scrubber Seco a bordo de un buque.
Fuente: MAN DryEGCS System

3.2 SCRUBBER DE TIPO ABIERTO

El sistema puede ser de tipo "abierto", a través del cual el agua a utilizar para el *scrubbing* se coge desde el mar, luego es tratado y se descarga de vuelta al mar. Se utiliza la composición natural del agua de mar para neutralizar el SO_2 y eliminarlo. Habitualmente los sistemas abiertos de agua de mar tienen una capacidad de 45m3/MWh para el proceso de *scrubbing*.

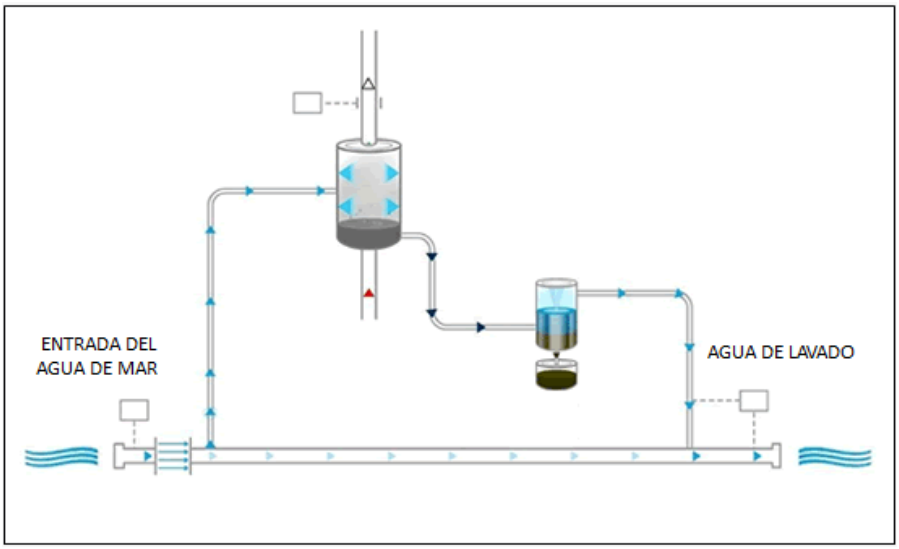


Figura 5 – Esquema básico del Sistema Marino de Scrubber de Agua de Mar tipo Abierto
Fuente: www.egcsa.com

Los Scrubber de Agua de Mar requieren que los gases de escape sean mezclados completamente con el agua salada para disolver los óxidos de azufre. Los fabricantes utilizan diversas técnicas para conseguir la mezcla sin obstruir indebidamente el paso de los gases de escape, ya que podrían provocar una contra-presión fuera de los límites establecidos por el fabricante del motor y afectar negativamente el funcionamiento del motor. Cuando los óxidos de azufre se disuelven en la mezcla, se produce una reacción en la cual el dióxido de azufre se ioniza en bisulfito y sulfito, que luego se oxidan fácilmente en sulfato en el agua de mar que contiene oxígeno.

Reacciones químicas

$$SO_2 + H_2O \leftrightarrow H^{`+} + SO_3 2^- \ (Sulfito)$$

$$HSO_3{}^- \ (Bisulfito) \leftrightarrow H^+ + SO_3 2^- \ (Sulfito)$$

$$SO_3 2^- (Sulfito) + {}^1/_2\, O_2 \leftrightarrow SO_4 2^- \ (Sulfato)$$

La ionización en bisulfito y sulfito produce exceso de iones de hidrógeno (H+), es decir, acidez, así como también se forma el ácido sulfúrico a partir del trióxido sulfúrico. Este proceso, inicialmente será neutralizado por la capacidad de amortiguación del agua de mar o la alcalinidad, que principalmente está relacionada con su contenido natural en bicarbonato. Sin embargo, una vez consumida la capacidad inicial de amortiguación y se reduce su pH hasta aproximadamente 3, la ionización del azufre a sulfito es insignificante y la limpieza de los gases de escape se vuelve limitada.

El proceso de neutralización por el agua de mar de los ácidos formados por el srcubber, es el descrito por la siguiente reacción:

$$CO_{2(aq)} + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3(\text{Ácido Carbónico}) \leftrightarrow H^+ + HCO_3\text{-}(Bicarbonato) \leftrightarrow H^+ + {CO_3}^{2-}(Carbonato)$$

Se trata de una solución acuosa en la que interviene el carbonato, bicarbonato, dióxido de carbono y ácido carbónico de forma conjunta en un equilibrio dinámico.

Cuando el carbonato cálcico (sólido) reacciona con el agua en presencia de iones libres de hidrógeno, el carbonato de calcio sólido se disuelve formando iones libres de calcio (Ca+2) e iones libres de bicarbonato (HCO3-), de ahí que consumen los iones libres de hidrógeno, disminuyendo la actividad iónica de hidrógeno, y por definición incrementando el pH (volviéndose más base), por ejemplo el carbonato cálcico actúa para neutralizar o tamponar la solución consumiendo los iones de hidrógeno.

De manera similar, el bicarbonato de calcio y de magnesio, que se encuentran presentes en el agua de mar a concentraciones de aproximadamente 140 mg/l, consumen iones libres de hidrógeno, disminuyendo la actividad iónica de hidrógenos, y de nuevo por definición, aumentando el pH (volviéndose más base), por ejemplo, el bicarbonato en el agua de mar actúa para neutralizar o tamponar la solución consumiendo iones de hidrógeno.

El flujo de agua de lavado de los sistemas de gases de escape está optimizado, de manera que el dióxido de azufre pueda disolverse y hay disponible una capacidad de suministro apropiada para permitir que las emisiones se reduzcan hasta los niveles requeridos. Un flujo escaso de agua de lavado hace que la mezcla o alcalinidad no sea suficiente para conseguir la reducción de SO_2, sin embargo, un exceso del agua de lavado sería ineficiente en términos de potencia de bombeo y del tamaño y peso de los componentes. Por tanto, en el diseño del sistema de limpieza de gases de escape también se tendrá que considerar la temperatura del agua disponible para el lavado, ya que cuanto más baja es la temperatura más es la solubilidad de SO_2.

Los sulfatos son componentes naturales del agua de mar. Son solubles y tienen un largo “tiempo de residencia”, así como tampoco se ven afectados por el pH natural, temperaturas y presiones de los océanos. Se puede decir que el sulfato es conservador como componente del agua de mar, puesto que independientemente de la salinidad total, se produce mezclándose en cualquier océano en la misma proporción que otros constituyentes de estas aguas, como puede ser el sodio. La mayor parte de sulfatos del agua de mar se deriva de las actividades volcánicas y la desgasificación del fondo marino. Además, los sulfatos llegan a los océanos a través del caudal de los ríos, pero la concentración en el agua en mar abierto se mantiene constante, en torno a 2,65 g/l o 20 kg de azufre por tonelada de agua de mar. Por tanto, según estudios y ensayos de campo, se confirma que el aumento de sulfato procedente de los gases de escape será insignificante en comparación con la cantidad que ya hay en los océanos.

3.2.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE TIPO ABIERTO

Los sistemas de limpieza de gases de escape de tipo abierto están basados en el principio de funcionamiento de los sistemas de torres de gas inerte, en las que mediante dos etapas se enfría el gas y se elimina el agua mediante un elemento secador. En cambio, en estos sistemas de scrubber para gases de escape, se utiliza el agua de mar para la eliminación de los SOx de los gases de escape.

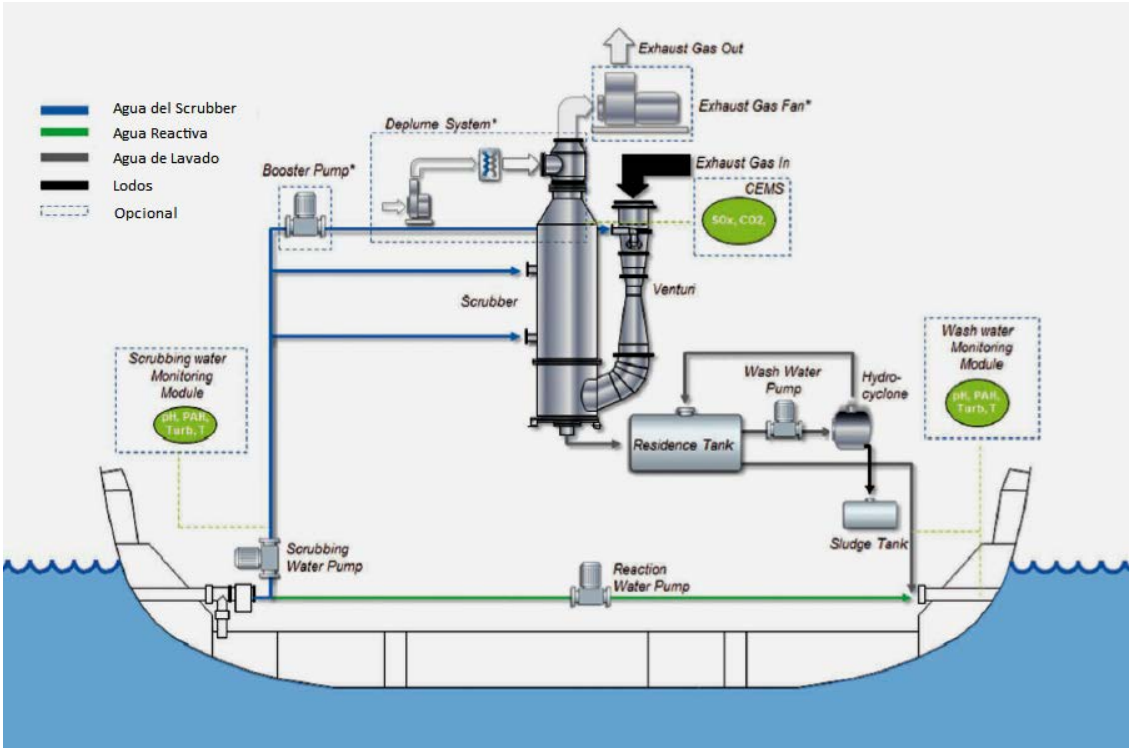


Figura 6 – Sistema de Limpieza de Gases de Escape con Circuito Abierto
Fuente: www.egcsa.com

Los gases entran al sistema por la parte inferior de la torre Scrubber y se pulverizan con agua de mar en dos etapas. Los óxidos de azufre reaccionan con el agua y forman ácido sulfúrico. En esta configuración del sistema no son necesarios aditivos ya que basta con la alcalinidad natural del agua del mar para neutralizar los ácidos.

El agua de lavado del scrubber después es tratada y monitorizada en la entrada y salida para asegurar el cumplimiento de los criterios de descarga al mar del MEPC. 184 (59), para no provocar daños en el medio ambiente marino.

Componentes del Sistema

- Tomas de agua de mar
- Bomba de agua para el Scrubber
- Unidad Scrubber
- Conducto de Salida de los Gases de Escape
- Ventilador de la Salida de los Gases de Escape
- Componente Venturi – Entrada de los Gases de Escape al Scrubber

- Tanque Almacén (Descarga del Scrubber)
- Bomba de Agua de Lavado
- Unidad Separadora (Lodos del agua)
- Tanque de Lodos del Scrubber
- Módulo de Monitoreo del agua del Scrubber (pH, HAP, Turbidez)
- Módulo de Monitoreo del agua de Lavado (pH, HAP, Turbidez)
- Bomba de Agua Tratada – (para la descarga al mar)

3.3 SCRUBBER DE TIPO CERRADO

O también puede ser de tipo cerrado, mediante el cual se utiliza agua dulce tratada con un químico alcalino como soda caustica para neutralizar el SOx y eliminarlo. El agua de lavado se hace recircular y se añade agua dulce adicional en caso de pérdidas de caudal. Una pequeña cantidad del agua de lavado se purga a la planta de tratamiento para ser descargada al mar. Normalmente, los sistemas cerrados de agua dulce tienen un rango de descarga del 0.1 al 0.3 m3/MWh aunque el sistema muestra que puede funcionar sin ninguna descarga durante periodos limitados.

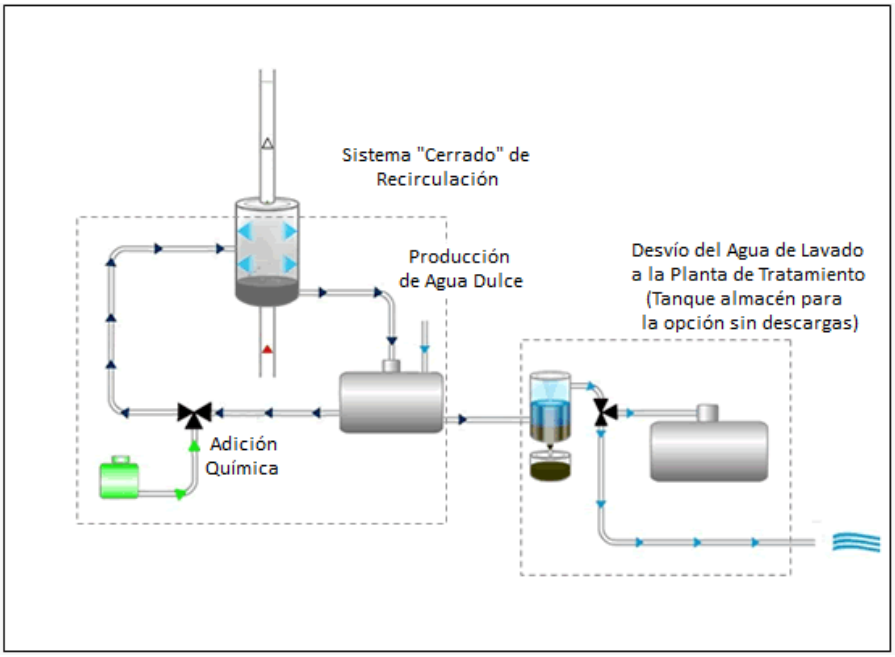


Figura 7 – Sistema Básico del Sistema Marino de Scrubber de Agua Dulce tipo "Cerrado"
Fuente: www.egcsa.com

Reacciones químicas

$$SO_2 + NaOH\ (Soda\ Caustica) \leftrightarrow Na_2SO_3(Sulfito\ de\ sodio) + H_2O$$

$$Na_2SO_3 + H_2O + SO_2 \leftrightarrow 2NaHSO_3\ (Bisulfito\ de\ sodio)$$

$$2NaOH + CO_2 \leftrightarrow Na_2CO_3(Carbonato\ de\ sodio) + H_2O$$

3.3.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE TIPO CERRADO

El agua de lavado que recircula en un circuito cerrado se pulveriza sobre los gases de escape que entran en el scrubber por la parte inferior. El agua de lavado previamente ha sido mezclada con soda caústica (NaOH). Los SOx de los gases de escape al entrar en contacto con la mezcla, reaccionan y se neutralizan. Del circuito cerrado de agua, se extrae una pequeña cantidad para ir purgando el circuito y es tratada con el fin de cumplir con los requisitos estipulados por la OMI.

Los efluentes limpiados pueden ser descargados de manera segura por la borda sin perjudicar al medioambiente marino. Mientras que si se requiere durante la navegación o fondeo del barco el modo de operación sin descargas al mar (descargas nulas), entonces los efluentes pueden ser guardados en un tanque hasta la descarga programada en puerto.

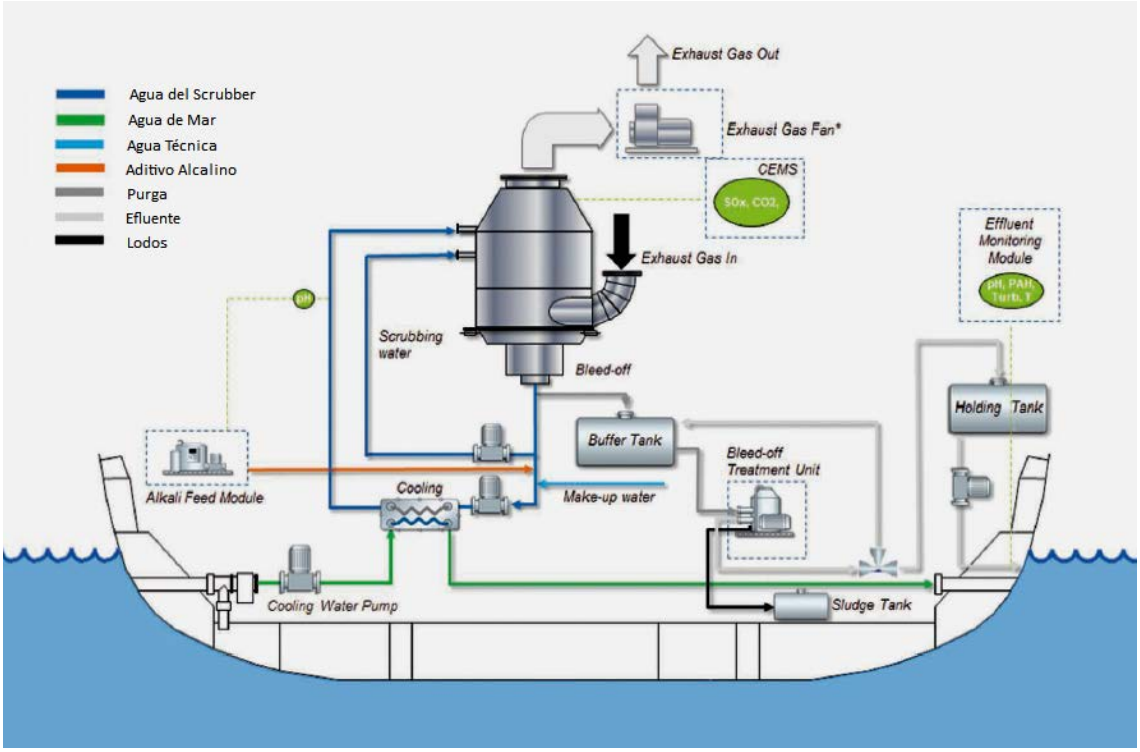


Figura 8 – Esquema de un circuito híbrido de un Sistema LGE.
Fuente: Wärtsilä Corp.

Componentes del Sistema

- Toma de Agua de Mar
- Bomba de Agua Salada – Toma agua de la toma de mar y alimenta el intercambiador de calor.
- Intercambiador de Calor
- Tanque Almacén del Reactivo Alcalino – Alimenta el circuito scrubber mediante el módulo de Alimentación Alcalino.
- Módulo de Alimentación Alcalino – Distribuye el reactivo en el circuito del agua de Scrubber para realizar la mezcla.

- Unidad de Tratamiento de Agua de Scrubber – Lleva a cabo la limpieza del agua purgada del circuito del scrubber.
- Calentador de Gases de Escape – Recomendado para optimizar el funcionamiento del scrubber y su eficiencia en cuanto al coste de operación.
- Módulo de Bombas de Agua de Scrubber – Maneja la circulación del circuito del scrubber.
- Unidad Scrubber – Instalada en la chimenea de los Gases de Escape.
- Sistema de Monitoreo de las Emisiones – Monitoriza de forma automática la calidad de los gases de escape.

Dentro del sistema scrubber de tipo cerrado se diferencian dos circuitos de circulación del agua.

Por un lado, un circuito de circulación de agua del scrubber que es bombeado desde el módulo de bombas de agua de circulación y alimenta directamente la primera fase de la unidad scrubber. Por otro lado, un circuito de circulación de agua de scrubber que se dirige hacia la unidad del intercambiador de calor con agua de mar. El agua refrigerada es llevada después a la segunda fase de la unidad scrubber. Durante el funcionamiento del sistema, ambos circuitos trabajan de forma continua circulando en paralelo.

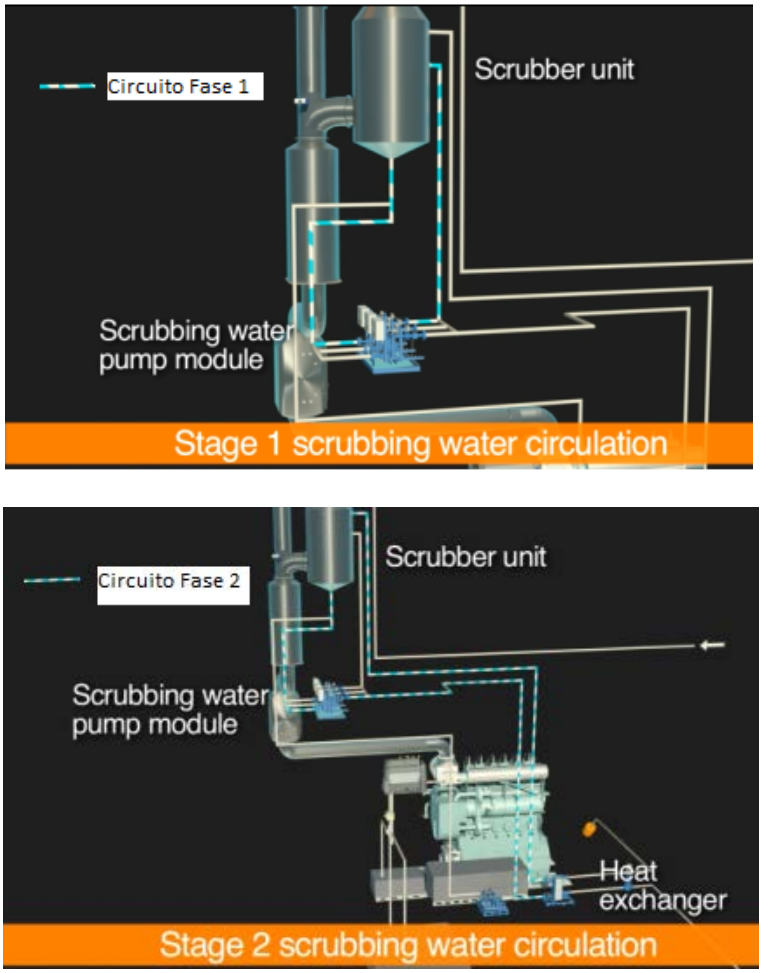
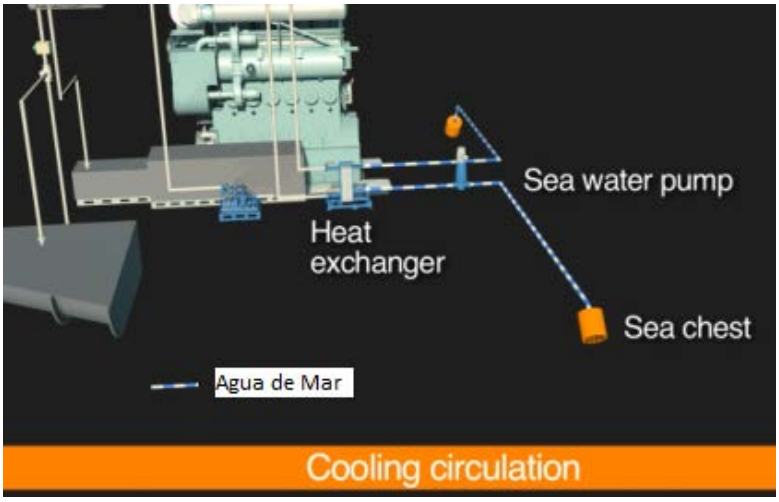
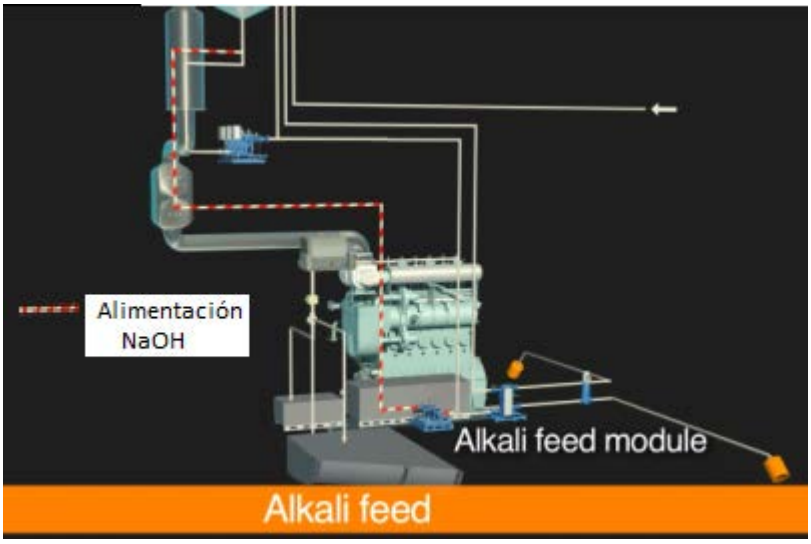


Figura 9 – Esquema de Funcionamiento del circuito cerrado de un sistema LGE. Fuente: Wärtsilä EGC Systems

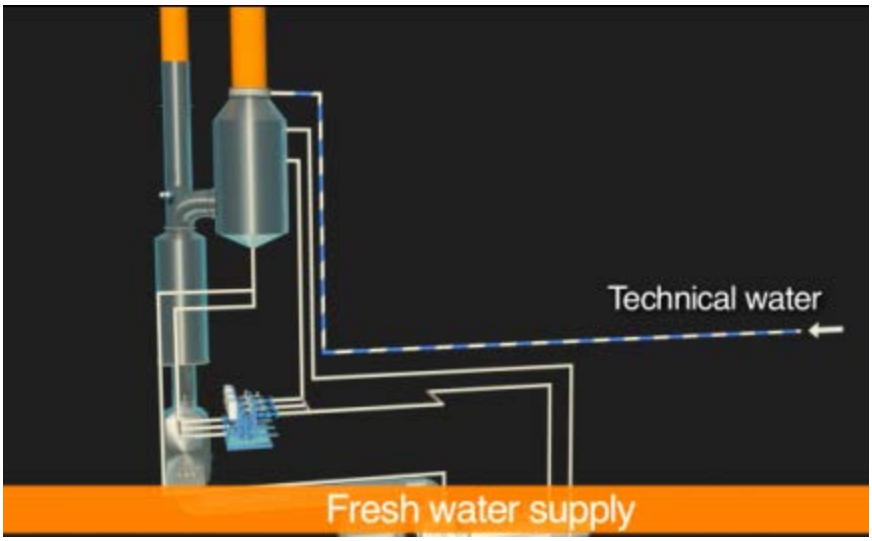
El intercambiador de calor es alimentado por la bomba de agua de mar desde la toma de mar con el fin de enfriar el agua que llega de la segunda fase de la unidad scrubber.



La soda caústica (NaOH) se mezcla en el circuito de agua del scrubber de la primera etapa mediante el módulo de alimentación alcalino instalado. La alimentación está controlada de forma automática según el nivel de pH.

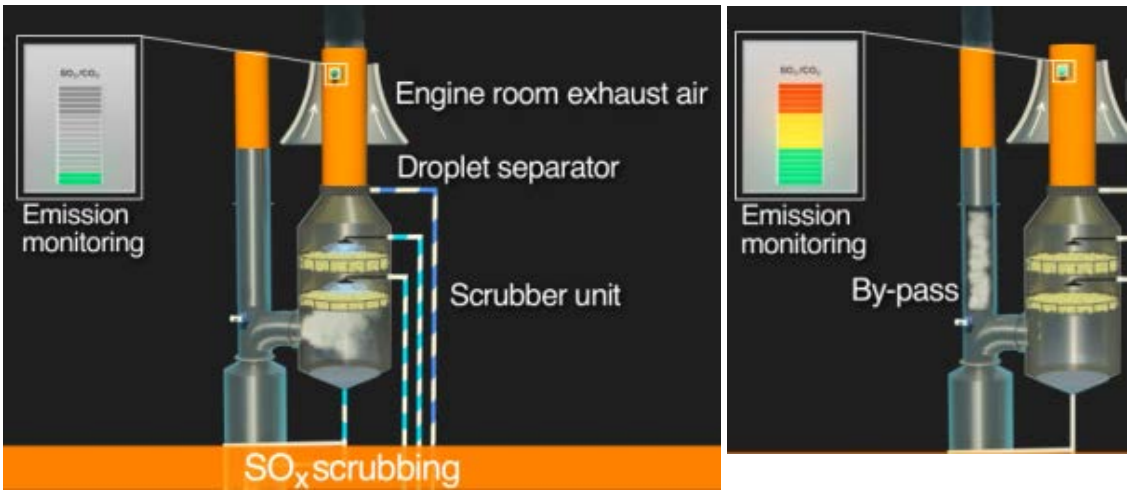


También hay una línea de alimentación con agua técnica hacia el circuito de agua de scrubber, con el fin de compensar las evaporaciones del agua que se producen dentro de la unidad scrubber, y también por la pequeña purga que se realiza. Esta agua es agua dulce o destilada, o bien producida a bordo mediante el uso de un evaporador o bien desde un tanque de almacén de agua dulce.

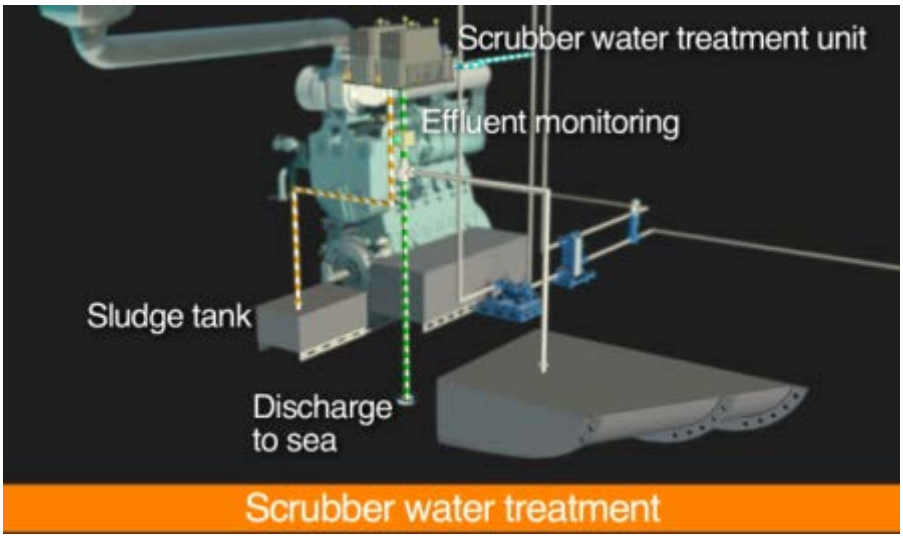


Dentro de la unidad Scrubber, como se ha mencionado anteriormente, el agua es pulverizada en dos etapas sobre unos moldes empaquetados que mejoran la mezcla de los gases de escape con el agua gracias a que hay una mayor superficie de contacto e intercambio para la limpieza de los SOx de los gases de escape que entran a la torre scrubber por la parte inferior. Para minimizar la evaporación del agua del scrubber, se instala un separador (*droplet)* arriba en la parte superior de la unidad.

Cuando el by-pass está abierto, los gases de escape no pasan por el sistema de limpieza scrubber, y salen directamente a la atmósfera. Esto también puede ser observado regularmente en el sistema de monitoreo de las emisiones que muestra la relación SO_2/CO_2.



En cuanto a la pequeña purga que se realiza del agua del sistema de circulación, ésta se lleva a la unidad de tratamiento del agua de scrubber. Allí se realiza una limpieza de dicho agua, y como resultado se obtienen en la salida de la unidad dos componentes: efluente y lodos.



- El efluente es el agua del scrubber limpiado que puede ser descargado al mar directamente. El módulo de monitoreo del efluente monitoriza la calidad del efluente de acuerdo con los requisitos de la OMI.

- El lodo del scrubber puede ser considerado como el producido normalmente por un equipo de depuración a bordo, y por tanto, puede ser almacenado en el mismo tanque de lodos.

En caso de que se requiere que las descargas al mar de los efluentes sean nulas, entonces los efluentes se almacenan en un tanque (*buffer tank)* en vez de ser descargados al mar.

3.4 SCRUBBER DE TIPO HÍBRIDO

Se trata de un sistema flexible que opera tanto en sistema cerrado como en sistema abierto que utiliza agua de mar para la limpieza de los SOx.

Cuando se opera en modo de circuito abierto, el agua de mar se mezcla con los gases de escape tal como se ha explicado en el sistema abierto y no se requiere ningún aditivo químico para la reacción de neutralización gracias a la alcalinidad natural del agua de mar.

Cuanto se trabaja en modo de circuito cerrado, la alcalinidad del agua del mar es sustituida por un producto alcalino, normalmente soda caústica, NaOH.

La ventaja del sistema híbrido es que puede adaptarse al circuito cerrado cuando se requiera, por ejemplo, mientras el barco está atracado en puerto, y durante las maniobras.

3.4.1.1 Humedad de los gases de escape después del scrubber

Por la combustión de los combustibles con hidrocarburos se produce una gran cantidad de agua, que por ejemplo en las emisiones de un motor diesel lento de dos tiempos, el agua representa un 5%.

La temperatura es un parámetro clave en determinar la masa de agua en una cantidad dada de gases de escape que puede contener el conducto de escape, es decir, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la masa de agua que se puede tener antes de alcanzar la saturación. Entre el motor y la unidad de LGE la temperatura de los gases de escape puede ser aproximadamente de 300ºC, pero después de pasar por el sistema LGE la temperatura se reduce significativamente, quizás hasta alrededor de 85% y el agua en la fase gaseosa se condensa al estar en contacto con el agua de lavado relativamente fría. Esto quiere decir que la masa de agua en una cantidad dada de gases de escape puede ser menor a la salida de la unidad LGE que a su entrada, es decir, no es necesariamente añadir agua a los gases de escape mediante el proceso de scrubbing.

Si bien esto depende de la temperatura del agua de lavado y la masa real puede reducirse, los gases de escape serán completamente saturados a la salida de la unidad LGE. Normalmente, un separador de partículas elimina cualquier gotita de líquido arrastrada, y luego se utiliza un recalentador para elevar la temperatura de modo que el gas de escape no sea completamente saturado. Este hecho evita que el agua en la fase gaseosa forme vapor de agua y se condense después en superficies frías. A la salida de la chimenea hacia la atmósfera, el gas de escape se diluye inmediatamente, dejando caer los niveles de saturación. De nuevo, esto evita la condensación del agua por lo que no se forma un penacho a la salida del guardacalor.

Los tubos de escape en los motores sin instalación de scrubber se mantienen normalmente a una temperatura de 180ºC que es la temperatura por encima del punto de rocío de los ácidos sulfúricos y sulfurosos para evitar la condensación sobre superficies de metal y, por lo tanto, la corrosión. Con la unidad scrubber se reduce significativamente la temperatura de los gases de escape y los ácidos a base de azufre se condensan dentro de la unidad LGE. El ácido sulfúrico es altamente soluble en agua y el ácido sulfuroso, que se detecta en fase gaseosa, pero no en solución, se ioniza en bisulfito y sulfito produciendo el exceso de iones de hidrógeno, es decir, acidez. Con el fin de evitar que el líquido ácido sea arrastrado con los gases de escape, se utiliza un separador de partículas en la salida de la unidad LGE para eliminar las gotas de líquido arrastradas en el flujo.

3.4.1.2 Cualidades del agua suministrada al sistema de limpieza de gases de escape

El factor principal para la neutralización del ácido sulfúrico, y por lo tanto, de la reducción del SO_2, es la alcalinidad del agua usado para el “lavado” de los gases de escape, más que su salinidad. Dicho nivel de alcalinidad está disponible en el agua de mar, el cual también es salino, pero también es posible que se añada de forma artificial en forma de químico alcalino. La alcalinidad no se refiere únicamente al pH, sino que también a la habilidad del agua para resistir cambios en su pH. Los materiales adecuados normalmente son los bicarbonatos y

carbonatos, pero alrededor de un 4.0% de la neutralización se provee por boratos y otros iones en concentraciones más bajas. La alcalinidad total es la suma de todos estos aspectos. La salinidad define el contenido en sal del agua. La salinidad del agua de los océanos es de aproximadamente 3.5% en peso. Algunas aguas pueden tener una alcalinidad superior y salinidad nula dependiendo de la concentración en calcio.

La alcalinidad en océano abierto es normalmente constante y de un valor alto, aproximadamente 2200-2300 µmol/l. La alcalinidad en algunas áreas de las costas, en los puertos, ríos y estuarios puede ser afectada por diferentes áreas de drenaje de los ríos de alrededor, resultando en unas variaciones en su química. Los ríos que corren a través de suelos ricos en carbonatos tendrán una alta alcalinidad. Por ejemplo, los ríos del norte del Mar Báltico fluyen a través de lechos de roca de granito que da lugar a una baja alcalinidad, aproximadamente 800-1300 µmol/l, mientras que los ríos del sur fluyen por lechos de roca de calcita que resulta en altas concentraciones de carbonato y por tanto, una alta alcalinidad de aproximadamente 1650-1950 µmol/l. En general, la alcalinidad en el Mar Báltico es menor que en las zonas de mar abierto debido al mínimo intercambio de aguas entre los estrechos daneses. A niveles bajos de alcalinidad, el scrubber con agua de mar, puede seguir funcionando, pero en algunos casos la eficiencia de limpieza puede verse reducida.

La alcalinidad del mar y los puertos abiertos al mar es normalmente alta y por tanto, aceptable para los sistemas de limpieza de gases de escape, además de muchos ríos que también tienen una alta alcalinidad. A pesar de que no es posible realizar un monitoreo continúo de la alcalinidad, ésta se puede comprobar por tratamientos químicos, donde no se practica enteramente, lo cual no es del todo posible a bordo del buque. Aunque no haya una relación directa entre la salinidad y la alcalinidad o el pH y la alcalinidad, el monitoreo en línea del agua de los sistemas de limpieza de los gases de escape mediante sensores de pH y de salinidad se utiliza como un indicador de posibles problemas, es decir, una salinidad baja y/o el pH sugiere la entrada de agua salobre.

3.5 MARCO LEGAL DE LOS SISTEMAS SCRUBBER

En cuanto a la normativa internacional sobre los requisitos de los métodos alternativos para el cumplimiento de las normativas de las emisiones de óxidos de azufre a la atmósfera establecidas en el Anexo VI del MARPOL, las directrices sobre los sistemas LGE revisadas en el MEPC 59/24/add.1 – Anexo 9 2009 especifican los requisitos para el ensayo, certificados de inspección y verificación de los sistemas de limpieza de gases de escape para asegurar que proveen la reducción eficaz de las emisiones. Como fundamento de utilización de la vigilancia de las emisiones de SOx, se utilizará el parámetro SO_2 (ppm)/CO_2 (%) como base para el sistema de control. Por tanto, el cumplimiento se demuestra basándose en los valores de la relación SO_2 (ppm)/CO_2 (% v/v) de la tabla siguiente:

Contenido de azufre en el combustible (% m/m)	Relación de emisiones SO_2 (ppm)/CO_2 (% v/v)
4,50	195,0
3,50	151,7
1,50	65,0
1,00	43,3
0,50	21,7
0,10	4,3

Tabla 11: Límites del contenido de azufre del fueloil especificados en las reglas 14.1 y 14.4 del Anexo VI MARPOL 73/78 y valores de emisión correspondientes

Nota: Los límites de las relaciones de emisiones sólo se aplican cuando se utilicen combustibles destilados o fueloil residuales derivados del petróleo. Para la aplicación del método basado en la relación, véase el apéndice.

Los buques que vayan a utilizar parcial o totalmente un sistema de limpieza de los gases de escape deberían contar con un Plan de Cumplimiento de las Emisiones de SOx (SECP) aprobado.

Las directrices se aplican a todas las unidades LGE instaladas a bordo de máquinas que consuman fueloil[10], excluidos los incineradores de a bordo, y se permiten dos planes:

3.5.1 PLAN A

- **Plan A: Aprobación, Reconocimiento y Certificación del Sistema LGE mediante comprobaciones de los parámetros y emisiones.**

Está basado en la homologación y certificación del sistema de limpieza de los gases de escape. Se debe obtener un certificado de cumplimiento para las zonas SECA. Este documento indica que el sistema viene con un manual técnico y que se llevan a cabo las mediciones del agua de lavado.

Las operaciones del Plan A con el fin de realizar las comprobaciones correspondientes, incluye:

a) Aprobación de la unidad;
b) Unidades fabricadas en serie;
c) Aprobación de la gama de productos.

<u>Aprobación de la unidad:</u>

Una unidad LGE debería certificarse como apta para satisfacer tanto el valor límite (el valor certificado) que especifique el fabricante (es decir, el nivel de emisión que la unidad puede alcanzar de manera continua) con un fueloil que cumpla el contenido máximo de azufre en % masa/masa especificado por el fabricante, y para la gama de los parámetros de

[10] **Unidad de combustion de fueloil:** Todo motor, caldera, turbina de gas u otro equipo alimentado con fueloil, excluidos los incineradores de a bordo.

funcionamiento para los que ha de aprobarse. El valor certificado debería como mínimo ser tal que el buque se explote en las condiciones prescritas en las reglas 14.1 y/o 14.4 del Anexo VI del Convenio MARPOL.

Unidades fabricadas en serie:

En el caso de las unidades LGE nominalmente análogas y con los mismos caudales másicos que se certifican en virtud de lo establecido en la sección "aprobación de la unidad", y para evitar que cada unidad LGE se someta a prueba, el fabricante del equipo puede presentar una conformidad de acuerdo de producción para que la acepte la Administración.

Aprobación de la gama de productos:

En el caso de una unidad LGE que tenga un proyecto idéntico, pero distintas capacidades de caudal másico máximo de los gases de escape, la Administración puede aceptar que, en lugar de someter a prueba todas las capacidades de las unidades LGE de conformidad con la sección "Aprobación de la unidad", los ensayos de dichos sistemas de limpieza se realicen con referencia a tres capacidades distintas, siempre y cuando estos ensayos se lleven a cabo a intervalos que incluyan los índices de capacidad más alto y más bajo de la gama y uno intermedio.

- **Límites de las emisiones**

  - Cada unidad LGE debería ser apta para reducir las emisiones y que éstas sean iguales o inferiores al valor certificado en cualquier punto de carga cuando se esté funcionando de conformidad con los criterios explicados en los anteriores apartados.

  - Las unidades LGE instaladas en los motores propulsores principales diesel deberían satisfacer lo anteriormente mencionado en todas sus cargas que se encuentren entre el 25% y el 100% de todos los rangos de carga de dichos motores.

  - Las unidades LGE instaladas en los motores auxiliares diesel deberían satisfacer lo prescrito también anteriormente en todas las cargas que se encuentren entre el 10% y el 100% del rango de carga de dichos motores.

  - Las unidades LGE instaladas en motores diesel utilizados con fines de propulsión y como motores auxiliares deberían satisfacer lo prescrito en la regla para motores auxiliares previamente explicada.

  - Las unidades LGE instaladas en calderas deberían satisfacer lo prescrito en la primera regla en todas las cargas que se encuentren entre el 10% y el 100% de la gama de carga (régimen de vaporización) o, si el margen de regulación es inferior, por encima de la gama de carga real de las calderas.

A fin de demostrar el rendimiento, deberían medirse las emisiones en cuatro puntos de carga como mínimo:

- En el 95-100% del caudal másico máximo del gas de escape para el que se certificará la unidad.

- Entre el +/- 5% del caudal másico mínimo del gas de escape para el que se certificará la unidad.

- Los dos puntos restantes se espaciarán por igual entre los caudales másicos máximo y mínimo del gas de escape.

En el Plan A, si no está instalado un sistema de vigilancia continua, se recomienda que se realice una comprobación aleatoria diaria de la calidad de los gases de escape en términos de la relación SO_2 (ppm) / CO_2 (%) para comprobar el cumplimiento.

3.5.2 PLAN B

- **Plan B: Aprobación, Reconocimiento y Certificación del Sistema LGE mediante la Vigilancia Continua de las emisiones de SOx.**

Se basa en la vigilancia continua de las emisiones de SOx. El sistema para la vigilancia debe estar aprobado por la Administración del país de abanderamiento del buque, y debe ser capaz de aportar resultados que serán usados para demostrar el cumplimiento de la normativa.

El presente Plan debería utilizarse para demostrar que las emisiones procedentes de una unidad de combustión de fueloil equipada con un sistema LGE presentarán, con dicho sistema funcionando, el valor de emisión prescrito (es decir, el que figura en el SECP) o uno inferior en cualquier punto de carga, incluida la fase de transición, de conformidad con lo dispuesto en las reglas 14.1 y/o 14.4 del Anexo VI del Convenio MARPOL.

Las emisiones tanto de SOx como de CO_2 deben ser medidas por ambos sistemas. También sería obligatorio para ambos esquemas un manual de control de a bordo para detallar cómo se logra el cumplimiento y demostrarlo.

Ensayos Relativos a las Emisiones

Debería medirse el CO_2 en seco utilizando un analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR). Debería medirse el SO_2, en seco o húmedo, utilizando analizadores infrarrojos no dispersivos (NDIR) o analizadores ultravioleta no dispersivos (NDUV) y con equipo complementario, como por ejemplo, secadores, según se necesite.

Cuando se mide el SO_2 in situ, también habrá que determinar el contenido de agua en la corriente del gas de escape en ese punto para ajustar la lectura del SO_2 a un valor correspondiente a la base seca.

Manual de Vigilancia de a Bordo (OMM)

La elaboración del OMM debería abarcar la unidad LGE instalada junto con el equipo de combustión de fueloil que tenga que ser identificada y para los cuales se tenga que demostrar el cumplimiento.

En el OMM se deberían incluir, como mínimo, los siguientes aspectos:

- Los sensores que han de utilizarse para evaluar el rendimiento del sistema LGE y la vigilancia del agua de lavado, así como las prescripciones relativas a su servicio, mantenimiento y calibración;

- Los puestos desde donde se realizarán las mediciones de las emisiones de los gases de escape y la vigilancia del agua de lavado, junto con los datos relativos a todos los servicios auxiliares que resulten necesarios, como por ejemplo líneas de trasvase de muestras y unidades de tratamiento de muestras, además de todas las prescripciones que guarden relación con el servicio y el mantenimiento;

- Los analizadores que vayan a ser utilizados, así como las prescripciones relativas a su servicio, mantenimiento y calibración;

- Los procedimientos de calibrado y de calibración de fondo de escala del analizador; y

- Otros datos o información pertinente para el correcto funcionamiento del sistema de vigilancia o su utilización con el fin de demostrar el cumplimiento.

El OMM debería indicar cómo se llevará a cabo el reconocimiento del sistema de vigilancia.

Plan de Cumplimiento por el Buque de las Emisiones de SOx (SECP)

Con objeto de cumplir lo prescrito en las reglas 14.1 y 14.4 del Anexo VI del Convenio MARPOL, todos los buques que vayan a utilizar una unidad LGE, en parte o en su totalidad, deberían contar con un SECP aprobado por la Administración.

En el SECP se debería enumerar cada elemento del equipo de combustión de fueloil que tenga que ajustarse a las prescripciones para funcionar de conformidad con las prescripciones de las reglas 14.1 y/o 14.4.

3.6 MONITOREO DE LAS EMISIONES DEL SCRUBBER Y ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

En el Esquema B de las Directrices IMO de los Sistemas de Limpieza de Gases de Escape se permite el control permanente de la relación de emisiones SO_2/CO_2 y su registro, para garantizar que las emisiones después de la unidad de limpieza de los gases de escape se corresponden con los porcentajes de límites vigentes de azufre en los combustibles.

Aunque el azufre contenido en el combustible forme tanto dióxido de azufre como trióxido de azufre, conocidos colectivamente como SOx, el SO_2 es el que predomina comprendiendo >95% de las emisiones de azufre totales. Por lo tanto, las emisiones de SOx se cuantifican mediante la monitorización de la línea de SO_2.

A pesar de que por las reacciones analizadas anteriormente al usar agua de mar o añadidos químicos para la limpieza de los gases de escape afectan también a las emisiones de CO_2, según el estudio del 2007 *"Sea Water Scrubbing – Does it contribute to increased global CO_2 emissions",* parece haber un beneficio neto del CO_2 por el uso de los combustibles de alto contenido en azufre con sistemas de limpieza de gases de escape. También se indica que las emisiones de SO_2 se pueden reducir prácticamente hasta cero, y además, las emisiones de partículas se reducen también significativamente, lo que contribuye a la mejora de la calidad del aire.

En cuanto al nivel de reducción de las partículas de materia, éste depende de la cantidad de azufre en el combustible quemado, siendo las tasas de emisión de PM10[11] de base a 0,23 g/kWh con combustibles destilados (0,24% azufre) y de 1,35% g/kWh para el combustible residual (2,46% de azufre)[12]. Usando la tasa de emisión específica para el combustible residual, con un consumo anual aproximado de este combustible por el transporte marítimo global de unas 250 millones de toneladas y un consumo específico medio de 200 g/kWh, se estima que por año se emiten alrededor de 1,7 millones de toneladas de materia particulada. Teniendo en cuenta la tasa de eliminación típica de alrededor del 80% utilizando este método de limpieza, existe el potencial para evitar aproximadamente 1,35 millones de toneladas de emisiones de materia particulada a la atmósfera por año, así como eliminar el 98% de dióxido de azufre.

La materia particulada eliminada de los gases de escape, a su vez debe ser eliminada del agua de lavado por una planta de tratamiento para evitar que se descargue al mar. La cantidad de lodos no sólo depende de la cantidad de partículas que se eliminan, sino también de la cantidad de agua restante que se mezcla con ella después del tratamiento. La cantidad típica que se maneja en una instalación LGE de agua de mar sería aproximadamente de 0,6 toneladas por 100 toneladas de combustible residual consumidas.

Por otro lado, la OMI requiere que se monitoricen continuamente los siguientes parámetros del agua de lavado y que se registren los resultados durante el tiempo y la posición del buque.

Parámetros de registro:

[11] **PM10:** Partículas de materia de inquemados con un diámetro aerodinámico nominal inferior a 10µm.
[12] **Datos extraídos del documento:** *Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulphur Oxides and Particulate Matter.*Technical Support Document. USEPA.

- pH (con la compensación de temperatura)
- PAH
- Turbidez

3.6.1.1 Valores del pH de descarga del agua de los sistemas de limpieza de gases de escape

Un valor bajo del pH del agua puede tener impactos adversos en los organismos marinos como en los moluscos y crustáceos; por ello, la Organización Marítima Internacional ha establecido unos valores límite de pH para el agua que se descarga en el mar. Generalmente, no se considera que haya ningún daño para el medio ambiente ante la exposición a corto plazo del agua de mar con un pH de 6.5, límite que debe aplicarse mediante una de las dos normas siguientes. El pH debe ser medido continuamente y los datos deberán registrarse para confirmar el cumplimiento con las directivas de los sistemas LGE de la OMI.

- La descarga del agua de mar deberá tener un pH no inferior al medido de 6.5 en la descarga del buque con la excepción de que durante la maniobra y tránsito, la máxima diferencia entre la entrada y salida de la descarga es de 2 unidades pH cuando se realizan las mediciones en estos puntos de descarga. Con la figura siguiente se entenderá mejor esta explicación de los puntos de medición del pH en la descarga al mar.

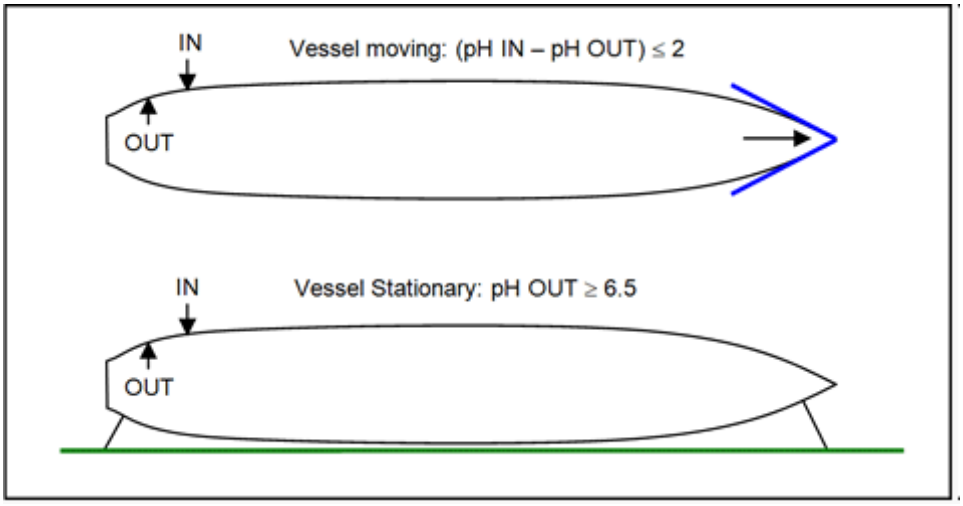


Figura 10 – Esquema de las mediciones y valores límites de pH del agua de lavado en la descarga. Fuente: www.egcsa.com

Los dos criterios del valor de pH en la descarga, el del buque estacionado y el buque en movimiento, permiten la adopción de unos estándares más estrictos para los buques estacionados en puertos cuando los motores principales están parados, mientras que se sigue teniendo un criterio apropiado para los buques en movimiento. Para los buques en marcha, gracias a la turbulencia de la estela del barco se consigue una mezcla eficaz entre el agua descargada y el agua de mar fresca que permite recuperar rápidamente el nivel de pH del agua circundante.

- Durante la puesta en marcha de la unidad de limpieza tras la instalación, el penacho de agua de lavado descargada debe medirse desde fuera del buque (en reposo, en el puerto) y el pH medido en el punto de descarga monitorizado será registrado cuando el penacho a 4 metros del punto de descarga tendrá un valor igual o superior a pH 6.5. El valor pH del agua descargada que alcanza el mínimo pH de 6.5 será el límite de valor pH de descarga por la borda del sistema de limpieza de gases de escape del buque.

En la siguiente figura se verá más detalladamente la medición de los valores pH que se regulan en la normativa.

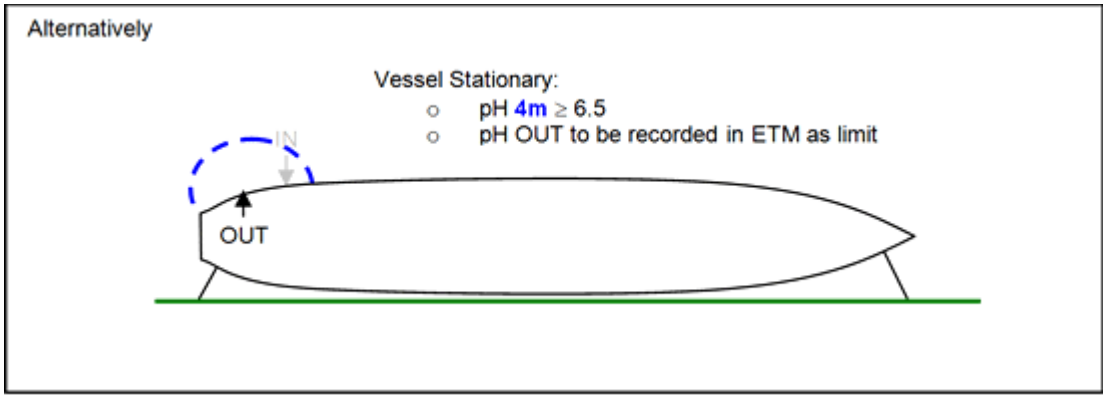


Figura 11 – Esquema de las mediciones de los valores de pH para calibrar el límite permitido de valor pH del sistema LGE instalado.
Fuente: www.egcsa.com

Este método alternativo de cumplimiento de la medición de pH está basado en el principio *CORMIX* [13]que es usado por ejemplo, por la EPA de EE.UU., donde se considera un margen de 4 m como zona de mezcla inicial entre el agua descargada por la borda del buque y el agua de alrededor del buque.

Una vez descritos los valores límites del pH del agua de descarga para el cumplimiento con el medio ambiente y las directrices de los sistemas LGE de la IMO, se explican los valores habituales del pH del agua de descarga. El pH del agua puede ser inferior a pH 3, y por ello, para evitar un impacto negativo en los ecosistemas y problemas de corrosión en el sistema del buque, el agua de lavado puede ser disuelto para incrementar el nivel de pH al permitido por la normativa. Para reducir la energía consumida por las bombas, puede utilizarse el agua de mar ya utilizado para la refrigeración de otros servicios en la sala de máquinas para mezclarla con el agua de lavado antes de la descarga. Los estudios demuestran que el pH del agua de lavado se recuperará fácilmente con el agua circundante. En una evaluación de impacto ambiental de un scrubber con agua de mar realizada a 10 meses de prueba, las muestras se tomaban directamente en el frente de descarga del agua de lavado del buque atracado o fondeado en puerto a diferentes distancias: 1 a 5 metros, 50 metros, 350 metros y 700 metros. Mientras que las muestras tomadas en el interior del buque fueron de pH 6.2 a pH 6.5, en las tomadas en el exterior del buque ninguna mostraba valores inferiores a éstos.

[13] **CORMIX – Cornell Mixing Zone Expert System –** Sistema que simula el funcionamiento de descargas a partir de focos puntuales y continuos sobre zonas reguladoras de mezcla. Predice el comportamiento de la mezcla y la geometría de la pluma. Se utiliza principalmente para simular los efectos a corta distancia de vertidos de aguas residuales.

3.6.1.2 Formación De HAP

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son un amplio grupo de compuestos orgánicos que consisten en dos o más anillos condensados aromáticos constituidos en su totalidad por carbono e hidrógeno. Mientras que las propiedades físico-químicas de los HAP varían considerablemente, la propiedad semivolátil de algunos HAP hace que sean muy móviles en todo el medio ambiente distribuyéndose por el aire, el suelo y el agua. Algunos HAP son transportados a larga distancia a través de la atmósfera, lo que los convierte en un problema medioambiente transfronterizo. La Agencia de Protección del Medio ambiente de EE.UU. ha identificado 16 compuestos HAP como sustancias contaminantes prioritarias. Algunos de estos compuestos son cancerígenos y/o mutagénicas para los mamíferos; además, tienen también una toxicidad aguda y efectos sub-letales en algunos organismos acuáticos. Los HAP también pueden bioacumularse en moluscos y crustáceos comestibles, que serían una vía de entrada para los seres humanos.

Los HAP están presentes de forma natural en el petróleo y también se producen como subproductos de la combustión del combustible. Una fuente de los HAP es la combustión incompleta del combustible pesado y aunque los motores y calderas están diseñados para optimizar la combustión del combustible, los gases de escape siempre contienen una proporción de materia de combustión incompleta. Esto da lugar a emisiones de hidrocarburos gaseosos y partículas, de los cuales una proporción contienen hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Hay una gran variedad de fuentes de HAP que entran en el medio ambiente, tanto de forma natural como artifical. En estas fuentes se incluyen las aguas residuales industriales, escorrentía de carreteras, quema de combustibles fósiles, derrames de petróleo, bosques y los incendios del cultivo, partículas volcánicas y filtraciones naturales del petróleo. También la concentración de HAP depende de las variaciones estacionales, por ejemplo, se pueden notar unos aumentos durante el invierno debido a la calefacción de los edificios en pueblos y ciudades. Los HAP de menor peso molecular, con dos o tres anillos, normalmente están presentes de forma disuelta en agua o gas en la atmósfera. Sin embargo, cuanto mayor es el peso molecular, más hidrofóbicos son los HAP y tienen mayor facilidad de unión a partículas. Por lo tanto, las concentraciones más altas de HAP se encuentran en los sedimentos.

Los sedimentos pueden ser removidos durante las maniobras en aguas poco profundas de un barco y como resultado puede entrar en el sistema de agua de lavado. Por consiguiente, la OMI requiere que la concentración de HAP del agua del fondo en la entrada para agua de lavado sea tenido en cuenta a la hora de realizar la medición de concentración de HAP en el agua de descarga del sistema. También se requiere que el control de la descarga sea antes de cualquier dilución de la concentración del pH del agua de lavado.

Los sistemas de limpieza de gases de escape son capaces de eliminar el 80% de la materia particulada, por tanto, también las sustancias de mayor peso molecular así como generalmente los HAP más tóxicos de la corriente de los gases de escape. Previo a que el agua de lavado sea devuelta al mar se debe realizar un tratamiento en la planta para eliminar estas partículas. Los HAP de peso molecular bajo pueden ser disueltos en el agua de lavado con un

control continuo de monitoreo para asegurar que el tratamiento del HAP es efecto y no hay impactos ambientales en los ecosistemas marinos. Además, puesto que los HAP se encuentran presentes de forma natural en el petróleo, su monitorización asegura que no habrá combustibles sin quemar que se viertan al agua del mar.

La OMI tiene establecidos límites para el monitoreo directo de los fenantrenos[14], basados en los estudios hasta la fecha que demuestran que no hay influencias negativas del agua de lavado de los Sistemas LGE en entornos portuarios y que este compuesto es el más frecuente de los 16 HAP determinados por la EPA Estadounidense que se encuentran en el agua de lavado de los sistemas a bordo. Por tanto, los HAP deben medirse continuamente de forma directa (en línea) y registrarse sus valores de forma segura para confirmar el cumplimiento de las Directrices de los Sistemas de LGE de la OMI.

3.6.1.3 Medición De La Turbidez

La turbidez es una medida del grado en el que el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. A mayor cantidad total de sólidos suspendidos en el agua, más borrosa parece ser el agua y por tanto, mayor será la turbidez.

Hay varios parámetros que influyen en la turbidez del agua, incluyendo:

- El fitoplancton (algas microscópicas)
- Los florecimientos de algas
- Los sedimentos de la erosión
- El re-suspendido de los sedimentos del fondo marino
- La descarga de residuos
- La escorrentía urbana

Cuando se combina con la medición de los HAP, la medición de la turbidez es un medio eficaz de monitoreo continuo en línea para el desempeño eficaz de la planta de tratamiento del agua de lavado.

La OMI ha establecido también unos límites de turbidez para el agua de lavado, sin embargo, debido a que la medición puede verse afectada por la turbidez del agua que entra al sistema de limpieza de gases de escape, es necesario dar un tiempo de 15 minutos de circulación entre el agua en la entrada y la descarga (previo a permitir cualquier dilución para la corrección del pH). Un motivo típico por el que existe la turbidez en el agua de entrada es la alta perturbación de los sedimentos durante las maniobras del barco en aguas poco profundas.

La turbidez, al igual que los HAP, se deben medir de forma continua en línea y sus datos deberán registrarse de forma segura para confirmar el cumplimiento de las Directrices de los Sistemas LGE de la OMI.

[14] **Fenantreno:** Hidrocarburo cristalino presente en la hulla de alquitrán, utilizado especialmente en la fabricación de tintes y drogas sintéticas.

3.6.1.4 Los Nitratos

En la cámara de combustión de un motor se producen una serie de reacciones que oxidan una pequeña parte del nitrógeno del aire de carga y la mayor parte del nitrógeno de combustible, de manera que se forma óxido nítrico (NO). En el enfriador de gases de escape que se encuentra después de la cámara de combustión se convierten aproximadamente 5-10% de los NO en dióxido de nitrógeno (NO_2) en presencia de un exceso de oxígeno. Colectivamente el NO y NO_2 se conocen como NOx.

Cuando se disuelve el NO_2 en agua, pasa por una serie de reacciones y se convierte en ácido nítrico (HNO_3), que luego es fácil de ionizar a nitrato (NO_3-).

Reacciones químicas

$$2NO\ (\text{Óxido Nítrico}) + O_2 \leftrightarrow 2NO_2\ (\text{Dióxido de Nitrógeno})$$

$$2NO_2 + H_2O \leftrightarrow HNO_2\ (\text{Ácido nitroso}) + HNO_3\ (\text{Ácido Nítrico})$$

$$3HNO_2 \leftrightarrow HNO_3 + 2NO + H_2O$$

$$2NO + O_2 \leftrightarrow 2NO_2$$

Así que, en general,

$$4NO_2 + 2H_2O + O_2 \leftrightarrow 4HNO_3\ (\text{Ácido Nítrico})$$

El nitrato es un nutriente importante en el mar y para el sobre-enriquecimiento, que se conoce como eutrofización. Si es suficiente promueve el crecimiento de organismos tales como las algas. Un rápido aumento o acumulación en la población de las algas se conoce como un florecimiento de algas, que puede interrumpir el funcionamiento de un sistema acuático, causando una variedad de problemas tales como una falta de oxígeno en el agua, necesario para sobrevivir para los peces, moluscos y crustáceos.

Para la producción de algas microscópicas se requiere la fotosíntesis dentro de los límites de una proporción fija de nitrógeno, fósforo y carbono dentro de un sistema marino. Por consiguiente, la producción no sólo depende de la cantidad real de nitrógeno añadido sino también del fósforo. En los océanos la disponibilidad de fósforo es generalmente considerada como el factor limitante y el nitrógeno adicional no tiene ningún efecto en cuanto al crecimiento de esta especie. Sin embargo, cerca de la costa o en los alrededores de los puertos, donde hay una mayor concentración y disponibilidad de fósforo (por ejemplo, de los aportes fluviales, la escorrentía de la agricultura o la entrada directa de las aguas residuales domésticas), la adición de estos nitratos sí puede conducir a una mayor producción de biomasa.

Para determinar la influencia de la adición de nitrógeno, además del agua de lavado de los sistemas de limpieza de gases de escape, los niveles de nitrato fueron monitorizados durante un periodo de diez meses y se realizó un cálculo para demostrar el potencial de producción de biomasa. Esto determinó que el potencial de aumento de la producción en un determinado

año sería menor que la producción real durante un día soleado por metro cuadrado, como ejemplo.

El nivel de las emisiones de NOx se rige principalmente por el diseño y la operación del motor, la temperatura de combustión y en menor medido por el contenido de nitrógeno del combustible – la OMI establece los valores orientativos de 4% de nitrógeno para los combustibles residuales y 0% para los combustibles destilados –. Las emisiones de NOx consisten principalmente de 90-95% de óxido nítrico (NO) y aproximadamente un 5-10% de dióxido de nitrógeno (NO_2). Mientras que el NO no se disuelve fácilmente, el NO_2 es soluble y por tanto es probable que sea eliminado en gran parte durante el proceso de limpieza de los gases de escape y formar nitrato en el agua de lavado del sistema. Cuando este proceso se compara con la eliminación de SO_2, a pesar de que la cantidad de NO_2 eliminada es relativamente pequeña, pero es constante para un motor que quema combustibles residuales y tiene instalado un sistema de limpieza de gases de escape. El impacto de los nitratos producidos se demuestra que también son mínimos utilizando este sistema. Por estas razones, la OMI no requiere un monitoreo continuo de los nitratos en sus directrices de los Sistemas LGE, como sí ocurre con el pH, HAP, y la turbidez que se han explicado anteriormente. Sin embargo, se ha fijado un límite de emisiones de nitratos basado en la eliminación del 12% de los NOx de la corriente de los gases de escape (valor basado en un estudio de un diseño hipotético de scrubber).

4 APLICACIÓN DEL SISTEMA A UN BUQUE RO-PAX

Los principales fabricantes de estos sistemas pueden suministrar unidades de limpieza de gases de escape para los motores marinos de mayor tamaño existente. Otros fabricantes proporcionan unidades individuales para motores de menores potencias, de 20 a 25MW por ejemplo, que pueden disponerse para operar de forma paralela. Y en cuanto a las unidades de limpieza más pequeñas que se encuentran son para motores de potencias entre 400 kW y 2 MW, aunque hay algún fabricante que puede adaptar cualquier sistema a la potencia requerida.

Para los casos de retrofit, la disponibilidad del espacio para fijar la unidad de limpieza de gases de escape es un factor limitante, aunque dependiendo del diseño se puede adaptar a ser instalado dentro o fuera de la chimenea existente o como expansión de ésta. Una unidad de sistema húmedo podrá ser instalada por encima de una caldera o economizador y puede ser sustituto también del silenciador de los gases de escape. Pero para instalar el sistema y encontrar el sitio adecuado, no hay que considerar únicamente las dimensiones del equipo sino que también el peso que ocupa la unidad en términos de estabilidad del buque.

En los sistemas húmedos que necesiten una planta de tratamiento del agua la mayoría de fabricantes sugieren una acomodación flexible y no tiene por qué ser necesariamente dentro de la sala de máquinas. Dependiendo del diseño del sistema, la proximidad a las bombas existentes y a las cajas de mar o a la longitud y el recorrido de las tuberías, se deberían considerar los espacios más remotos. Por norma general, el espacio disponible en la sala de máquinas y cubiertas es más reducido en buques propulsados por motores de velocidad media como cruceros o ferris que en los buques de carga propulsados por motores lentos.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL BUQUE DEL PROYECTO

Para la realización de la configuración de la instalación de un sistema scrubber en un buque, se ha escogido un barco de la Compañía Trasmediterránea, que realiza actualmente rutas regulares en el Mar Mediterráneo, concretamente entre Barcelona e Islas Baleares.

HORARIO RUTAS Y ESTANCIA EN PUERTOS															
MHN-PMA		**PMA-BCN**		**BCN-MHN**		**MHN-BCN**		**BCN-IBZ**		**IBZ-BCN**		**BCN-PMA**		**BARCELONA**	
SALIDA	**LLEGADA**	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	SALIDA	LLEGADA	PARADA	
17:00	22:00	12:30	19:30	23:30	7:30	11:30	19:30	23:00	7:00	11:30	19:30	23:30	6:30	7:30	23:30
TIEMPO NAVEGADO															
5,00		7,00		8,00		8,00		8,00		8,00		7,00		0,00	
TIEMPO PUERTO															
	1		4		4		4		4,5		4		8		

Figura 12 – Buque RO-PAX Zurbarán atracado en el Puerto de Mahón

El Zurbarán fue construido en Sevilla, en los astilleros de Izar, en el año 2000, para la compañía Norfolk Line (filial de MAERSK) con el nombre de "*NORTHERN MERCHANT*" siendo el segundo barco de una serie de 5 barcos, cubriendo el recorrido entre Dover y Calé en el Canal de la Mancha, que posteriormente fue fletado y después comprado por Acciona-Trasmediterránea.

Características y dimensiones principales del buque	
Nombre	ZURBARAN
Número IMO	9181091
Bandera	España
Señal de llamada	E.C.L.K
Año de construcción	2000
Compañía armadora	Cía. Acciona Trasmediterranea
Sociedad de clasificación	Lloyd's Register of Shipping
Tipo de buque	I 3/3 100 A1 Roll On Roll Off Cargo and Passanger Ship+LMC, UMS
Empresa constructora	Izar-Sevilla
Número de construcción	289
Material	Acero
Eslora total	180,00 m
Eslora entre perpendiculares	168,70 m
Manga de trazado	24,30 m
Puntal de trazado a la cubierta principal	9,60 m
Puntal de trazado a la cubierta superior	15,30 m
Calado máximo	6,50 m
Desplazamiento	22.152 Tm
Potencia propulsora	4 x 5.940 kW (23760kW)
Velocidad de servicio	22,8 nudos

Tabla 12 – Características y dimensiones del buque Zurbarán

El buque está propulsado por dos hélices de paso variable accionadas por cuatro motores Wärtsilä de cuatro tiempos del tipo 9L38, sobrealimentados, capaces de suministrar 5.940 kW de potencia efectiva cada uno. Para las maniobras de atraque y salida, el buque dispone de dos hélices de maniobra a proa, accionadas mediante dos alternadores de cola, conectados a dos de los motores principales.

4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GASES DE ESCAPE

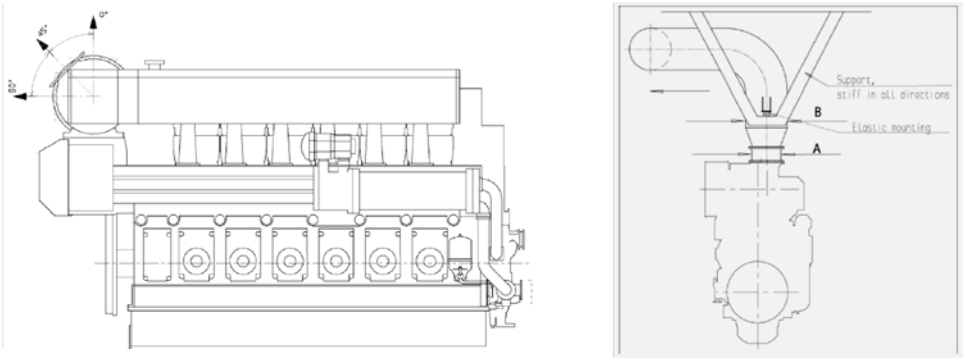


Figura 13 – Esquema de la conexión de las tuberías de gases de escape del motor.
Fuente: *Wärtsilä 38 Project Guide*

Tipo de motor	∅A [mm]	∅B [mm]
6L38	DN 500	650
8L38	DN 600	750
9L38	DN 600	800
12V38	DN 500	900
16V38	DN 600	1000

Figura 14 – Especificación del diámetro de las tuberías de gases de escape del motor y sujeción.
Fuente: *Wärtsilä 38 Project Guide*

4.1.1.1 Sistema externo de gases de escape

Cada motor diesel tiene su propia tubería de salida de gases de escape. Entre los factores decisivos del diseño del sistema externo de gases de escape se encuentran: la contrapresión o presión de retorno, la expansión térmica y algunos elementos de soporte. Los fuelles flexibles se instalan directamente a la salida del turbocompresor para compensar la expansión térmica y prevenir los daños en éste debidos a las vibraciones. Los elementos que forman este sistema son los mostrados en la siguiente figura.

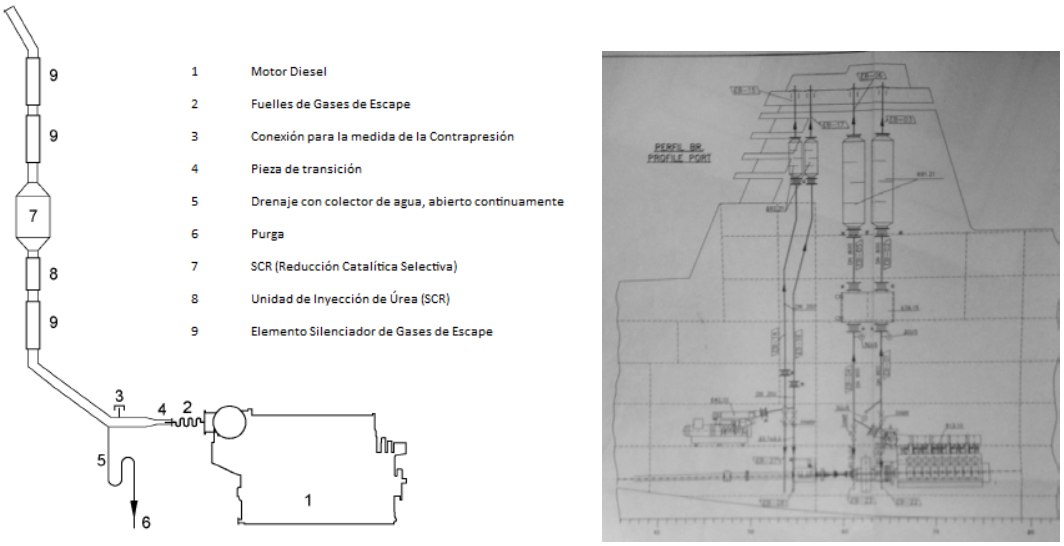


Figura 15 – Elementos del Sistema Externo de Gases de Escape de un Motor Diesel.
Fuente: *Wärtsilä 38 Project Guide*

4.1.2 SISTEMA DE TUBERÍAS DE LOS GASES DE ESCAPE

Las tuberías deben ser tan cortas y rectas como sea posible en la instalación. Los codos de las tuberías deberán tener el mayor radio de curvatura, no inferior a 1.5 del diámetro y las expansiones deben ser lisas para minimizar la contrapresión. El diámetro de las tuberías de gases de escape debe incrementar directamente después de los fuelles de la salida del turbocompresor. La velocidad del flujo recomendada dentro de la tubería es de 35-40 m/s a máxima carga. En las características de los motores viene expresado el flujo de masa de los gases de escape, que puede ser traducido a velocidad de flujo mediante la siguiente fórmula:

$$v = \frac{4 \cdot m}{1{,}3 \cdot \left(\frac{273}{273 + t}\right) \cdot \pi \cdot D^2}$$

Donde,

v = Velocidad del gas [m/s]
m = Flujo de masa de gases de escape [kg/s]
t = Temperatura de los gases de escape [ºC]
D = Diámetro de la tubería de gases de escape [m]

Cada tubería de gas de escape viene un medidor de contrapresión y un separador de agua y purga.

Es muy importante que cada tubería esté sujeta adecuadamente de forma fija a un soporte rígido en cualquier dirección después de los fuelles del turbocompresor. Por ello, hay un punto fijo en ambos lados de la tubería en el soporte. Uno de ellos está fijado directamente en la expansión térmica del motor, y el siguiente punto de soporte está fijado de forma que impide pivotear a la tubería alrededor del anterior punto de fijación.

En cuanto a la contrapresión o presión de retorno, el valor máximo permitido en los gases de escape es de 3kPa a carga máxima del motor. Esta presión viene calculada en el astillero según el diseño de tubería del sistema de gases de escape montado y resistencia de los materiales.

4.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE EN EL BUQUE

A fin de cumplir con las condiciones técnicas necesarias para instalar un sistema de lavado de gases de escape, es necesario comprobar si la colocación de un scrubber satisface las exigencias del tipo de buque y su tipo de operación y carga, y si la instalación está aprobada. Por ejemplo, un scrubber de tipo seco que se instala en la cubierta principal de un buque tanque deberá cumplir con diferentes requisitos (protección ante explosiones, compatibilidad con la carga) que uno instalado detrás de la superestructura. Lo mismo se aplicaría para la instalación de un sistema scrubber en la cubierta de un buque ferry RO-RO usado para el transporte de mercancías peligrosas.

Los sistemas scrubber húmedos generalmente son más pequeños y más ligeros que los scrubber secos, pero contienen un mayor número de componentes que deberán ser acomodados en diferentes espacios del buque. El peso de estos sistemas en seco es inferior, pero se incrementa significativamente por el agua de circulación necesaria para su funcionamiento. Un scrubber del tipo seco, por otra parte, es inherentemente pesado, pero su peso no aumenta mucho durante el funcionamiento. Los sistemas húmedos requieren espacio adicional para la situación de bombas, tanques y el equipo de tratamiento del agua. Las tuberías requeridas para alimentar y descargar el agua refrigerada y el agua de lavado – algunas de las cuales tienen que ser lo bastante anchas – deberán recorrer la distancia desde la toma de mar hasta la chimenea y de vuelta. También será necesario un tanque calentado para almacenar la solución de soda cáustica para los sistemas de limpieza cerrados, así como el material de las líneas de salida del sistema scrubber deberá ser resistente a la corrosión.

Sea cual sea la instalación que se realizará en el buque, es esencial proteger los pasillos de trabajo, las vías de evacuación y salidas de emergencia. Los accesorios, palancas y tuberías no deberán sobresalir en estas áreas o presentar un riesgo de tropiezo para las personas.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En los siguientes apartados se presentan algunos cálculos aproximados para obtener el volumen necesario, la masa, la energía requerida, y los consumibles para cada tipo de sistema de limpieza de gases de escape. El factor variable para cada cálculo aproximado es la potencia de entrada del scrubber. La potencia de entrada del scrubber (en MW) es la potencia que el scrubber deberá limpiar, es decir, la producida por cualquiera de los motores principales, y si viene de una sola corriente o sistema múltiple de corrientes.

Como se ya se ha mencionado anteriormente, la utilización de un sistema scrubber es un método equivalente para cumplir con los requisitos del uso de combustibles de bajo contenido en azufre. De acuerdo con la eficiencia del sistema, se debe asegurar que se alcanzan los niveles límites suficientes de emisiones de SOx, medidos como la relación entre SO_2/CO_2 según viene dado en la normativa. La eficiencia del sistema scrubber depende del contenido en azufre del combustible y se calcula como la suma del porcentaje en azufre en el combustible y el límite permitido, entre el contenido en azufre en tanto por cierto (%S+límite)/%S. Las eficiencias requeridas por los sistemas scrubber vienen recogidas en la siguiente tabla según las zonas de navegación (dentro o fuera de ECA) y según las diferentes cantidades de azufre en el combustible.

Azufre en el Combustible (%S)	Eficiencia en zona ECA (%) Límite de azufre: 0.1%	Eficiencia en zona no ECA (%) Límite de azufre: 0.5%
3.5	97.1	85.7
3.0	96.7	83.3
2.5	96.0	80.0
2.0	95.0	75.0
1.5	93.3	66.7
1.0	90.0	50.0

Tabla 13 – Eficiencia requerida por los sistemas Scrubber.
Fuente: MAN Diesel & Turbo Emission Project Guide

La eficiencia del scrubber requerida dependa del área de navegación y el combustible utilizado a bordo, los datos que se han tenido en cuenta para este estudio han sido los proporcionados por el buque, que realiza una ruta por el mediterráneo, es decir, zona fuera de ECA y que actualmente utiliza dos tipos de combustible: de alto contenido en azufre (2.8% S) y de menor contenido en azufre (0,97% S). Por lo tanto, se ha escogido que el sistema tenga la eficiencia de limpiar el 83.3% del azufre de los gases de escape, para cumplir con los requisitos, según los datos de la tabla, proporcionados por el fabricante del sistema.

En cuanto a la configuración del sistema de limpieza, un ejemplo de las torres de lavado se puede observar en la siguiente figura. Se trata de un sistema que consiste de dos partes, un *scrubber jet* y un absorbedor. El *scrubber jet*, es una fase previa del sistema, un *pre-scrubber*, que da comienzo al proceso de limpieza con un pulverizador espray en modo de jet dirigido hacia los gases de escape entrantes. Colocado aguas arriba del absorbedor, aumenta la eficiencia del lavado, especialmente de las PM. Desde el *scrubber jet*, el flujo de gas el guiado a través del absorbedor, hacia un lecho empaquetado en el que el SOx es eliminado hasta el nivel requerido. El *scrubber jet* se podría reemplazar por un *scrubber venturi* para aumentar el atrapamiento de las partículas de materia, pero esto aumentaría la caída de presión a través de la unidad.

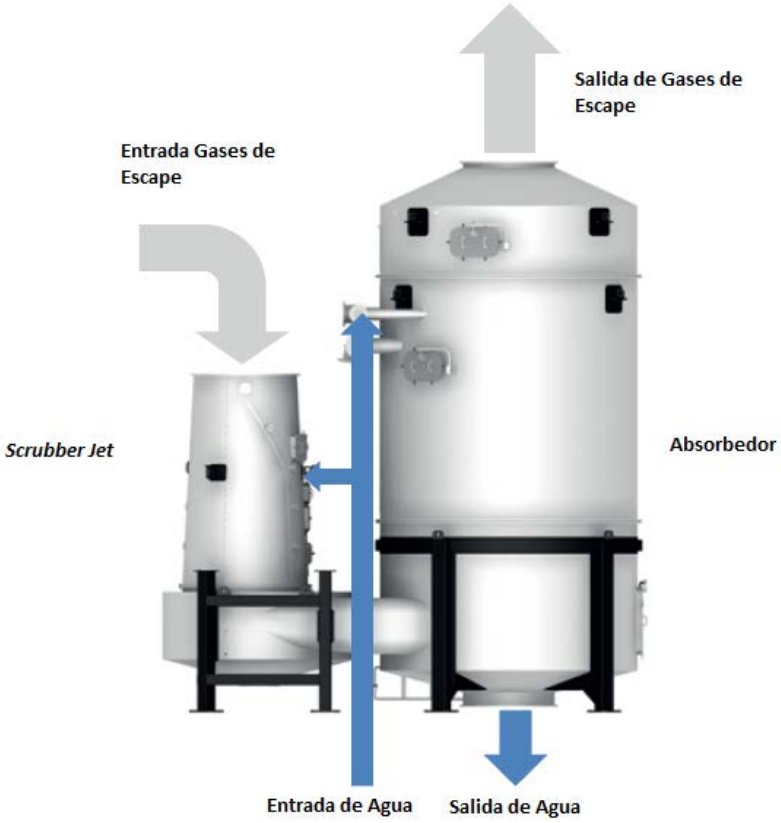


Ilustración 2 Configuración del Sistema Scrubber con absorbedor y scrubber jet.

Fuente: Alfa Laval – MAN Emission Project Guide

En la instalación a realizar en el buque se reemplazarán los silenciadores de los motores principales por las unidades scrubber, debido a temas de espacio en las chimeneas, como se podrá observar en los planos adjuntos. Puesto que hay dos líneas de motores con un par de motores por cada una de ellas, se instalarán dos unidades de scrubber con entradas múltiples de corriente (desde los dos motores a cada uno).

4.2.1.1 DIMENSIONES

Los diferentes tipos de sistemas de limpieza varían en el tamaño y forma del scrubber. El volumen total de la unidad del scrubber depende de la cantidad y condiciones de los gases de escape y de su contenido en azufre y partículas. Además, de las restricciones de la máxima contrapresión adicional aceptable por el fabricante del sistema de escape también influye en el tamaño del scrubber. Los diferentes tamaños de los sistemas scrubber en función de estos parámetros se pueden ver en las figuras de los Anexos.

Para esta instalación, se ha escogido el sistema fabricado por *Alfa Laval*, con la tecnología PureSOx 2.0, que una vez analizado las ofertas de los demás fabricantes, éste tiene un diseño más comprimido para el escaso espacio del que se dispone a bordo para evitar realizar grandes modificaciones.

Dimensiones Torres de Scrubber	
Diámetro	3.2 m
Altura	8.6 m
Longitud (incluido el jet)	5.7 m
Peso	15 tn
Material	Aleación de acero inoxidable

Figura 3 – Unidad Scrubber jet y Absorbedor
Fuente: Alfa Laval PureSOx Brochure

Sistema de Limpieza de Agua

Cuando se trata del sistema de limpieza del tipo cerrado, es necesario purgar el agua del scrubber para evitar la acumulación de la generación de sales durante el proceso. Antes de descargar el agua purgado al mar, éste deberá ser limpiado en la unidad de limpieza de agua (WCU). En el siguiente diagrama se muestran los equipos necesarios y el circuito del agua en la unidad de limpieza.

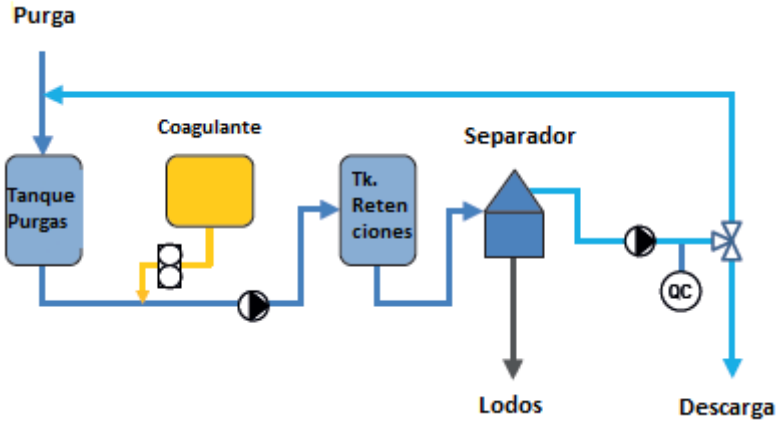


Ilustración 4 – Esquema del circuito del agua de scrubber en la unidad de lavado (WCU).
Fuente: Alfa Laval – MAN Emission Project Guide

Ilustración 5 – Ejemplo de la Unidad de Lavado del Agua de Scrubber.
Fuente: Alfa Laval – MAN Emission Project Guide

La unidad de limpieza (WCU) es una depuradora de alta velocidad, basada en la separación centrífuga para eliminar las partículas del agua de scrubber. Ocupa un pequeño espacio de sólo 6m^2 y no se ve afectada por los movimientos de balanceo del barco. Las dimensiones de este elemento según los parámetros del sistema son las siguientes:

Dimensiones WCU	
Longitud	2.5 m
Ancho	2.5 m
Altura	2.5 m
Peso	3 tn
Consumo Pot.	40 kW

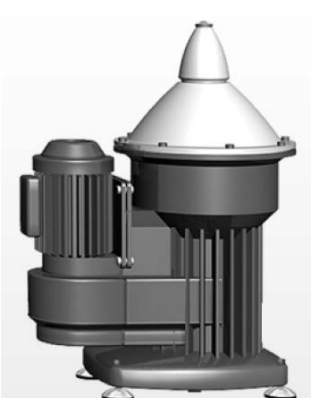


Ilustración 6 – Depuradora / Separadora de Agua de Scrubber.
Fuente: Alfa Laval PureSOx Brochure

Sistema de Control

El panel de control del sistema scrubber sirve para el scrubber, para la unidad de limpieza del agua y para la descarga del agua. La interfaz cableada está conectada al sistema de alarma general del barco. Si una alarma es activada o se activa un botón de emergencia, entonces el sistema de lavado SOx es capaz de apagarse automáticamente y se derivan los gases de escape por el by-pass del scrubber, que se abre sin parar el motor. Después de que el fallo haya sido eliminado, la alarma desaparece de la pantalla y el sistema se puede reiniciar.

4.2.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA

Normalmente, las unidades de limpieza de gases de escape se instalan en el buque en la parte más alta, dentro o alrededor del área del guardacalor, donde hay más espacio disponible y el acceso también es más fácil. La instalación incluye además un by-pass para que el motor sea capaz de funcionar sin el proceso de limpieza de los gases, a pesar de que algunas instalaciones de scrubber permiten su funcionamiento en vacío o en seco a su través sin realizar la limpieza. Pero en la mayoría de los casos, el sistema de scrubber para los óxidos de azufre también es un silenciador efectivo aún funcionando en seco/vacío, lo cual significa que el silenciador existente instalado puede ser reemplazado por un sistema scrubber. Puesto que la temperatura de los gases de escape es reducida significativamente durante el proceso de limpieza, cualquier sistema de recuperación de calor, así como la caldereta de gases de escape, deberán situarse aguas arriba del limpiador scrubber.

En el buque se instalará un sistema híbrido, por ser más flexible a la hora de operación según las zonas de navegación del buque. Los sistemas híbridos, como se mencionó en capítulos anteriores, combinan los bajos costes de funcionamiento del circuito abierto con la flexibilidad garantizada por el sistema cerrado. El sistema híbrido provee una flexibilidad adicional, ya que el modo de funcionamiento en circuito abierto puede ser usado también con agua de mar de baja alcalinidad y con aditivos de NaOH sin la necesidad de cambiar a la configuración de circuito cerrado. Por tanto, el agua del scrubber de la instalación en los sistemas híbridos es una combinación de los dos sistemas usados en la instalación, el circuito abierto y el circuito cerrado, como se describe a continuación.

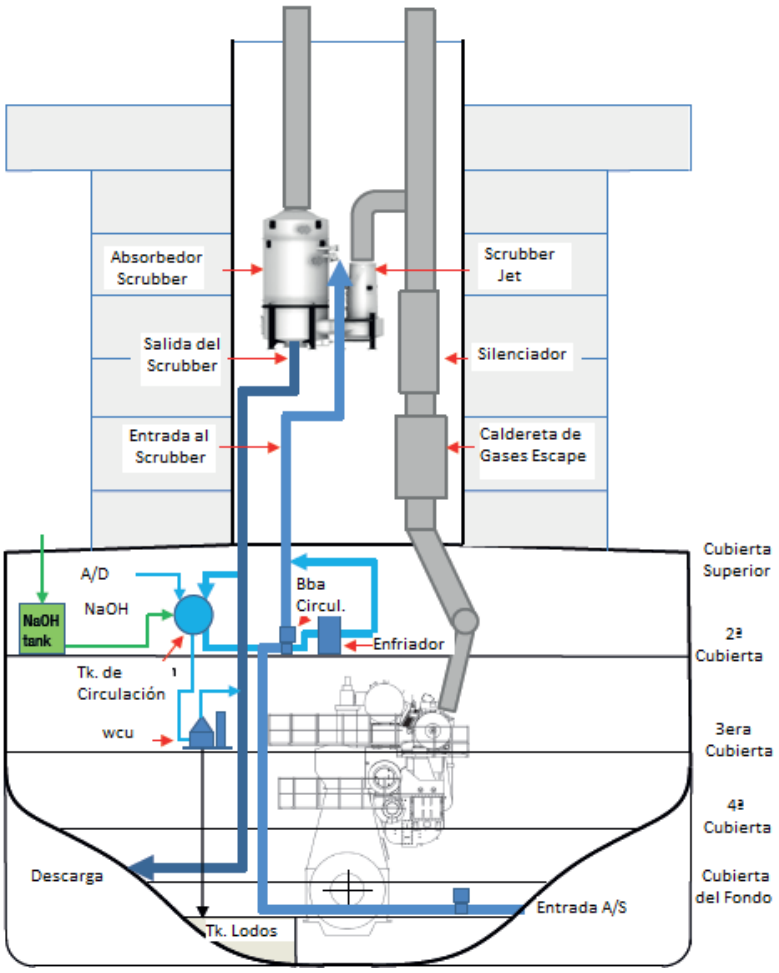


Figura 16 – Ejemplo de sistema híbrido de Limpieza de Gases de Escape en un buque.
Fuente: MAN Diesel & Turbo Emission Project Guide

4.2.2.1 Sistema de Circuito Abierto

La instalación de esta parte del sistema es bastante sencilla, puesto que se utiliza el agua salada para el scrubber desde el propio sistema de agua salada del buque. Desde la salida del scrubber, el agua es llevada a la descarga del agua del mar pasando primero por un control de calidad para verificar su cumplimiento con los requisitos y directrices de la OMI.

Este sistema tiene un coste de funcionamiento muy bajo ya que no es necesaria la aplicación de ningún tratamiento. Sin embargo, para obtener la calidad suficiente del proceso de limpieza, el caudal del agua de mar es elevado que combinado con la presión requerida para la gran altura en la que está situada la unidad scrubber, la potencia necesaria para su funcionamiento y coste no puede ser ignorado. En el siguiente apartado se verán los cálculos para cada uno de estos parámetros, presiones, caudales, potencia necesaria y situación del sistema de limpieza de gases de escape.

En algunos casos, en áreas donde la alcalinidad del agua de mar es demasiado baja o la descarga al mar está restringida, el sistema no puede ser usado y se requiere que los motores funcionen utilizando combustibles de bajo contenido en azufre o cambiar al circuito cerrado de limpieza, que se describe a continuación y se ha visto explicado en más detalle en el capítulo anterior.

4.2.2.2 Sistema de Circuito Cerrado

Se trata de una instalación más compleja en comparación con la instalación del sistema de circuito abierto, porque es necesario un sistema de tratamiento del agua. El equipamiento incluye un tanque de circulación, un tanque de lodos, un tanque de almacén de NaOH, una bomba de circulación, un enfriador de agua dulce y una unidad de limpieza del agua. Una alternativa a la unidad de limpieza del agua puede ser un tanque para almacenar el agua purgada hasta su descarga en puerto. En comparación con el sistema de circuito abierto, el caudal del agua de scrubber es significativamente reducida ya que la eficiencia de limpieza utilizando agua dulce con aditivos es superior comparando con el uso de agua salada. Y debido a la reducción del caudal, las dimensiones de las tuberías de entrada y salida son reducidas.

En cambio, los costes de operación de los sistemas cerrados son superiores principalmente por la adición de las sustancias químicas para llevar a cabo el proceso. Sin embargo, los sistemas cerrados pueden ser usados en cualquier área sin restricciones gracias a la unidad de tratamiento del agua.

- **Tanque de NaOH**

  El tanque de almacenamiento para los aditivos químicos que se utilizan en los sistemas de circuito cerrado debe ser adecuado para los medios que contenga, por ejemplo, la solución química. Normalmente, el proceso de lavado utiliza una solución de NaOH al 50%. La soda cáustica se produce a partir de la electrólisis de una solución de cloruro de sodio que proviene de la sal producida en los yacimientos. Tal solución comienza a cristalizar a una temperatura inferior a 12ºC, y por lo tanto, el tanque debe mantener una temperatura mínima de 16ºC. En consecuencia, el tanque debe ser instalado en un espacio con una temperatura controlada o estar aislado y equipado con sistemas de calentamiento. Además la temperatura interior del tanque debe mantenerse por debajo de 45ºC para evitar otros efectos negativos de la solución. El material del tanque debe cumplir con los requisitos específicos para la solución, tales como ser acero inoxidable, acero recubierto, polímeros u otros materiales adecuados, ya que la soda cáustica es una base fuerte altamente reactiva que ataca metales (zinc, aluminio, cobre, plomo) y aleaciones (bronce, latón).

Especificaciones técnicas de la solución de NaOH		
Hidróxido de Sodio (como NaOH) (%)	49.0-50.0	(%)
Alcalinidad total (Na_2O)	38.0-39.0	(%)
Cloruro de Sodio (NaCl)	0.02	(%) máx.
Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)	0.25	(%) máx.
Sulfato de Sodio (Na_2SO_4)	0.02	(%) máx.
Hierro (Fe)	5.00	(ppm) máx.

Tabla 14 – Especificaciones Técnicas de la solución de Soda Caústica.
Fuente: Quimpac SA – www.quimpac.com

Para estimar la capacidad necesaria para el tanque de NaOH, se deberán tener en cuenta diferentes parámetros del buque tales como: el tiempo de navegación en aguas ECA, los patrones de navegación (velocidad, motores en uso, etc), el contenido de

azufre en el combustible, la solución de NaOH y el periodo programado de aprovisionamiento de combustible y solución. Más adelante se verá cómo se dimensiona este tanque según la configuración del sistema y los parámetros del fabricante.

- **Tanque de Lodos**

La salida de lodos de la unidad de limpieza del agua en el sistema cerrado es una solución acuosa formada por partículas de la combustión, componentes de azufre y otras materias separadas del agua de scrubber. El valor del pH normalmente varía entre 6 y 9, y por ello los lodos se almacenan en un tanque de lodos separado o en un tanque general a bordo, por ejemplo, el tanque de agua sucia de sentinas, que almacena lodos similares de la sala de máquinas.
El tanque deberá estar hecho con revestimiento de acero mientras se toma en consideración la variación del valor pH.
Cuando se estima la capacidad del tanque de lodos, es importante tener en cuenta si el buque navega por zonas ECA, los patrones de navegación, el contenido en azufre, el contenido en agua y el intervalo de descargas en puerto programadas. Más adelante se verá también el dimensionamiento de este tanque.

- **Tanque de Circulación**

El tanque de circulación se usa como tanque de suministro en los sistemas cerrados e híbridos. Durante la puesta en marcha del sistema, en el circuito cerrado, el tanque se asegura que haya suficiente agua dulce para comenzar el proceso de limpieza. En los sistemas híbridos, el tanque actúa como depósito para el agua dulce durante la operación en circuito abierto y asegura una suave transición para el cambio entre circuitos. La dimensión del tanque define además el tiempo en el cual el sistema puede operar sin realizar ninguna purga al funcionar en modo cerrado.
El tanque de circulación está diseñado con materiales de fibra de vidrio epoxi reforzada (GRE – *Glassfiber Reinforced Epoxy)* así como las tuberías del circuito también para evitar la corrosión y alargar la vida útil del sistema.
Las medidas típicas del tanque de circulación según las potencias de los motores se pueden ver en la siguiente tabla:

Potencia del Motor (MW)	Tanque de Circulación (m^3)
<10	10
10-20	20
>20	30

Tabla 15 – Capacidad del tanque de Circulación del sistema cerrado según la potencia del motor. Fuente: Alfa Laval PureSOx Brochure

Para el sistema híbrido para el buque RO-PAX escogido, se instalará un tanque de 30 m^3 de volumen, puesto que se usará el mismo para llevar los circuitos de ambas unidades scrubber. Este tanque de circulación permite además el funcionamiento de la instalación hasta 6 horas sin realizar ninguna descarga al mar.

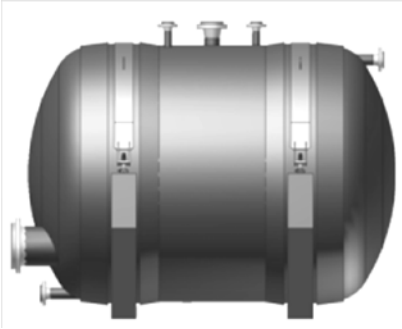


Ilustración 7 – Tanque de Circulación del circuito cerrado.
Fuente: Alfa Laval PureSOx Brochure

- **Intercambiador de Calor de Placas**

Para la refrigeración del agua del circuito se instalará un intercambiador de calor de placas del mismo fabricante del Scrubber, que tiene un diseño compacto y ocupa poco espacio en la sala de máquinas.

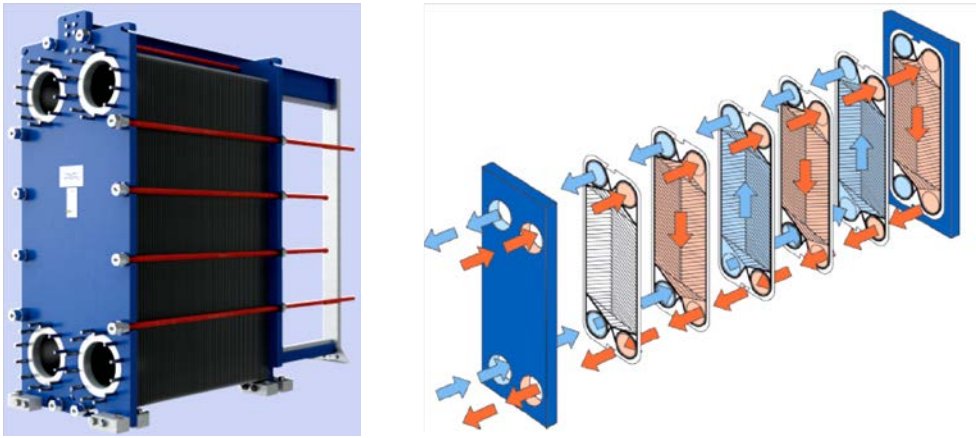


Ilustración 8 – Intercambiador de Calor de Placas y esquema de funcionamiento.
Fuente: Alfa Laval www.alfalaval.com

El intercambiador de calor funciona con agua salada para refrigerar el agua dulce del circuito cerrado sin mezclarse ambos fluidos. Entre las placas del intercambiador hay unos puertos en las esquinas de tal manera que los dos fluidos circulan a través de canales alternativos. El calor se transfiere a través de las placas entre los canales, y el formato corrugado de las placas proporciona una mayor superficie de contacto para una mayor eficiencia para la transferencia del calor y evitar las turbulencias de los fluidos. El material de las juntas del intercambiador es de diseño especial para soportar las variaciones de pH del agua que circula a su través.

4.2.3 CÁLCULO DE LOS DETALLES DEL SISTEMA DE LGE SOx

A continuación se realizan los cálculos para el sistema híbrido de limpieza de gases de escape que se instalará en el buque RO-PAX Zurbarán.

Primero de todo, se detallan los datos más relevantes de la planta propulsora del buque y las condiciones de navegación. Se trata de un sistema de dos ejes con 2 motores en línea por cada eje, del fabricante Wärtsilä, modelo 9L38 cuya potencia total es de 23760 kW. En cuanto al funcionamiento del sistema, se estiman dos escenarios de uso para cada tipo de circuito, el uso del circuito abierto de agua salada y el uso del circuito cerrado de agua dulce. Se considera que el buque no navega en zonas de control de emisiones (ECA) pero se prevé el uso del sistema a partir del año 2020 cuando entrará en vigor la normativa para uso de combustibles marinos con contenido inferior al 0.5% de azufre a nivel global.

MOTOR	MODELO	WÄRTSILÄ 9L38
Potencia SMCR	4 x 5940	kW
RPM	600	rpm
Consumo Específico de Combustible (HFO) (% Carga del motor – MCR)	25% MCR 50% MCR 75% MCR 100% MCR	191 g/kWh 186 g/kWh 180 g/kWh 183 g/kWh
Contrapresión Máx. Gases de Escape	3	kPa
Altura de Bombeo A/S, circuito abierto	25	m
Altura de Bombeo A/D, circuito cerrado	20	m
Eficiencia Bomba A/S, circuito abierto	82	%
Eficiencia Bomba A/D, circuito cerrado	82	%
Márgen Tk. NaOH	33	%
Márgen Tk. Lodos	33	%
Suministro de NaOH	12	Veces/Año
Descargas de Lodos	12	Veces/Año
Perfil de Navegación	25% MCR	15% del tiempo
	50% MCR	15% del tiempo
	85% MCR	50% del tiempo
	100% MCR	20% del tiempo

Tabla 16 – Características de los motores de la planta propulsora del buque RO-PAX y detalles de la instalación Scrubber y perfil de navegación del buque. Fuente: *Wärtsilä 38 Project Guide*

4.2.4 CÁLCULOS

El primer paso para obtener los datos específicos del sistema a instalar, es la determinación del consumo específico y sus márgenes, la potencia eléctrica necesaria para el sistema, el consumo de NaOH, y la producción de lodos, que se calcularán según las especificaciones de los apartados anteriores.

- El consumo específico SFOC de combustible de los motores viene dado por la tabla 7.

- Los márgenes del consumo específico debido al incremento de la contrapesión hasta el nivel máximo, se puede calcular usando la siguiente tabla, en la que se relaciona la contrapresión según las cargas del motor.

CARGA % MCR	Δ P (máx.) mm WC	Δ SFOC g/kWh	Δ Gases Escape % masa	Δ Tª Salida º C
100	600	+1.0	+7	+20
75	500	+1.0	+7	+20
50	400	+1.0	+10	+20
35	300	+1.0	+10	+20
<25	<200	+1.0	+10	+20

Por tanto el incremento del consumo específico es de:
300/600 x 1.0 g/kWh = 0.5 g/kWh al 100% MCR.

El uso de un sistema scrubber para las emisiones de SOx hace aumentar la contrapresión del sistema de gases de escape, consecuentemente es necesario realizar unas pequeñas modificaciones en el motor o sistema según el margen máximo permitido por el fabricante.

El consumo eléctrico del sistema se calcula para cada tipo de sistema por separado, puesto que el sistema de circuito cerrado tiene más componentes que hace que aumente el consumo, además de tener distintos caudales, alturas y diferentes eficiencias de las bombas. De acuerdo con los parámetros que intervienen en el cálculo del consumo eléctrico se obtienen los siguientes valores:

- <u>Sistema de Circuito Abierto:</u>

Flujo del sistema – Flujo A/S = 50 m3/h/MW

$$P = P_{ME} \times MCR\% \times \frac{Flujo_{\frac{A}{S}}}{3600} \times 1.025 \times 9{,}81 \times \frac{(H+10)}{eff_{bba}} \times 110\%$$

PME [kW]	% MCR	Flujo A/S*ρ*f.G./3600	(H+10)/EffBba	P[kW/h] 1 Ud. Scrubber	P[kW/h] 2 Uds. Scrubber
2x5940	25	0,13965	(25+10)/0,82	17,70	**35,40**
2x5940	50	0,13965	(25+10)/0,82	35,40	**70,81**
2x5940	75	0,13965	(25+10)/0,82	53,11	**106,22**
2x5940	100	0,13965	(25+10)/0,82	70,81	**141,63**

- Sistema de Circuito Cerrado:

Flujo del sistema – Flujo A/D = 30 m3/h/MW

$$P = P_{ME} \times MCR\% \times \frac{Flujo_{\frac{A}{D}}}{3600} \times 1.000 \times 9{,}81 \times \frac{(H+10)}{eff_{bba}} \times 110\%$$

PME [kW]	% MCR	Flujo A/S*ρ*f.G./3600	(H+10)/EffBba	P[kW/h] 1 Ud. Scrubber	P[kW/h] 2 Uds. Scrubber
2x5940	25	0,00833	(20+10)/0,82	8,88	**17,76**
2x5940	50	0,00833	(20+10)/0,82	17,76	**35,53**
2x5940	75	0,00833	(20+10)/0,82	26,64	**53,29**
2x5940	100	0,00833	(20+10)/0,82	35,53	**71,06**

Cálculo de la cantidad de NaOH necesaria para la operación del sistema de circuito cerrado:

$$NaOH = P_{ME} \times MCR\% \times SFOC \times S\% \times 3.27$$

$$NaOH = P_{ME} \times MCR\% \times 16.7 \frac{l}{h} / MW$$

% MCR	NaOH para Comb. 3%S [kg/h]	NaOH para Comb. 1%S [kg/h]
25	111,29	37,09
50	216,76	72,25
75	314,66	104,88
100	426,54	142,18

Tabla 17 – Consumo de sustancia de NaOH por l/h para los dos sistemas scrubber (en paralelo) según el funcionamiento del motor. Fuente propia.

En la tabla 8 se muestra el consumo por litro/hora de la solución de soda caústica para el funcionamiento de las dos unidades scrubber. Para hallar la capacidad del tanque de almacén de esta sustancia, se tienen en cuenta las horas de navegación del buque y el intervalo programado de repostaje de soda caústica del buque.

Sabiendo que el buque navega entre Islas Baleares y Barcelona diariamente y que un viaje de ida tiene una duración aproximada de 7 horas, se realiza el cálculo del consumo total de soda caústica al cabo de dos semanas y al cabo de un mes para ver qué opción de repostaje sería más adecuada para el buque según el espacio y peso del tanque de almacén.

Cantidad de Solución NaOH consumida en total por semana y mes navegado	
Número de Viajes Semana (I/V)	5 viajes
Días de parada en puerto	2 días
Duración de un viaje (aprox.)	7 horas
Horas navegadas /Semana	70 horas
Cantidad de NaOH consumida/Semana	70*314,6655 = 22.026,59 kg* 14,68 m3**

Tabla 18 – Solución de NaOH consumida.
Fuente: Creación propia a partir de los datos del buque.

*Se ha escogido el valor de consumo de soda caústica de 314,6655 l/h por ser el correspondiente a la carga del motor de 75-85% que representa la carga de funcionamiento de los motores en la mayoría del tiempo de navegación (más del 50%) y utilizando combustible de hasta el 3% de contenido en azufre.

** Densidad de la solución NaOH: ρ=1,5 g/ml

Se supone que la reposición de soda caústica se realizará semanalmente, es decir, en este caso el buque tendría una autonomía de una semana de navegación. El tamaño del tanque se sobredimensiona un 33% según las indicaciones del fabricante, por tanto, tendría una capacidad de 19,52 m3.

- Cálculo de la cantidad de lodos producida en el sistema de circuito cerrado:

$$Lodos = P_{ME} \times MCR\% \times SFOC \times (S\% \times 3.45 + 0.022)$$

% MCR	Lodos usando Comb. 3%S [kg/h]	Lodos usando Comb. 1%S [kg/h]
25	142,38	64,10
50	277,21	124,84
75	402,55	181,23
100	545,68	245,66

Tabla 19 – Producción de lodos según el perfil de navegación del buque.
Fuente: Creación propia a partir de los datos del buque.

- Por último, se estima un consumo específico de agua dulce A/D para las condiciones ISO de:

Agua A/D = 100 l/MWh

PME [kW]	% MCR	Flujo A/D l/MWh	P[l/h] 1 Ud. Scrubber	P[l/h] 2 Uds. Scrubber
2x5940	25	100	297	**594**
2x5940	50	100	594	**1188**
2x5940	75	100	891	**1782**
2x5940	100	100	1188	**2376**

Tabla 20 – Consumo de agua dulce según el perfil de navegación del buque.
Fuente: Creación propia a partir de los datos del buque.

El consumo específico de acuerdo con las especificaciones de los motores del barco y el perfil de navegación escogido, se recopila en las siguientes tablas resumen:

CARGA DEL MOTOR % MCR	25%	50%	75%	100%	Uds.
SFOC del motor	191	186	180	183	g/kWh
Incremento del SFOC	0.5	0.5	0.5	0.5	g/kWh
Potencia del circuito abierto	35,40	70,81	106,22	141,63	kW
Potencia del circuito cerrado	17,76	35,53	53,29	71,06	kW
NaOH del circuito cerrado (3%S)	111,29	216,77	314,66	426,54	Kg/h
Lodos del circuito cerrado (3%S)	142,38	277,21	402,55	545,68	kg/h
Agua Dulce Consumida	594	1188	1782	2376	l/h

CARGA DEL MOTOR % MCR	25%	50%	75%	100%	Total por hora	
PERFIL DE CARGA	**15%**	**15%**	**60%**	**10%**	**100%**	
Consumo FO	170,18	331,45	1924,56	434,81	2861,00	kg/h
Incremento de consumo FO	0,45	0,89	5,35	1,19	7,87	kg/h
Potencia del circuito abierto	5,31	10,62	63,73	14,16	93,83	kW/h
Potencia del circuito cerrado	2,66	5,33	31,98	7,11	47,08	kW/h
NaOH del circuito cerrado (3%S)	16,69	32,52	188,80	42,65	280,66	kg/h
Lodos del circuito cerrado (3%S)	21,36	41,58	241,53	54,57	359,04	kg/h
Agua Dulce Consumida	89,10	178,20	1069,20	237,60	1574,10	l/h

Tabla 21 - Consumos según perfil de navegación del buque
Fuente: Creación propia a partir de los datos del buque

Y el consumo absoluto a lo largo de un año para el perfil de navegación estudiado considerando el 75% del tiempo navegado en circuito abierto y el 25% navegado en circuito cerrado, se muestra en la siguiente tabla.

5700 Horas de navegación anuales	Abierto (75%)	Cerrado (25%)		
Consumo FO	2861,00	12230,78	4076,93	t
Incremento de consumo FO	7,87	33,65	11,22	t
Potencia del circuito abierto	93,83	401,13	133,71	MW
Potencia del circuito cerrado	47,08	201,26	67,09	MW
NaOH del circuito cerrado (3%S)	280,66	1199,82	399,94	t
Lodos del circuito cerrado (3%S)	359,04	1534,88	511,63	t
Agua Dulce Consumida	1574,10	6729,28	2243,09	m^3

Tabla 22 - Consumo absoluto utilizando circuito abierto/cerrado
Fuente: Creación propia a partir de los datos del buque.

4.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA IMPLEMENTADO

4.3.1 DISPOSICIÓN DEL SISTEMA EN EL BUQUE

En el siguiente plano se muestra como sería la distribución de los componentes de ambos circuitos del sistema.

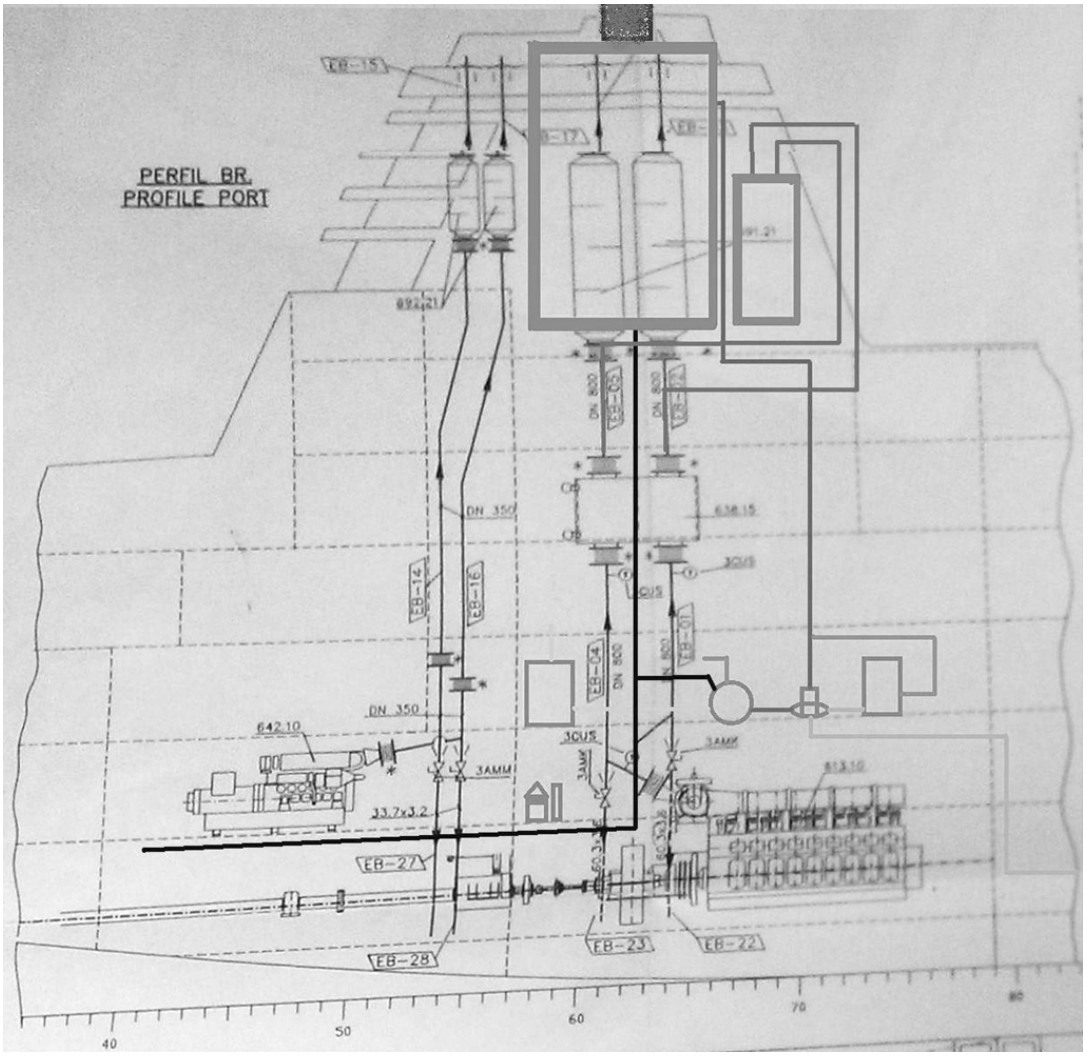


Figura 17 – Esquema de la disposición de los elementos del sistema en la sala de máquinas del buque Zurbarán. Fuente: Modificación del Plano del Sistema de Gases de escape del buque Zurbarán.

Por un lado, para el circuito abierto, el barco ya dispone de una toma de mar y filtro así como de bomba de agua salada. El agua salada es dirigida directamente a la torre scrubber por la que pasan los gases de escape. Y cuando funciona en modo cerrado, parte del agua salada se dirige al intercambiador de calor del circuito con el fin de refrigerar el agua dulce del circuito. También se dispone de una descarga al mar en el costado del buque por el que se expulsa el agua utilizado en el lavado de los gases de escape.

El circuito cerrado dispone de dos bombas de agua dulce instaladas en el primer tecle de los motores principales cuya función es llevar el agua del tanque de circulación hacia la unidad scrubber. El tanque de circulación se ha situado en la segunda cubierta de la cámara de máquinas, por temas de espacio entre los demás elementos instalados.

La unidad de tratamiento y limpieza del agua de lavado se sitúa en la cámara de depuradoras junto a las depuradoras de combustible y aceite.

El tanque de almacén de sustancia química NaOH se ha dispuesto también en la segunda cubierta de la zona de motores. El tanque tiene un sistema de reposición formado por una bomba para el llenado desde el suministro y un conjunto de tuberías. Las dimensiones de estos elementos no se han calculado por motivos de los caudales y especificaciones técnicas de la sustancia química, como son la viscosidad o temperatura.

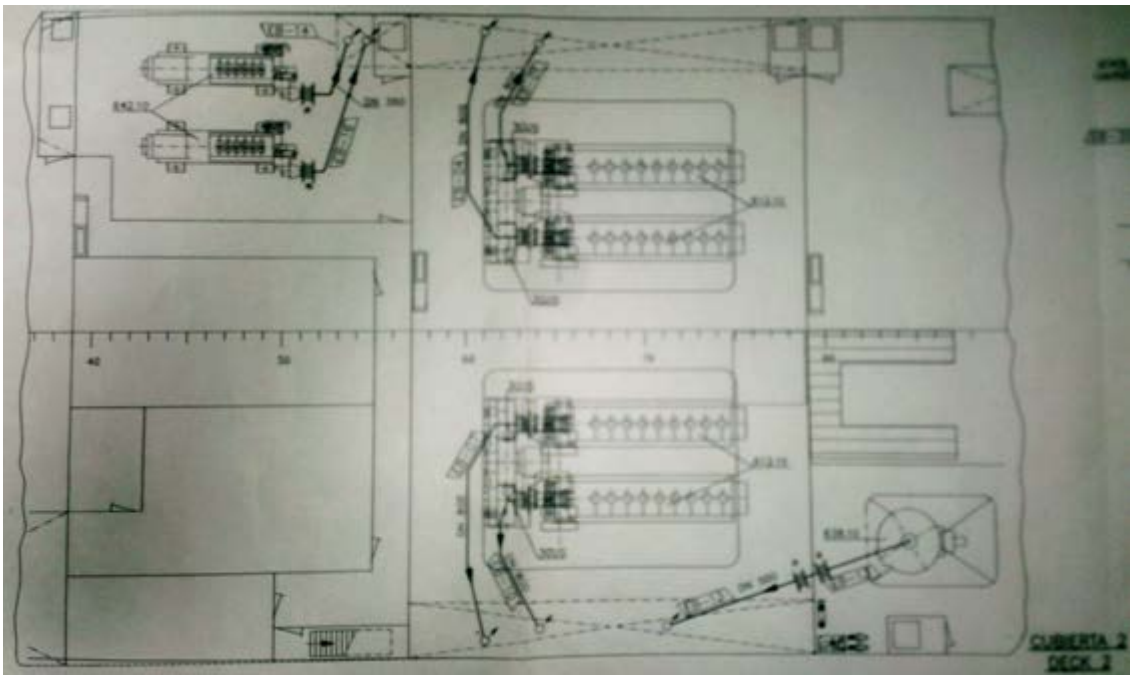


Figura 18 – Esquema de la Planta de la cubierta 2 de la Sala de Motores Principales y Auxiliares. Fuente: Planos de la Sala de Máquinas del Buque Zurbarán

Como se observa en el esquema del circuito, las unidades de scrubber están situadas "*sobre*" los silenciadores de los motores, que viene a ser reemplazados por ellas. En la imagen de más abajo se representa el proceso de instalación de las torres scrubber en un buque RO-PAX. Debido al espacio disponible en las chimeneas del buque escogido, se tendrá que realizar una ampliación para la torre de lavado.

Figura 19 – Instalación Scrubber en el buque RO-PAX Ficaria. Fuente: MAN Diesel & Turbo

En cuanto a los efectos de la instalación del sistema en la estabilidad del buque, no se ha podido llevar a cabo un estudio de ello debido a que no se han podido conseguir las curvas hidrostáticas del buque y se desconoce el centro de gravedad del buque en condiciones normales. Aún así los elementos del sistema se han intentado situar lo más simétricamente posible, con el fin de provocar una inmersión paralela, pero sin poder conocer las variaciones en el asiento del buque, siendo difícil predecirlo.

5 CONCLUSIONES

La afección de los óxidos de azufre está generando un marco normativo cada vez más estricto. En el sector marítimo se hace bastante hincapié puesto que las emisiones no permanecen en el mismo punto de emisión, como son los puertos o ríos por ejemplo, sino que se desplazan por las condiciones naturales de la atmósfera a cientos de kilómetros de las costas donde pueden ser más perjudiciales (pueblos, ciudades, bosques). Por ello, las normativas internacionales aprobadas en la Organización Marítima Internacional han llegado a establecer límites en zonas de control de emisiones (ECA) tan estrictos para éstas emisiones, que en algunos casos está todavía bajo estudios para hallar si es posible su cumplimiento a lo largo del tiempo cuando entrarán en vigor límites más restrictivos a nivel global también.

El uso de combustibles de bajo contenido en azufre por los barcos supone un aumento directo de su precio. Para conseguir un combustible de éstas características, debe tenerse en cuenta el contenido en azufre del crudo y después realizar las destilaciones necesarias para eliminar el exceso de este componente. Por ello, las refinerías deberán realizar ciertos cambios en su proceso habitual de refinamiento así como adquirir el producto de crudo adecuado para poder obtener estos combustibles. Siendo un problema el poder conseguir un crudo adecuado, se pueden utilizar otro tipo de combustibles alternativos.

Una opción actual es utilizar gas natural para la propulsión de buques, el cual además de no tener ningún contenido en azufre, y por tanto, emisiones nulas y eliminación de la mayor parte de partículas, también reduce en menor proporción las emisiones de otros contaminantes como CO_2, perjudicial para la capa de ozono y por tanto, calentamiento global.

Otra opción se centra generalmente en el estudio y análisis de la eliminación de los óxidos de azufre una vez se han formado en los gases de escape. Este método consiste en la limpieza mediante un scrubber por el que pasan los gases de escape y se mezclan con agua de mar o mezcla de agua dulce y producto alcalino para neutralizar los óxidos de azufre, siendo el objeto del presente trabajo, existiendo varios sistemas de limpieza de gases de escape, siendo los principales:

- Scruber seco
- Scrubber húmedo: de circuito abierto, cerrado o híbrido.

En estos sistemas, la normativa establece como requisito la monitorización continua de las emisiones donde se examina la relación SO_2/CO_2. Además, también se controla el agua utilizado para el lavado de los gases de escape, según su pH, su turbidez y su contenido de PAH, para poder ser descargada al mar.

Se ha diseñado el ante-proyecto de un sistema de limpieza de gases de escape húmedo con configuración híbrida para un buque real del tipo RO-RO. Se ha escogido el tipo húmedo por ser uno de los sistemas más comunes en las instalaciones a bordo de buques y la configuración híbrida por flexibilidad de operación que ofrece, ya que puede funcionar tanto en sistema abierto utilizando agua de mar como en sistema cerrado utilizando agua dulce con aditivos químicos, además por su coste operacional y de inversión, que es relativamente bajo y amortizable a corto plazo.

Este sistema está compuesto por varios elementos que utilizan un porcentaje de la potencia instalada en el buque no muy elevado y ocupan un espacio reducido, excepto por las torres de lavado que son suficientemente voluminosas y a veces, como es este caso, requieren modificaciones en la estructura externa del guardacalor. Los componentes que forman el sistema y su dimensionamiento han sido llevados a cabo según las especificaciones y planos del buque así como su plan de usos.

A modo de resumen se especifican los elementos más relevantes de la instalación diseñada:

Componente	Características
Circuito Abierto	
Toma de mar	Ya instalada a bordo
Bomba de Agua Salda	Ya instalada a bordo
Potencia Unidades Scrubber Abierto	106,22kW a 85%MCR
Circuito Cerrado	
Agua Dulce	Generación con Evaporador o Tk. Almacén
Bomba de Agua Dulce	Por duplicado
Unidad de Tratamiento del Agua	40 kW, 3 tn, 2,5x2,5x2,5 m
Tanque de NaOH	20 m3
Intercambiador de Calor	De placas, Alfa Laval
Tanque de Lodos	Ya existente, para capacidad de 545 kg/h
Consumo Agua Dulce	2376 l/h
Torre Scrubber	2 Unidades; 3,2x8,6x5,7; 15 tn/ud.
Potencia Unidades Scrubber Cerrado	53,29kW a 85% MCR

Las modificaciones en la sala de máquinas son simples, ya que se instalan dos bombas adicionales para agua dulce y circulación, un tanque de almacén para producto así como un tanque de circulación para la sustancia mezclada de agua dulce y NaOH.

En la cámara de depuradoras habrá una unidad más pequeña para el agua de lavado, y a continuación una descarga al mar. El agua de circulación al estar en un circuito cerrado deberá refrigerarse y por ello necesita un intercambiador de calor. El circuito también deberá purgarse cada cierto tiempo a fin de eliminar las impurezas contenidas en el circuito e introducir agua limpia. Los residuos de la instalación se descargarán a un tanque de lodos, el cual será vaciado según sus descargas previstas con los puertos.

Para finalizar, los efectos para la estabilidad del buque no se han podido realizar al no poder conseguir las curvas hidrostáticas del buque.

6 BIBLIOGRAFÍA

6.1 LIBROS

- ALFA LAVAL, *Marine Essentials Catalogue – Equipment and services for marine applications,* MDD00001EN 1402, 2014.

- CARPIO RAMOS, M. A. *Refino del petróleo, gas natural y petroquímica.* Editorial Fundación fomento innovación industrial, 1997. ISBN: 84-605-6775-9.

- EGCSA; *Lowering emissions safely and sustainably,* Exhaust Gas Cleaning Systems Association, EGCSA Handbook, 2010.

- GARY, JAMES H. y HANDWERCK, GLENN E. *Petroleum refining. Technology and Economics,* 4th Edition. Editorial Marcel Dekker. ISBN: 0-8247-0482-7.

- MAN Diesel & Turbo, *Emission Project Guide – MAN B&W Two-stroke Marine Engines,* Ref. 7020-0145-00, 15 Mayo 2013.

- OMI, MARPOL, *Enmiendas al MARPOL,* Londres, Edición 2005.

- OMI, *Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships and NOx Technical Code.* Annex VI MARPOL 73/78, Londres, 2008.

- REED, RICHARD JAMES, *North Armerican Combustion Handbook: A Basic Reference on the Art and Science of Industrial Heating with Gaseous and Liquid Fuels,* Vol. 1, 1 Febrero 1986, ISBN: 97-809-9601-596-28.

- WÄRTSILÄ, *Wärtsilä Engines 38 Project Guide,* Wärtsilä Ship Power, Noviembre 2008, Trieste, a1780.

6.2 DOCUMENTOS Y ARTÍCULOS

- ALFA LAVAL, *Pure SOx Exhaust Gas Cleaning Brochure,* EMD00291EN 1208.

- B-M KULLAS-NYMAN, *Exhaust Gas Scrubbing Systems, Technical and Economical Aspects,* Wärtstilä, 11 Marzo 2011.

- CE DELFT, GERMANISCHER LLOYD, MARINTEK, DET NORSKE VERITAS, G*reenhouse Gas Emissions for Shipping and Implementation Guidance for the Marine Fuel Sulphur Directive,* CE Delft, Diciembre 2006.

- CORTÉS DEL PINO, ADRIÀ; *Proceso de Refino del Petróleo para la Obtención de Combustibles Marinos,* Proyecto Final de Carrera Ingeniería Técnica Naval, Facultad de Náutica de Barcelona, Abril 2014, Barcelona.

- DUPONT Sustainable Solutions, *BELCO Marine Scrubber – Exhaust Gas Cleaning Systems for Marine Engines & Boilers,* 2014.
- HAMWORTHY KRYSTALLON, Sea Water Scrubbing, Hamworthy Krystallon Presentation. Octubre 2009.

- KALLI, J.; KARVONEN, T.; MAKKONEN, T., *Sulphur content in ships bunker fuel in 2015. A study on the impacts of the new IMO regulations on transportation costs*. Abril 2009.

- MAN Diesel & Turbo, *New Dry Scrubber Technology Proven in Field Conditions,* Press Release MAN Diesel & Turbo. Copenhagen, 08 Septiembre 2010.

- MARITIME AND COASTGUARD AGENCY (UK). *Impact Assessment for the revised Annex VI of MARPOL.* Julio 2009.

- NIELS, B. CLAUSEN; DR. PIERRE C., SAMES y ANDERSEN, MADS LYDER, *Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels,* GL y MAN Diesel & TURBO, Mayo 2012, 5510-0122-00ppr.

- OMI, Circular MEPC. 1/ Circ 755, *Information on the United States Caribbean Sea Emission Control Area Under MARPOL ANNEX VI,* Londres, 2 Noviembre 2011.

- OMI, Circular MEPC. 1/Circ 723, *Information on North American Emission Control Area (ECA) Under MARPOL Annex VI*, Ref. T5/1.01, Londres, 13 Mayo 2010.

- OMI, Resolución MEPC. 184 (59), *Directrices sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape,* MEPC 59/24/Add.1, Anexo 9, 17 de Julio de 2009.

- ROZMARYNOWSKA, MONIKA y OLSAKOWSKI, BOGDAN, *Implications of new regulation regarding sulphur content in ship's fuel on maritime transport sector within Baltic Sea Region: Implications of the IMO regulations on the future pattern of the cargo flow in the Baltic,* TRANSBALTIC, Julio 2012.

- SAACKE GmbH, *Exhaust Gas Purification LMB-EGS Scrubber,* 2014, 0-0750-0050-02.

- SIN, MIHAELA, *Análisis del Transporte Marítimo en el Mar del Norte a Enero de 2015,* Proyecto Final de Carrera Licenciatura en Máquinas Navales, Facultad de Náutica de Barcelona, Julio 2014, Barcelona.

- SONZIO LEONARDO, *Wärtsilä SOx Scrubber Technology development and experience,* 36th Annual Interferry Conference, Wärtsilä Environmental Services, 5 Octubre 2011.

- WALTER, J. y WAGNER J.; *Choosing Exhaust Scrubber Systems. Complying with the SOx limits laid out in MARPOL ANNEX VI, EU Directive 2005/33 and the California Code Regulations Title 17.3.1.7.5.,* Maritimes Cluster Northern Germany, Diciembre 2012.

- WÄRTSILÄ, *Exhaust Gas Cleaning Case Study: Superspeed II,* Febrero 2012, CA.

- WÄRTSILÄ, *SOx Scrubber Technology – Exhaust Gas Cleaning,* Wärtsilä Corporation, Septiembre 2013.

6.3 WEBGRAFÍA

- Alfa Laval Marine [Consulta Agosto 2014]
  www.alfalaval.com/industries/marine/pages/default.aspx

- BELCO Marine Scrubber Design [Consulta Agosto 2014]
  www.belcotech.com/marine

- Clean Shipping Technology [Consulta Agosto 2014]
  www.cleantech.cnss.no/policies-and-instruments/nox-emissions/

- BELCO EDV Wet Scrubbing Systems [Consulta 2014]
  www.dupont.com

- Exhaust Gas Cleaning Systems Association [Consulta Agosto 2014]
  www.egcsa.com

- MAN Marine Engines & Systems [Consulta Agosto 2014]
  www.marine.man.eu/docs

- Laboratory for Maritime Transport National - University of Athens [Consulta Agosto 2014]
  www.martrans.org/research.htm

7 ANEXOS

7.1 Modelo de Certificado de Cumplimiento de las Emisiones de SOx

CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LAS EMISIONES DE SO_x

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE UNIDAD PARA LOS SISTEMAS DE LIMPIEZA DE LOS GASES DE ESCAPE

Expedido de conformidad con las disposiciones del Protocolo de 1997, enmendado mediante la resolución MEPC.176(58), que enmienda el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978, con la autoridad conferida por el Gobierno de:

.....

(nombre oficial completo del país)

por.....

(título oficial completo de la persona u organización competente autorizada en virtud de lo dispuesto en el Convenio)

Se certifica que la unidad del sistema para la limpieza de los gases de escape-SO_x (SLGE-SO_x) que se indica a continuación ha sido objeto de reconocimiento de conformidad con las especificaciones que figuran en el Plan A de las Directrices sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape – adoptadas mediante la resolución MEPC.***(**).

El presente certificado sólo es válido para la unidad LGE mencionada a continuación:

Fabricante de la unidad	Modelo/tipo	Número de serie	Número de aprobación de la unidad del sistema LGE y del Manual técnico

Todo buque en el que se haya instalado esta unidad del sistema LGE llevará siempre a bordo una copia del presente certificado y el Manual técnico del sistema LGE.

Este certificado tendrá validez durante toda la vida útil de la unidad del sistema LGE, instalada en los buques sometidos a la autoridad de este Gobierno, a condición de que se realicen los reconocimientos prescritos en la sección 4.2 de las presentes directrices y en la regla 5 del Anexo VI revisado del Convenio MARPOL.

Expedido en.....

(lugar de expedición del certificado)

dd/mm/aaaa

....

(fecha de expedición) *(firma del funcionario debidamente autorizado que expide el certificado)*

(sello o estampilla de la autoridad, según corresponda)

7.2 Prueba del Método basado en la Relación SO_2/CO_2

1 El método basado en la relación SO_2/CO_2 permite vigilar de forma directa las emisiones de los gases de escape a fin de verificar que respetan los límites relativos a las emisiones establecidos en el cuadro 1 de la sección 1.3 de las presentes directrices. En el caso de los sistemas LGE que absorben CO_2 durante el proceso de limpieza de los gases de escape, es necesario medir el CO_2 antes de dicho proceso y utilizar la concentración de CO_2 antes de la limpieza con la concentración de SO_2 tras la limpieza. En el caso de los sistemas de limpieza tradicionales con bajo contenido de álcalis, prácticamente no se absorbe CO_2 durante la limpieza de los gases de escape, por lo que la vigilancia de ambos gases se puede efectuar después del proceso de limpieza.

2 La correspondencia entre la relación SO_2/CO_2 se puede determinar examinando simplemente los contenidos respectivos de carbono por unidad de masa del destilado y del combustible residual. El contenido de carbono de este grupo de combustibles hidrocarbonados, como porcentaje de la masa, es muy similar, mientras que su contenido de hidrógeno es diferente. Por consiguiente, se puede concluir que para un consumo determinado de carbono por combustión, se consumirá azufre en una cantidad proporcional al contenido de azufre del combustible; es decir, la relación entre el carbono y el azufre es constante, tras su ajuste para tener en cuenta el peso molecular del oxígeno de la combustión.

3 Se había previsto inicialmente utilizar la relación SO_2/CO_2 para verificar que se cumplen las emisiones procedentes de los combustibles de un contenido de 1,5 % de azufre. Se puede demostrar que el límite de 65 ([1]ppm/%) de la relación SO_2/CO_2 corresponde a un contenido del 1,5 % de azufre en el combustible calculando en primer lugar la relación entre la masa del azufre del combustible y la masa de carbono que contiene el combustible, que se indica en el cuadro 1 de este apéndice con respecto a diferentes combustibles y contenidos de azufre en el combustible; se incluye el 1,5 % de azufre tanto para los combustibles destilados como los residuales. Dichos cocientes se utilizaron para calcular las concentraciones correspondientes de SO_2 y CO_2 en los gases de escape, concentraciones que figuran en el cuadro 2 de este apéndice. Los pesos moleculares se tuvieron en cuenta para convertir las fracciones de masa en fracciones molares. Por lo que respecta a los combustibles con un 1,5 % de azufre que figuran en el cuadro 2, la cantidad de CO_2 se establece primero en un 8 % y posteriormente se cambia a un 0,5 % a fin de demostrar que el exceso de aire no produce efecto alguno. Como se esperaba, varía la concentración absoluta de SO_2, pero no el cociente SO_2/CO_2. Ello indica que tal cociente es independiente de la proporción combustible-aire. En consecuencia, el cociente SO_2/CO_2 puede utilizarse sin problemas para cualquier punto de funcionamiento, incluidos aquéllos en los que no se produce potencia al freno alguna.

Obsérvese que el cociente SO_2/CO_2 varía ligeramente del combustible destilado al residual. Ello se debe a que los dos tipos de combustible tienen una proporción de átomos de hidrógeno y carbono (H:C) muy diferente. En la figura 1 se ilustra cómo se ven afectados los cocientes SO_2/CO_2 por la proporción H:C con respecto a una amplia selección de proporciones H:C y concentraciones de azufre del combustible. Observando la figura 1 puede concluirse que para niveles de azufre del combustible inferiores al 3,00 %, la diferencia en los cocientes S/C para combustibles destilados y residuales es inferior al 5,0 %.

Si se utilizan combustibles no derivados del petróleo, el cociente SO_2/CO_2 apropiado aplicable a los valores que figuran en las reglas 14.1 y/o 14.4 deberá ser aprobado por la Administración.

Cuadro 1: propiedades de los combustibles destilados y residuales*

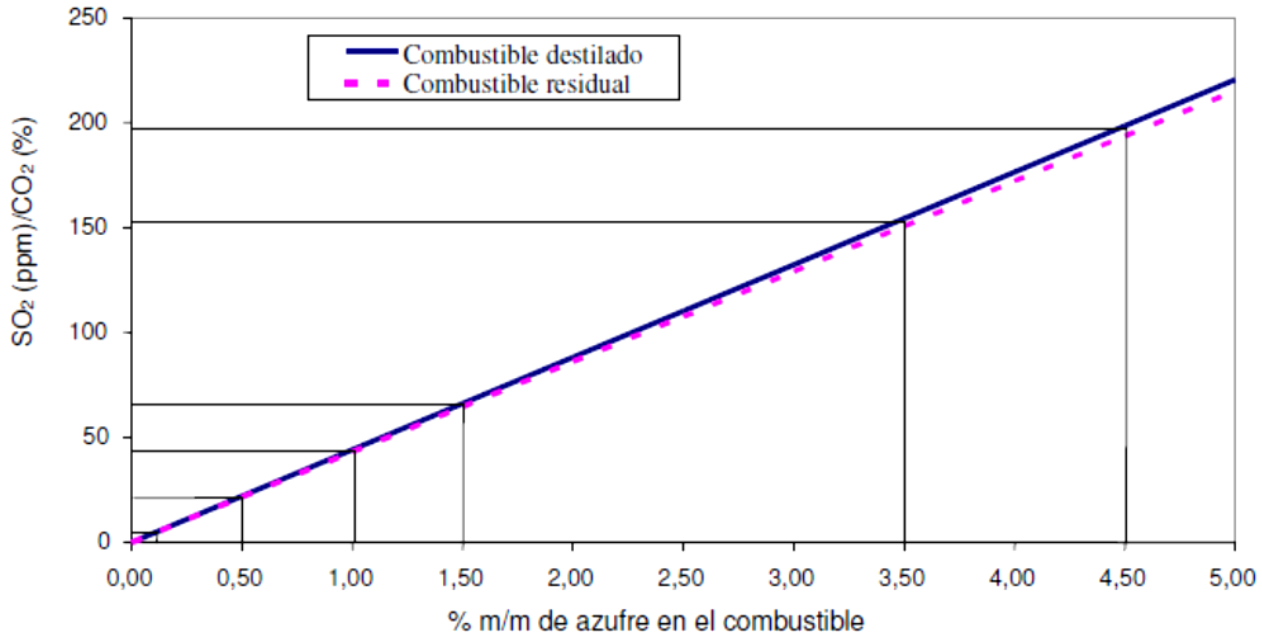
	Carbono	Hidrógeno	Azufre	Otros	C	H	S	S/C del combustible	Exh SO_2/CO_2
Tipo de combustible	%(m/m)	%(m/m)	%(m/m)	%(m/m)	mol/kg	mol/kg	mol/kg	mol/mol	ppm/%(v/v)
Destilado	86,20	13,60	0,17	0,03	71,8333	136	0,0531	0,00074	7,39559
Residual	86,10	10,90	2,70	0,30	71,7500	109	0,8438	0,01176	117,5958
Destilado	85,05	13,42	1,50	0,03	70,8750	134,2	0,4688	0,006614	66,1376
Residual	87,17	11,03	1,50	0,30	72,6417	110,3	0,4688	0,006453	64,5291

* Basado en las propiedades que figuran en las Directrices de la OMI para la vigilancia de los NO_x (resolución MEPC.103(49))

Cuadro 2: Cálculos de las emisiones correspondientes a un contenido del 1,5 % de azufre en el combustible

	CO_2	SO_2	SO_2/CO_2 en los gases de escape	S/C en los gases de escape
	%	[1]ppm	[1]ppm/%	g/g
Destilado – 0,17 % de S	8	59,1	7,4	0,00197
Residual – 2,70 % de S	8	939,7	117,5	0,03136
Destilado – 1,5 % de S	8	528,5	**66,1**	**0,01764**
Residual – 1,5 % de S	8	515,7	**64,5**	**0,01721**
Destilado – 1,5 % de S	0,5	33,0	**66,1**	**0,01764**
Residual – 1,5 % de S	0,5	32,2	**64,5**	**0,01721**

Cociente SO_2/CO_2 en función de % de azufre en el combustible



4 La correspondencia entre 65 ([1]ppm/%) SO_2/CO_2 y el valor de 6,0 g/kWh se revela demostrando que sus cocientes S/C son similares. Ello requiere la hipótesis adicional de un consumo de combustible específico al freno (BSFC) por un valor de 200 g/kWh. Tal valor es una promedio apropiado para los motores diésel marinos. El cálculo se efectúa de la siguiente manera:

Nota 1: En el cuadro de emisiones (cuadro 2), los valores de los cocientes de masa S/C calculados *supra,* basados en 6,0 g/kWh y 200 g/kWh BSFC, se encuentran dentro del 0,10 % de los cocientes de masa S/C. En consecuencia, la correspondencia entre 65[1] (ppm/%) de SO_2/CO_2 y el valor de 6,0 g/kWh es estrecha.

Nota 2: El valor de 6,0 g/kWh, y en consecuencia, el valor de 200 g/kWh de consumo de combustible específico al freno (BSFC) se toma del Anexo VI del Convenio MARPOL, adoptado por la Conferencia MARPOL de 1997.

$$S/C_{\text{combustible}} = \frac{SO_2 \text{ específico al freno} * \left(MW_S / MW_{SO2} \right)}{BSFC * \left(\%\text{ de carbono en combustible} / 100 \right)}$$

SO_2 específico al freno = 6,0 g/kWh
MW_S = 32,065 g/mol
MW_{SO2} = 64,064 g/mol
BSFC = 200 g/kWh

% de carbono en combustible con 1,5 % de S (cuadro 1) = 85,05 % (destilado) y 87,17 % (residual)

$$S/C_{\text{combustible residual}} = \frac{6{,}0 * \left(32{,}065 / 64{,}064 \right)}{200 * \left(87{,}17\,\% / 100 \right)}$$

$$S/C_{\text{combustible residual}} = 0{,}01723$$

$$S/C_{\text{combustible destilado}} = \frac{6{,}0 * \left(32{,}065 / 64{,}064 \right)}{200 * \left(85{,}05\,\% / 100 \right)}$$

$$S/C_{\text{combustible destilado}} = 0{,}01765$$

Así pues, las fórmulas de trabajo son las siguientes:

$$\text{Para una combustión completa} = \frac{SO_2(ppm*)}{CO_2(\%*)} \leq 65$$

$$\text{Para una combustión incompleta} = \frac{SO_2(ppm\,*)}{CO_2(\%\,*) + (CO(ppm\,*)/10\,000) + (THC(ppm\,*)/10\,000)} \leq 65$$

* **Nota:** Debe efectuarse un muestreo de las concentraciones de gas o convertirlas al mismo contenido de agua residual (por ejemplo, humedad máxima, humedad mínima).

6 A continuación se explican los principios que justifican la utilización del valor de ([2]ppm/%) SO_2/CO_2 como límite para determinar el cumplimiento de la regla 14.1 ó 14.4:

a) Dicho límite puede utilizarse para determinar si los quemadores de fueloil que no producen potencia mecánica cumplen tal regla.

b) El límite puede utilizarse para determinar el cumplimiento en cualquier potencia de salida, incluso con el motor funcionando en vacío.

c) El límite solamente exige dos mediciones de la concentración de gas en un punto de muestreo.

d) No es necesario medir parámetro alguno del motor, tales como régimen, par, flujo de gases de escape o flujo de combustible.

e) Si las dos mediciones de la concentración del gas se efectúan con el mismo contenido de agua residual en la muestra (por ejemplo, humedad máxima, humedad mínima), en el cálculo no es necesario utilizar los factores de conversión de humedad mínima a máxima.

f) El límite permite separar por completo la eficacia térmica de la unidad de combustión del fueloil de la unidad LGE.

g) No es necesario conocer las propiedades del combustible.

h) Dado que solamente se efectúan dos mediciones en un solo punto, los efectos transitorios del motor o de la unidad LGE pueden reducirse al mínimo alineando las señales de sólo estos dos analizadores. (Obsérvese que los puntos más apropiados para la alineación son aquéllos en los que cada analizador responde a un cambio en escalón en las emisiones en la sonda de muestreo por un 50 % del valor en estado estacionario).

i) Este límite es independiente de la cantidad de gases de escape diluidos. Puede producirse dilución debido a la evaporación de agua en una unidad LGE, y como parte de un sistema de preacondicionamiento del dispositivo de muestreo de los gases de escape.

---

[2] ppm significa "partes por millón". Se parte de la hipótesis de que la medición de las ppm se efectúa mediante analizadores de gas utilizando una referencia molar y partiendo de un comportamiento ideal en los gases. En realidad, las unidades correctas desde el punto de vista técnico son los micromoles de sustancia por mol de cantidad total (µmol/mol), pero se utilizan las ppm a fin de mantener la uniformidad con las unidades que aparecen en el Código Técnico sobre los NO_x.

7.3 DATOS DE LOS MOTORES DEL BUQUE RO-PAX ZURBARÁN

Wärtsilä 9L38

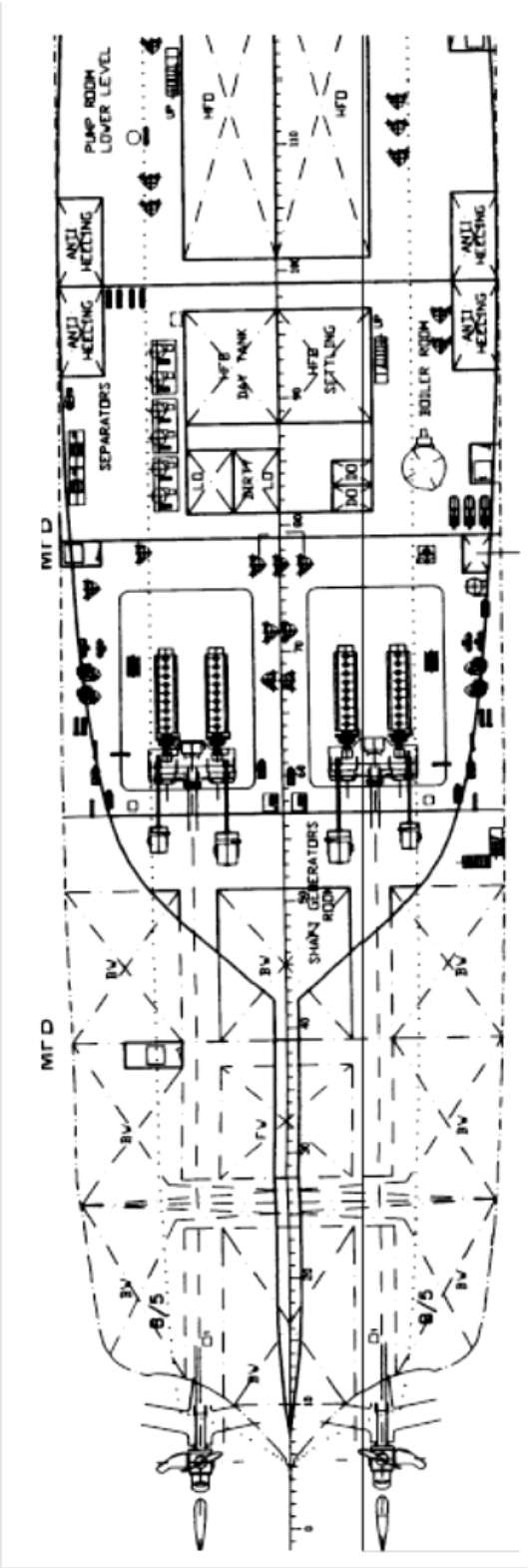
Diesel engine Wärtsilä 9L38		DE	CPP
Engine speed	RPM	600	600
Engine output	kW	6525	6525
Cylinder bore	mm	380	380
Stroke	mm	475	475
Mean effective pressure	MPa	2.7	2.7
Mean piston speed	m/s	9.5	9.5
Idling speed	rpm	320	320
Combustion air system			
Flow of air at 100% load	kg/s	11.41	11.41
Ambient air temperature, max.	°C	45	45
Air temperature after air cooler (TE601)	°C	50	50
Air temperature after air cooler, alarm	°C	60	60
Exhaust gas system (Note 1)			
Exhaust gas flow, 100% load	kg/s	11.78	11.78
Exhaust gas flow, 85% load	kg/s	11.39	10.88
Exhaust gas flow, 75% load	kg/s	10.37	9.46
Exhaust gas flow, 50% load	kg/s	7.29	7.39
Exhaust gas temperature after turbocharger, 100% load (TE517)	°C	389	389
Exhaust gas temperature after turbocharger, 85% load (TE517)	°C	309	320
Exhaust gas temperature after turbocharger, 75% load (TE517)	°C	307	328
Exhaust gas temperature after turbocharger, 50% load (TE517)	°C	323	314
Exhaust gas back pressure, max.	kPa	3	3
Exhaust gas pipe diameter, min.	mm	800	800
Calculated exhaust diameter for 35 m/s	mm	894	894
Heat balance at 100% load (Note 2)			
Jacket water, HT-circuit	kW	751	751
Charge air, HT-circuit	kW	1247	1247
Lubricating oil, LT-circuit	kW	782	782
Charge air, LT-circuit	kW	577	577
Radiation	kW	255	255
Fuel system (Note 3)			
Pressure before injection pumps (PT101)	kPa	700	700
Viscosity before injection pumps (HFO)	cSt	16..24	16..24
Viscosity before injection pumps (MDF), min.	cSt	2	2
Fuel temperature before injection pumps (HFO) (TE101)	°C	< 140	< 140
Fuel temperature before injection pumps (MDF) (TE101)	°C	< 45	< 45
Circulating fuel flow / consumption ratio (100% load), min.		4:1	4:1
Fuel consumption (HFO), 100% load	g/kWh	183	183
Fuel consumption (HFO), 85% load	g/kWh	180	177
Fuel consumption (HFO), 75% load	g/kWh	180	177
Fuel consumption (HFO), 50% load	g/kWh	186	181
Leak fuel quantity, clean fuel (HFO), 100% load	kg/h	2.5	2.5
Leak fuel quantity, clean fuel (MDF), 100% load	kg/h	25.1	25.1

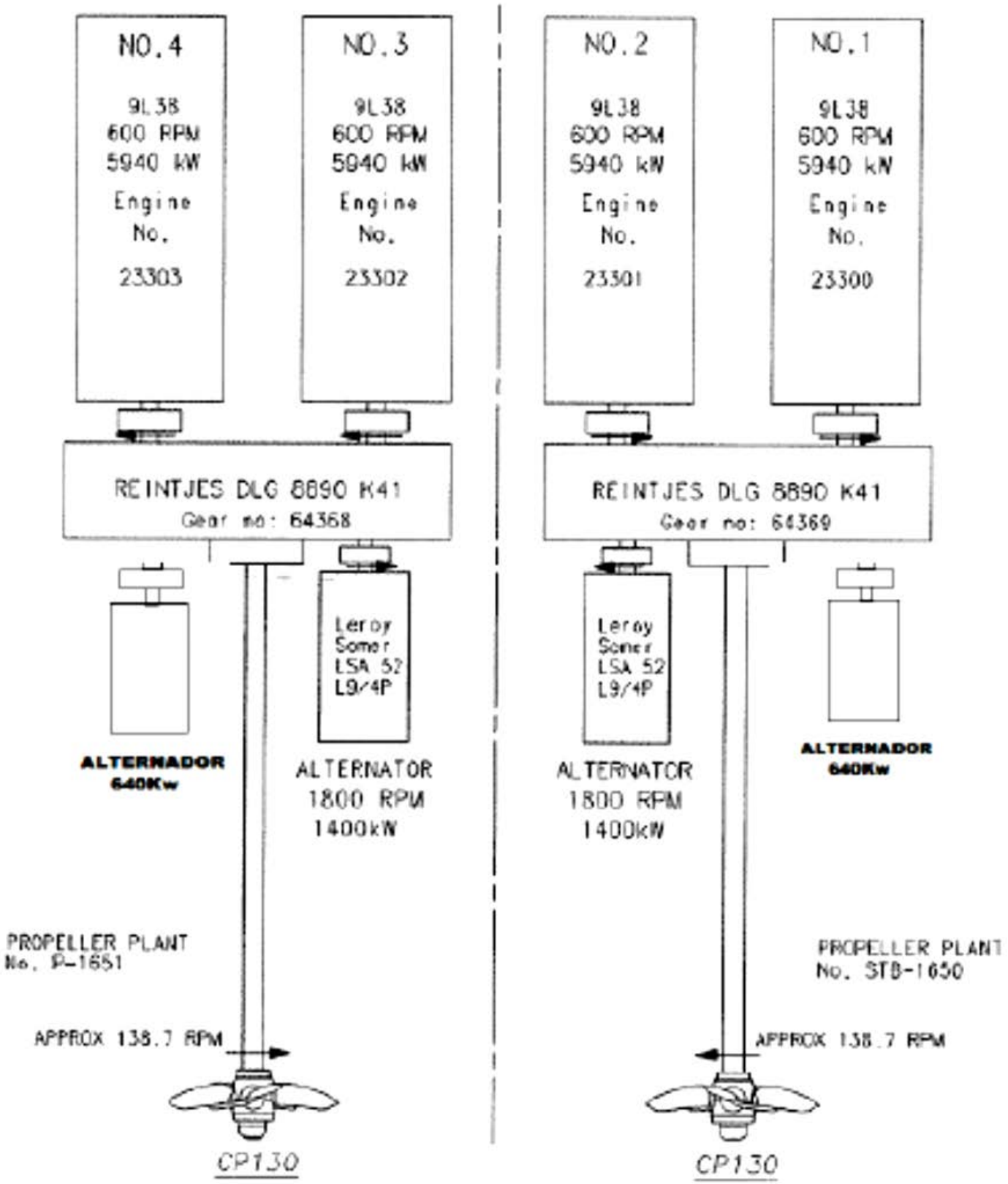
Lubricating oil system			
Pressure before engine, nom. (PT201)	kPa	450	450
Pressure before engine, alarm (PT201)	kPa	380	380
Pressure before engine, stop (PT201)	kPa	340	340
Priming pressure, nom. (PT201)	kPa	50	50
Temperature before engine, nom. (TE201)	°C	63	63
Temperature before engine, alarm (TE201)	°C	70	70
Temperature after engine, approx.	°C	79	79
Pump capacity (main), engine driven	m³/h	142	142
Pump capacity (main), separate	m³/h	112	112
Pump capacity (priming), 50/60 Hz	m³/h	27 / 33	27 / 33
Suction ability of main engine driven pump (including pressure losses in pipes), max.	kPa	40	40
Suction ability of priming engine driven pump (including pressure losses in pipes), max.	kPa	35	35
Oil volume in separate system oil tank, nom.	m³	8.9	8.9
Filter fineness, mesh size	µm	30	30
Filters difference pressure, alarm	kPa	100	100
Oil consumption (100% load), approx.	g/kWh	0.7	0.7
Crankcase ventilation flow rate	l/min/cyl	210	210
Crankcase backpressure, max.	kPa	0.2	0.2

Diesel engine Wärtsilä 9L38		**DE**	**CPP**
High temperature cooling water system			
Pressure before engine, nom. (PT401)	kPa	380 + static	380 + static
Pressure before engine, alarm (PT401)	kPa	250 + static	250 + static
Pressure before engine, max. (PT401)	kPa	460 + static	460 + static
Temperature before engine, approx. (TE401)	°C	73	73
Temperature after engine, nom. (TE402)	°C	93	93
Temperature after engine, alarm (TE402)	°C	103	103
Temperature after engine, stop (TE402)	°C	110	110
Pump capacity, nom.	m³/h	99	99
Pressure drop over engine	kPa	180	180
Water volume in engine	m³	0.45	0.45
Pressure from expansion tank	kPa	70...150	70...150
Pressure drop over external system, max.	kPa	160	160
Delivery head of stand-by pump	kPa	380	380
Low temperature cooling water system			
Pressure before charge air cooler, nom. (PT471)	kPa	340 + static	340 + static
Pressure before charge air cooler, alarm (PT471)	kPa	250 + static	250 + static
Pressure before charge air cooler, max. (PT471)	kPa	460 + static	460 + static
Temperature before engine, max. (TE471)	°C	38	38
Temperature after engine, min.	°C	44	44
Pump capacity, nom.	m³/h	126	126
Pressure drop over engine	kPa	180	180
Water volume in engine	m³	0.45	0.45
Pressure drop over external system, max.	kPa	120	120
Pressure from expansion tank	kPa	70...150	70...150
Delivery head of stand-by pump	kPa	340	340
Starting air system (Note 4)			
Air pressure, nom. (PT301)	kPa	3000	3000
Air pressure, min. (20°C) (PT301)	kPa	1200	1200
Air pressure, max. (PT301)	kPa	3000	3000
Low pressure limit in air vessels	kPa	1800	1800
Air consumption per start (20°C)	Nm³	4.3	4.3
Air consumption per start, with generator (20°C)	Nm³	6.3	6.3

COMMON RAIL			
Fuel system			
Pressure before injection pumps, min.	kPa	1000	1000
Viscosity before injection pumps (HFO)	cSt	16..24	16..24
Viscosity before injection pumps (MDF)	cSt	2	2
Quantity of clean leak fuel, HFO (100% load, excluding injector return)	kg/h	1.3	1.3
Quantity of clean leak fuel, MDF (100% load, excluding injector return)	kg/h	12.5	12.5
Clean return fuel from fuel injector, HFO (100% load)	kg/h	251	251
Clean return fuel from fuel injector, MDF (100% load)	kg/h	251	251
Fuel temperature before fuel pumps (HFO)	°C	< 140	< 140
Fuel temperature before fuel pumps (MDF)	°C	< 45	< 45
Circulating fuel flow / consumption ratio (100%) load, min.		3:1	3:1
Mixing tank pressure, max.	kPa	500	500
Filter absolute mesh size (HFO), max. (automatic fine filter)	µm	10	10
Filter absolute mesh size (MDF), max. (automatic or duplex filter)	µm	10	10
Safety filter absolute mesh size (HFO), max.	µm	25	25
Lubricating oil system			
Pressure at engine inlet, nom.	kPa	450	450
Pressure after control oil pump, nom.	kPa	25000	25000
Control oil flow to engine (engine running), nom.	l/min/cyl	0.5	0.5
Control oil flow to engine, max. momentary flow (= max. pump capacity)	l/min	110	110
Temperature before control oil pump, nom.	°C	63	63
Filter absolute mesh size, max. (automatic fine filter)	µm	10	10
Filter absolute mesh size, max. (by-pass filter for automatic filter)	µm	25	25
Running-in filters on injectors holder mesh size, max.	µm	100	100
Starting air system			
Air consumption per start (20°C)	Nm^3	4.3	4.3

7.4 PLANOS DEL BUQUE ZURBARÁN




NO.4
9L38
600 RPM
5940 kW
Engine
No.
23303
NO.3
9L38
600 RPM
5940 kW
Engine
No.
23302
NO.2
9L38
600 RPM
5940 kW
Engine
No.
23301
NO.1
9L38
600 RPM
5940 kW
Engine
No.
23300
REINTJES DLG 8890 K41
Gear no: 64368
REINTJES DLG 8890 K41
Gear no: 64369
Leroy Somer LSA 52 L9/4P
Leroy Somer LSA 52 L9/4P
ALTERNADOR 640Kw
ALTERNATOR 1800 RPM 1400kW
ALTERNATOR 1800 RPM 1400kW
ALTERNADOR 640Kw
PROPELLER PLANT No. P-1651
PROPELLER PLANT No. STB-1650
APPROX 138.7 RPM
APPROX 138.7 RPM
CP130
CP130