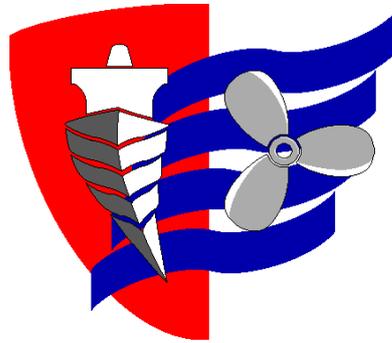


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**SOLUCIONES PARA COMBATIR LA
CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LOS GASES
DE ESCAPE EN UN BUQUE RO/PAX**

*Solutions to prevent the pollution produced by the
exhaust gases in a RO/PAX vessel*

Para acceder al Título de Máster Universitario en

INGENIERÍA MARINA

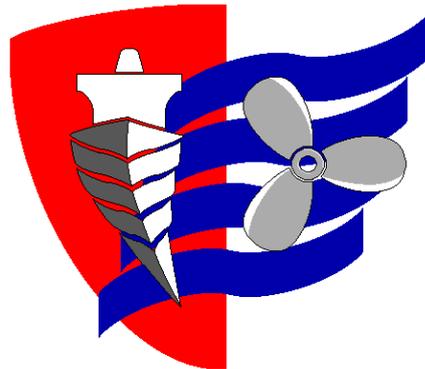
Autor: María Sendín Guerra

Director: Belén Río Calonge

Marzo - 2019

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**SOLUCIONES PARA COMBATIR LA
CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LOS GASES
DE ESCAPE EN UN BUQUE RO/PAX**

*Solutions to prevent the pollution produced by the
exhaust gases in a RO/PAX vessel*

Para acceder al Título de Máster Universitario en

INGENIERÍA MARINA

Marzo - 2019

ÍNDICE

Índice	3
Resumen	5
Summary	5
Palabras clave	6
Keywords	6
1 Introducción	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Naturaleza del trabajo.....	9
1.3 Contexto técnico.....	10
1.3.1 Combustibles marinos	11
1.4 Justificación y objetivos	13
1.5 Relevancia.....	13
2 Memoria descriptiva.....	15
2.1 Planteamiento del problema	15
2.2 Herramientas de resolución.....	17
2.2.1 Anexo VI del Marpol	17
2.2.2 Legislación europea	18
2.2.3 Regulación para las emisiones de NO _x	19
2.2.4 Regulación para las emisiones de SO _x	20
2.2.5 Regulación para las emisiones de CO ₂	21
2.3 Metodología.....	21
2.3.1 Métodos de reducción	22
2.3.2 Sistemas de reducción no _x	22
2.3.3 Sistemas de reducción SO _x	31

3	Aplicación práctica.....	38
3.1	Medidas para la solución del problema	38
3.2	Estudio de diferentes casas comerciales.....	42
3.3	Elección de la medida más favorable	51
4	Conclusiones	63
5	Referencias bibliográficas.....	65

RESUMEN

A pesar de que el transporte marítimo es menos contaminante que otras opciones de transporte, la Organización Marítima Internacional está recrudesciendo las normas para combatir los cambios climáticos que estamos generando debido a la contaminación por los combustibles utilizados. Para poder llevar a cabo estas medidas se le ofrece a los armadores diferentes opciones para reducir sus emisiones, como pueden ser: construcción de motores más eficientes, mejores diseños de propulsores, combustibles menos contaminantes, torres de lavado, etc.

En este trabajo vamos a estudiar los diferentes sistemas para reducir las emisiones y nos centraremos en la elección del sistema o sistemas más adecuados para poder reducir las emisiones de NO_x y SO_x para nuestro buque en estudio y así poder cumplir las normas internacionales.

SUMMARY

Although maritime transport is less polluting than other transport options, the International Maritime Organization is intensifying the regulations to combat the climate changes that we are generating due to the pollution caused by the fuels used. In order to carry out these measures, shipowners are offered different options to reduce their emissions, such as: construction of more efficient engines, better designs of propellants, less polluting fuels, scrubbers...

In this project we will study the different systems to reduce emissions and we will focus on the most appropriate system or systems to reduce NO_x and SO_x emissions for our vessel under study and thus be able to meet international standards.

PALABRAS CLAVE

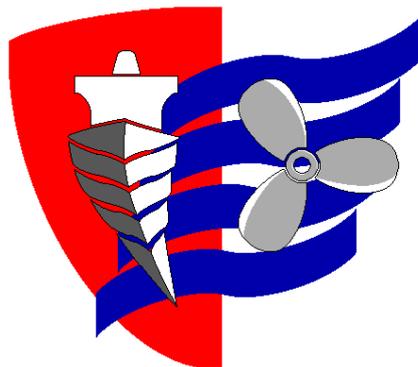
Emissiones, NOx, SOx, contaminación atmosférica, MARPOL VI

KEYWORDS

Emissions, NOx, SOx, air pollution, MARPOL VI

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El presente trabajo que se presentará en la Escuela Técnica Superior de Náutica, como Trabajo Fin de Máster al objeto de obtener el título de Máster en Ingeniería Marina, trata sobre las medidas que se pueden llevar a cabo para reducir la contaminación producida por la emisión de gases contaminantes en los motores propulsores de un buque que opera con fuel oil y los motores generadores con diésel oil.

Esta contaminación nos lleva a un calentamiento global (Caballero, M. et al 2007) producido por el efecto invernadero. Este efecto es un fenómeno producido porque los gases presentes en la atmósfera, los cuales retienen y regulan el calor generado por el sol en la tierra. Si el hombre no hubiese influido en las emisiones de gases que alteran este fenómeno, sería un proceso normal para poder regular la temperatura terrestre.

La influencia que hemos tenido en el medio ambiente haciendo que aumente la cantidad de CO₂ ha provocado cambios de temperatura, aumento del nivel del mar, etc...

Los contaminantes atmosféricos producidos por los buques se dividen en los siguientes compuestos:

- Óxido de azufre (SO_x).

En los procesos de combustión el azufre presente en el combustible reacciona con el oxígeno originando dióxido de azufre (SO₂) y trióxido de azufre (SO₃). Estos últimos en contacto con el agua forman el ácido sulfúrico (H₂SO₄), uno de los compuestos causantes de la lluvia ácida.

- Óxido de nitrógeno (NO_x)

El nitrógeno normalmente es un gas inerte, pero al elevarse la temperatura en la combustión reacciona con el oxígeno y forma óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Los óxidos de nitrógeno también son los responsables de la lluvia ácida.

- Óxido de carbono.

Dentro de la combustión hay una parte del combustible que no es consumido completamente ya que no llega a oxidarse, produciendo monóxido de carbono (CO). El dióxido de carbono también es producido en la combustión, y aunque está presente en la naturaleza, es nocivo en grandes cantidades produciendo el anteriormente mencionado efecto invernadero.

- Partículas.

Toda combustión emite ciertas partículas, tanto sólidas como líquidas, que no han sido quemadas. Esto acarrea grandes problemas en la salud de todos.

1.2 NATURALEZA DEL TRABAJO

El presente proyecto trata de un estudio técnico que versará sobre las tecnologías y medidas utilizadas para poder combatir la contaminación ocasionada por las emisiones de un buque RO/Pax, en concreto, el buque Poeta López Anglada perteneciente a la naviera Balearia.

Reducir la contaminación es complicado por el gran gasto económico que tienen que desembolsar los armadores para poder cumplir con las duras normas del convenio MARPOL, Anexo VI, que se van recrudesciendo a medida que pasan los años.

No existe una única y simple solución para poder combatir todos los componentes perjudiciales emitidos a la atmósfera, ya que existen sistemas individuales para reducir uno o dos tipos de éstos, pudiendo hacer que los demás aumenten. Éste es el caso de las torres de lavado (Scrubber) que reducen las emisiones de SOx y partículas; y sin embargo, aumentan las emisiones de CO₂. Si cambiamos a un consumo de combustible más bajo en azufre conseguiremos reducir el SOx aunque los NOx seguirán en los mismos valores. El uso de Gas Natural Licuado (GNL) es muy recomendable ya que elimina el SOx y NOx de manera sustancial, e incluso reduce ligeramente las emisiones de CO₂; no obstante requiere demasiada

inversión lo cual no permite su aplicación si no se espera un retorno económico suficiente.

Por todo esto, se van a analizar los cambios que se están produciendo en los buques para poder mejorar las emisiones provenientes de los motores y cuál podría ser la solución más viable para nuestro buque.

1.3 CONTEXTO TÉCNICO

El estudio se centra en el buque Poeta López Anglada cuyo año de construcción fue en 1983. La máquina propulsora son dos motores Pielstrick 16PC2, 6V400 y tres motores auxiliares Crepelle/6SN3L a 750 rpm.

Las características completas del buque son las siguientes:

Tabla 1: Características del buque en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Nombre del buque	Poeta López Anglada
Número OMI	8208763
Fecha de construcción/Lugar	01/01/1983 Nantes (Francia)
Tipo de buque	Pasaje/Carga rodada
Arqueo bruto	15229 GT
Arqueo neto	4568 NT
Desplazamiento en rosca	6775,66 T
Peso muerto	2112,8 T
Eslora Total	133,62 m
Eslora perpendiculares	126,2 m
Manga de trazado/Total	22,5 m/23,52 m

Calado de trazado	4,98 m
Hélices propulsión	2 Kamewas de paso variable y giro interior
Hélices de proa	2 Lips de paso variable. 750 kW
Timones	2 Timones semicompensados
Motores Principales	2 motores SEMT Pielstrick 16PC2, 6V400
Potencia Motores Principales	7920 kW (x2)
Régimen de giro Motores Principales	520 rpm
Motores Auxiliares	3 motores CREPELLE 6SN3L-750 rpm
Potencia Motores Auxiliares	1.060 kW (x3)

En el buque hay disponibles dos tipos de combustible: Fuel oil para los motores principales y marine diésel oil para los motores auxiliares, motor de emergencia y las calderas.

Actualmente las rutas que pueda llevar a cabo este buque se englobarán por el área del mar mediterráneo.

1.3.1 COMBUSTIBLES MARINOS

Los combustibles marinos proceden del refinamiento del petróleo, siendo una mezcla homogénea de hidrocarburos a la que se le añaden diferentes aditivos para mejorar su formulación. Este tipo de combustible es muy utilizado ya que su coste es muy reducido comparado con el resto de destilados.

El fuel oil lo podemos clasificar como un subproducto residual o destilado del petróleo y sus características son las siguientes:

Characteristic	Limit	Residual								Distillate			
		RMA 10	RMB 30	RMD 80	RME 180	RMG			RMK		DMA	DMB	
		180	380	500	700	380,0	500,0	700,0	380,0	500,0	700,0		
Kinematic viscosity, mm ² /sb	min.												2,0
- at 40 °C	max.												6,0
- at 50 °C	max.												11,0
Density at 15°C, kg/m ³	max.	10,0	30,0	80,0	180,0	380,0	500,0	700,0	380,0	500,0	700,0		
CCAI	max.	920,0	960,0	975,0		991,0			1010,0			890,0	900,0
	max.	850		860				870					
Cetane index	min.												40
Sulphur, % (m/m)	max.	Statutory requirements										1,50	2,00
Flash point, °C	min.					60							60
Hydrogen sulfide, mg/kg	max.					2,0							2,0
Acid number, mg KOH/g	max.					2,5							0,5
Total sediment aged, % (m/m)	max.					0,10							
Total sediment hot filtration, % (m/m)	max.												-
Oxidation stability, g/m ³	max.												25
Carbon residue, % (m/m)	max.	2,5	10	14	15		18		20				-
- 10% volume distillation	max.												0,30
Four point (upper), °C													-
- winter quality	max.	0					30						-6
- summer quality	max.	6					30						0
Water, % (V/V)	max.	0,3					0,5						-
Ash, % (m/m)	max.	0,04		0,07			0,10		0,15				0,01
Vanadium, mg/kg	max.	50		150			350		450				
Sodium, mg/kg	max.	50	100	-	50			100					
Aluminium plus silicon, mg/kg	max.	25	40	-	50			60					
Lubricity, corrected wsd 1,4 @ 60°C	max.												520
Used lubricating oil (ULO), mg/kg		Fuel shall be free of ULO. Fuel is considered to contain ULO when either:											
- Calcium and Zinc	-	Calcium > 30 and Zinc > 15; OR											
- Calcium and Phosphorus	-	Calcium > 30 and Phosphorus > 15											

Imagen 1: Características combustible. Fuente: Bunkerworld, (2019).

Los combustibles más utilizados en la industria del transporte marino son los combustibles intermedios IFO 180 e IFO 380, en donde el número nos indica la viscosidad máxima en centistokes (cSt) a 50°C.

Nos vamos a centrar en el combustible utilizado en el buque del estudio el cual es un fuel oil ligero denominado por la empresa suministradora, Cepsa Marina, como IFO 180 1,0%S. Actualmente el límite máximo de azufre que puede contener un combustible es de 3,5 % según el Anexo VI de MARPOL, aunque esto cambiará a partir del uno de enero del 2020, cuando el límite máximo podrá ser fijado en 0,5 %.

El Gas oil es un combustible también refinado pero que procede de un destilado más puro que el Fuel oil. El "Marine diésel oil" es el utilizado en el buque. El gas oil convencional y el usado como combustible marino se diferencian en que, por norma general, este último tiene los valores de viscosidad, densidad y contenido en azufre mayores al primero.

1.4 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

En este trabajo analizaremos las tecnologías y las medidas que podemos utilizar para llevar a cabo las reducciones de emisiones contaminantes reguladas en el anexo VI del convenio MARPOL.

Esta adaptación supone una gran inversión por parte de los armadores y se debe tener en cuenta que no existe una única solución para poder atajar el problema de las emisiones. Tenemos sistemas con los que podremos combatir uno o varios tipos de emisiones, aunque podrían incrementar otro tipo de componentes también perjudiciales.

1.5 RELEVANCIA

La investigación sobre las diferentes medidas que se pueden tomar para reducir la contaminación es importante para determinar cuál sería la adecuada para cumplir la normativa impuesta por la OMI a través del convenio Marpol.

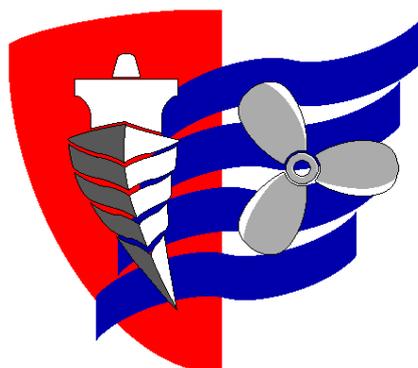
Nos centraremos en el más adecuado para el buque mencionado anteriormente, aunque sería válido para poder aplicarlo en cualquier otro buque que utilizase el mismo combustible y navegase por las mismas aguas.

Ya que existen diferentes tipos de sistemas para conseguir las mismas prestaciones, tendremos en cuenta la opción más rentable para poder mantener el buque.

Este estudio es importante para el armador del buque ya que además de realizar un estudio de la normativa y nombrar las soluciones existentes para reducir contaminación atmosférica debida a los gases de escape de los motores, dará con la solución más ventajosa para el buque concreto objeto de estudio.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MEMORIA DESCRIPTIVA

2 MEMORIA DESCRIPTIVA

Este trabajo pretende buscar y analizar los diferentes sistemas que existen en la actualidad para poder reducir las emisiones tanto de NO_x como de SO_x. Dentro de estas opciones elegiremos cual es el sistema o sistemas más adecuados para el buque en estudio, tanto por la normativa que tiene que cumplir como por el gasto económico que puede suponer.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a los cambios inminentes que se van a producir sobre las restricciones en las emisiones de gases de escape tanto a nivel mundial como en zonas ECA, se prevé la necesidad de llevar a cabo ciertos cambios en las instalaciones del buque para poder adecuarlo a esa legislación.

La OMI (Organización Marítima Internacional) es un organismo que se encarga de establecer unas normas a nivel mundial para regular la seguridad, la protección y el comportamiento ambiental en el transporte marítimo. Esto hace que los armadores no puedan recortar en estos sectores para mejorar sus finanzas. Fue fundada en 1984 durante una conferencia internacional en Ginebra donde se adoptó un convenio creando formalmente la organización.

Las normas y medidas de esta organización están muy fijadas en la toma de decisiones dentro del sector marítimo, ya que rigen las pautas a seguir tanto en el proyecto, construcción, equipos y funcionamiento de los buques hasta como debe de ser la formación de la gente de mar.

Una medida llevada a cabo por la OMI fue la elaboración de un convenio internacional para la prevención de la contaminación llamado MARPOL 73/78 que engloba la contaminación por hidrocarburos, sustancias químicas, aguas sucias, basuras y la contaminación a la atmósfera. Debido al incremento de emisiones contaminantes a la atmósfera se han desarrollado unas normas dentro del este convenio, concretamente el Anexo VI, que regula la prevención de la contaminación del aire por los buques y que entró

en vigor el 19 de mayo de 2005. Se centra en el control de los límites permitidos y la reducción progresiva de óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y materia particulada, aunque estas últimas no se cuantifican.

Este control es a nivel mundial, pero existen unas zonas que son más restrictivas llamadas ECA_S (zona de control de emisiones) donde las restricciones impuestas se cumplen desde hace unos años.

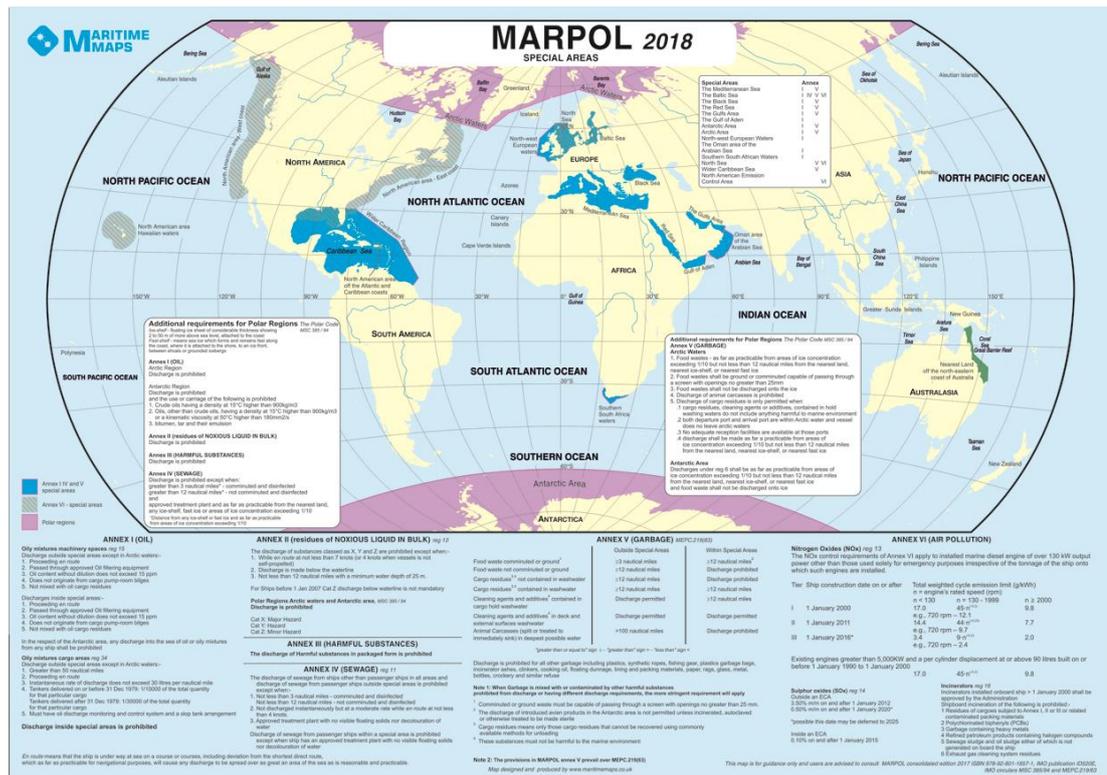


Imagen 2: Áreas especiales MARPOL. Fuente: Maritime maps, (2019)

Para poder designar a un área como zona ECA es necesario que dos estados miembros estén interesados en que sea establecido como zona especial. La propuesta tiene que incluir un estudio sobre las emisiones generadas por los buques que operan en la zona y su impacto sobre la salud y el medio ambiente.

2.2 HERRAMIENTAS DE RESOLUCIÓN

2.2.1 ANEXO VI DEL MARPOL

El anexo VI contiene las regulaciones internacionales de las emisiones producidas hacia la atmósfera por los gases contaminantes generados por la combustión. Se establece el ámbito de aplicación y los requisitos a tener en cuenta para ser objeto de estas medidas. Se dictan los modelos y las pautas para expedir certificados internacionales de prevención de la contaminación atmosférica, así como su duración y validez.

Las emisiones que están reguladas son las de óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) para contribuir a minimizar la contaminación y los problemas ambientales y de salud.

En cuanto a las sustancias que agotan la capa de ozono, están completamente prohibidas las instalaciones nuevas que contengan estas sustancias, salvo los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) aunque dejarán de estar permitidas el 1 de enero de 2020.

Los óxidos de nitrógeno se regularán para buques construidos a partir de enero del 2000 o que hayan sufrido una modificación importante a partir de esa misma fecha.

Se ha establecido un límite máximo de azufre de ámbito global de 4,5 % masa/masa para el combustible utilizado desde que se estableció el anexo al convenio, aunque la limitación va a cambiar a partir de Enero del 2020.

El convenio regula unas zonas de control de emisiones (ECA_S) donde la legislación es más restrictiva con las emisiones de SO_x . Según el apéndice 3 del anexo VI dichas zonas tienen que mostrar las siguientes características para poder ser designadas como tal:

1. Clara delimitación de la zona propuesta.
2. Descripción de las zonas, tanto marinas como terrestres, donde estas emisiones pueden tener efectos negativos.

3. Una evaluación que demuestre que los buques que naveguen por esa zona contribuyen a la contaminación por SO_x .
4. Información sobre las condiciones meteorológicas de la zona que puedan favorecer el aumento de la contaminación atmosférica o de los niveles de acidificación.
5. Naturaleza del tráfico marítimo, incluyendo características y densidad de dicho tráfico.
6. Descripción de las medidas de control adoptadas.

En cuanto a los COV las reglas son de exclusividad para los buques tanque, por lo que no nos afecta en nuestro estudio. El Anexo VI también recoge otras reglas sobre la incineración a bordo, instalaciones de recepción, calidad del fueloil y prescripciones aplicables a las plataformas y a las torres de perforación.

2.2.2 LEGISLACIÓN EUROPEA

Además de las regulaciones emitidas por la OMI, la unión europea también regula el nivel límite de azufre en los combustibles según la normativa UE 2012/33/EC que enmendó a la directiva UE 1999/32/EC. En toda la unión europea se han disminuido desde 3,5% hasta llegar a un 0,1% para todos los buques en los puertos de la UE.

Con estas medidas, dentro de la unión europea, se ha conseguido una reducción de más de la mitad de las concentraciones emitidas de SO_x desde el año 2015 hasta la actualidad, gracias en gran medida al apoyo financiero que ha realizado la unión europea para investigar y desarrollar tecnologías innovadoras (Artículo sector marítimo, Abril 2018).

La unión europea ha sido reconocida por la OMI en cuanto al buen hacer en la lucha por disminuir las emisiones.

En algunos países de la UE se restringe la descarga de agua procedente de torres de lavado de gases. Bélgica y Alemania son los países que han

prohibido la descarga en muchas áreas y otros países pueden seguir su ejemplo ya que no existe una práctica común dentro de la UE.

2.2.3 REGULACIÓN PARA LAS EMISIONES DE NO_x

En cuanto a las emisiones NO_x la OMI establece que el ámbito de aplicación debe ser para buques con motores cuya potencia sea superior a 130 kW instalados en buques construidos después de enero del 2020. Quedan excluidos los motores utilizados para casos de emergencia, así como para accionar sistemas de emergencia.

Existen tres niveles distintos para regular las emisiones que dependen del año de construcción y el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal).

Los dos primeros niveles son de aplicación mundial y el tercer nivel se aplica en las zonas ECA_s. Aunque para la construcción de nuevos buques deben cumplir con el nivel más restrictivo naveguen o no por las zonas de control de emisiones.

Tabla 2. Límites de emisiones NO_x. Fuente: OMI, (2019).

NIVEL	CONSTRUCCION BUQUE	EMISIÓN TOTAL PONDERADA (g/kWh)		
		<130 rpm	≥130 rpm – <2000 rpm	≥2000 rpm
I	Enero de 2000	17	45 x (rpm) ^(-0,2)	9,8
II	Enero de 2011	14,4	44 x (rpm) ^(-0,23)	7,7
III	Enero de 2016	3,4	9 x (rpm) ^(-0,2)	2,0

2.2.4 REGULACIÓN PARA LAS EMISIONES DE SO_x

La OMI ha establecido unos límites de emisiones generales y otros específicos. De manera global debemos cumplir con unos requisitos concretos, pero existen zonas especiales, las ECAs, en las cuales el control es más exhaustivo.

Como hemos comentado anteriormente los buques que naveguen por una zona ECA deberán utilizar combustibles con un máximo de azufre del 0,1%, o en su defecto, llevar instalado un sistema de limpieza de gases de escape para reducir las emisiones contaminantes hasta cumplir con la norma.

A niveles mundiales se tiene que reducir desde el 3,5% actual hasta el 0,5% a partir del 1 de enero de 2020.

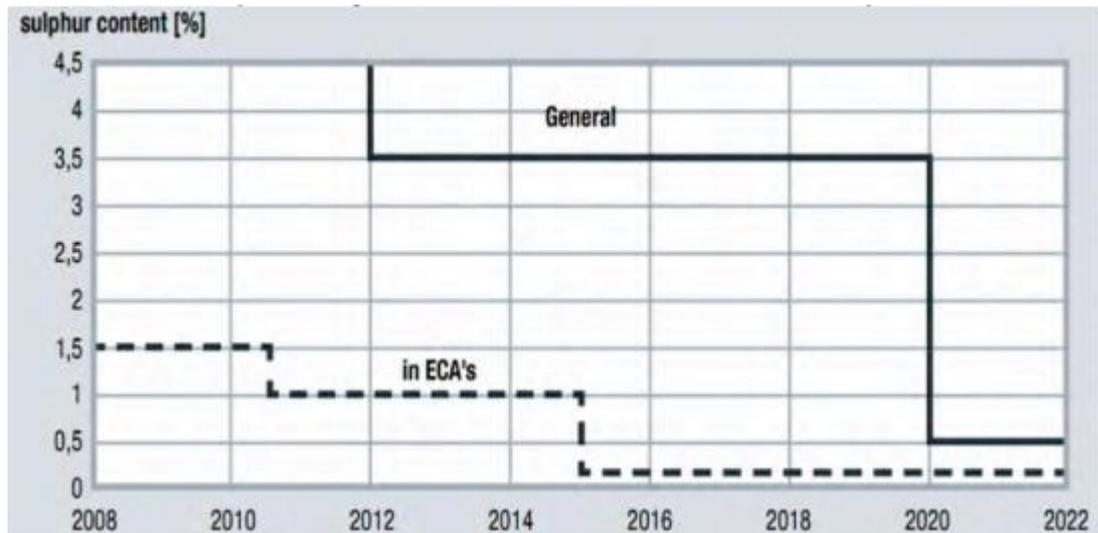


Imagen 3: Límites de emisiones SO_x. Fuente: OMI, (2019).

Todos los equipos de combustión interna que trabajen con combustible fósil, como pueden ser, motores principales, motores auxiliares y calderas, están sometidos a controles de emisiones tanto en las zonas de control como fuera de ellas. Esto hace que tengan que utilizar combustibles con el contenido de azufre correcto para cumplir la norma de las aguas por las que naveguen.

Para verificar el cumplimiento de las regulaciones se están probando sensores remotos instalados en aviones, en puentes o entradas a puertos. Estos sensores nos pueden determinar el tipo de combustible que se está

utilizando en el momento que los gases de escape del buque pasan por él. Con esto simplemente identificarían a los buques que deben pasar una inspección por parte del CERP (Control del estado rector de puerto), por lo tanto no reemplazará el muestreo de combustibles a bordo.

Los costos del incumplimiento de estas medidas se han dejado que se regulen por cada CERP a nivel mundial ya que las capacidades varían significativamente dependiendo del territorio.

2.2.5 REGULACIÓN PARA LAS EMISIONES DE CO₂

Todo combustible fósil va a originar en su combustión dióxido de carbono por su composición, por tanto para reducir las emisiones la solución a tomar es la de consumir menos combustibles fósiles.

La OMI ha adoptado una serie de medidas en Noviembre de 2011 para poder reducir significativamente las emisiones de CO₂ generadas por el transporte marítimo a nivel global. Se trata de unas medidas técnicas y operacionales obligatorias en materia de eficiencia energética. Estas medidas son el índice de eficiencia energética de diseño (EEDI), de obligatorio cumplimiento para buques nuevos que tienen que conseguir ser un 30% más eficientes que las construcciones anteriores. Y el plan de gestión de eficiencia energética del buque (SEEMP), donde se contempla la optimización de la velocidad, la navegación y el mantenimiento del casco, entre otras cosas (Artículo sector marítimo, Diciembre 2011).

Todas estas medidas no están prescritas, por lo tanto deja libertad para poder decidir cuáles serán las medidas más apropiadas para cada tipo de buque a los ingenieros y constructores para llegar al nivel de eficiencia requerida.

2.3 METODOLOGÍA

Vamos a exponer los medios que tienen al alcance los armadores para poder cumplir con la normativa y poder seguir sacando rentabilidad a sus

buques. Esto será importante para buques antiguos que no fueron contruidos en base a la nueva normativa, ya que podremos adaptarlos para conseguir los nuevos propósitos.

Tendremos en cuenta el tipo y características del buque, el tipo del motores, zonas y rutas donde operan, y vida útil del buque.

2.3.1 MÉTODOS DE REDUCCIÓN

Existen dos tipos de soluciones, clasificadas en soluciones primarias y soluciones secundarias.

Las soluciones primarias son las que actúan directamente sobre la combustión producida en el motor. De esta manera se impiden las formaciones de las sustancias contaminantes.

Las soluciones secundarias son las que actúan a posteriori, es decir, una vez formada la sustancia contaminante en la combustión será tratada para reducirla o eliminarla de manera que podamos cumplir con la legislación.

2.3.2 SISTEMAS DE REDUCCIÓN NO_x

Desde enero de 2000 se vienen controlando las emisiones de NO_x producidas por los motores de los buques a nivel mundial. Como se explica anteriormente, desde esa fecha se han ido estableciendo unos niveles para ir reduciendo paulatinamente las emisiones. Actualmente nos encontramos ya en el nivel más elevado (Tier III) donde se explica, en función de las revoluciones por minuto del motor, cual es la cantidad máxima permitida en gramos por kW generado en una hora. Estas medidas solo son aplicables para las zonas designadas como ECA (Zona especial de control de emisiones).

Los fabricantes de motores han ideado numerosas soluciones para facilitar el cambio a los armadores los cuales los podemos clasificar según su aplicación.

2.3.2.1 Sistemas primarios:

Dentro de este grupo nos encontramos con diferentes sistemas como son la inyección directa de agua, los sistemas de humidificación, sistemas de emulsión del combustible con agua y sistemas de recirculación de gases de escape.

a) Inyección directa de agua o DWI.

Uno de los métodos para reducir los NO_x es la inyección de agua dentro de la cámara de combustión la cual hace reducir la temperatura y por tanto reduce este tipo de emisiones.

Se trata de un sistema de inyección a parte del de combustible. Por lo tanto, como es independiente, la inyección de agua se realiza en el momento que se considere más adecuado. Esto puede ser en la etapa de compresión o bien en el momento de la inyección del combustible. Este sistema funciona bajo control electrónico y puede ser activada o desactivada sin afectar el comportamiento del motor.

Para poder utilizar este sistema es necesario tener una gran capacidad para generar y almacenar agua destilada. El agua es alimentada a alta presión, entre 200 y 400 bar, dependiendo del tipo del motor. Para generar esta presión se dispone de un módulo que va equipado con una bomba de alta presión y otra de baja con la que nos aseguramos que haya un flujo de agua suficiente para alimentar a la primera.

Wetpac DWI installation – W46

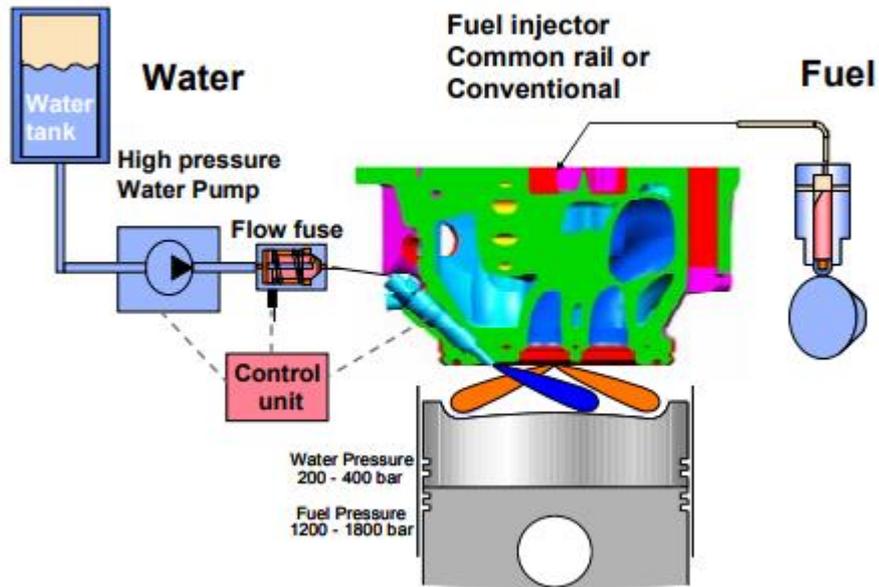


Imagen 4: Esquema inyección directa de agua. Fuente: Wärtsilä, (2019)

Según los estudios de Wärtsilä los beneficios con este sistema son los siguientes:

- ✓ Las emisiones de NO_x pueden ser reducidas en un 50%-60%, siendo esta reducción es más eficiente a partir de un 40% de la carga del motor.
- ✓ Las emisiones típicas al usar como combustible MDO son 4-6 g/kWh y si se utiliza Fuel oil entre 5-7 g/kWh.
- ✓ El motor puede ser operado sin inyección de agua.
- ✓ Se puede cambiar de modo de operación en cualquier régimen de carga del motor.
- ✓ Si existe alguna alarma en el sistema el motor cambiara automáticamente para operar sin inyección de agua.
- ✓ Los componentes requeridos para realizar la instalación son minimos por lo que es fácil instalarlos en cualquier sitio.
- ✓ Los costos de inversión y operacionales son bajos.

- ✓ Normalmente la relación entre el agua inyectada y el combustible es de 0,4 a 0,7
- ✓ La instalación se puede realizar mientras el barco se encuentra operando.

Y las limitaciones del sistema son:

- No se puede sacar el máximo rendimiento a bajas cargas del motor.
- Se incrementa el consumo de combustible.
- La necesidad de tener gran cantidad de agua destilada.

b) Sistemas de humidificación.

Existen tres tipos de sistemas: el motor de aire húmedo (HAM), el sistema de humidificación de aire de barrido (SAM) y el sistema Wetpac H.

El primer sistema, HAM, utiliza el aire caliente procedente del turbocompresor enriquecido con agua de mar evaporada para poder así reducir la temperatura durante el proceso de combustión y reducir las emisiones de NO_x .

Este sistema sustituye el intercambiador de aire de un motor convencional y lo sustituye por los siguientes componentes:

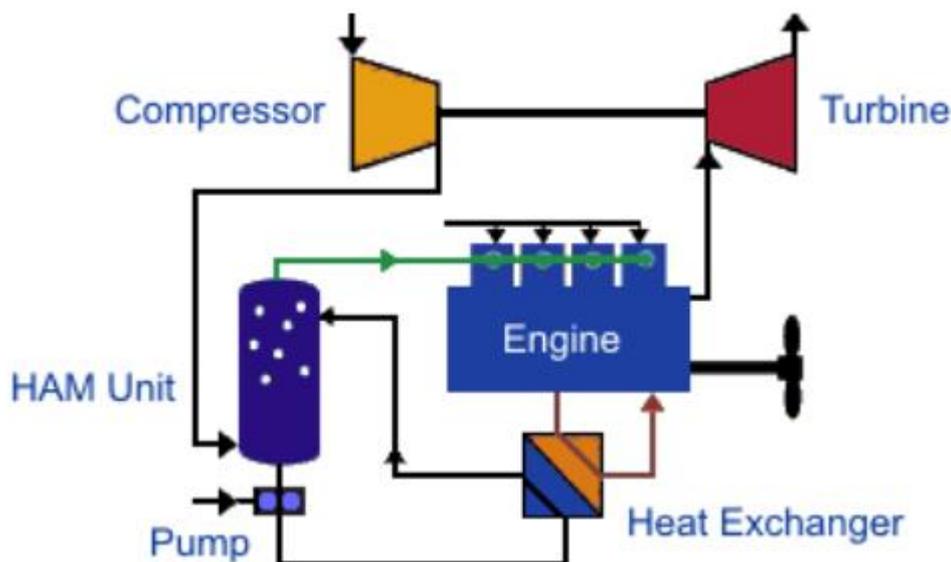


Imagen 5: Sistema HAM. Fuente: US environmental, (2019).

El agua de mar es bombeado hacia el intercambiador de calor para aumentar un poco su temperatura antes de ir a la unidad de humidificación. Aquí se pulveriza sobre el aire comprimido procedente del turbocompresor. Esto hace que el aire se sature, ya que el calor del aire hace que el agua de mar se evapore y además disminuye la temperatura de la mezcla. Se debe tener precaución y desconectar la entrada de agua salada en la unidad de pulverización unos minutos antes para asegurarnos que no quedan posibles restos de agua salada que pudieran corroer la unidad.

Este sistema reduce las emisiones de NO_x en un 70%-80% con cargas de operaciones normales.

El segundo sistema, SAM, se basa en el mismo principio pero la instalación es diferente y está diseñado por MAN B&W

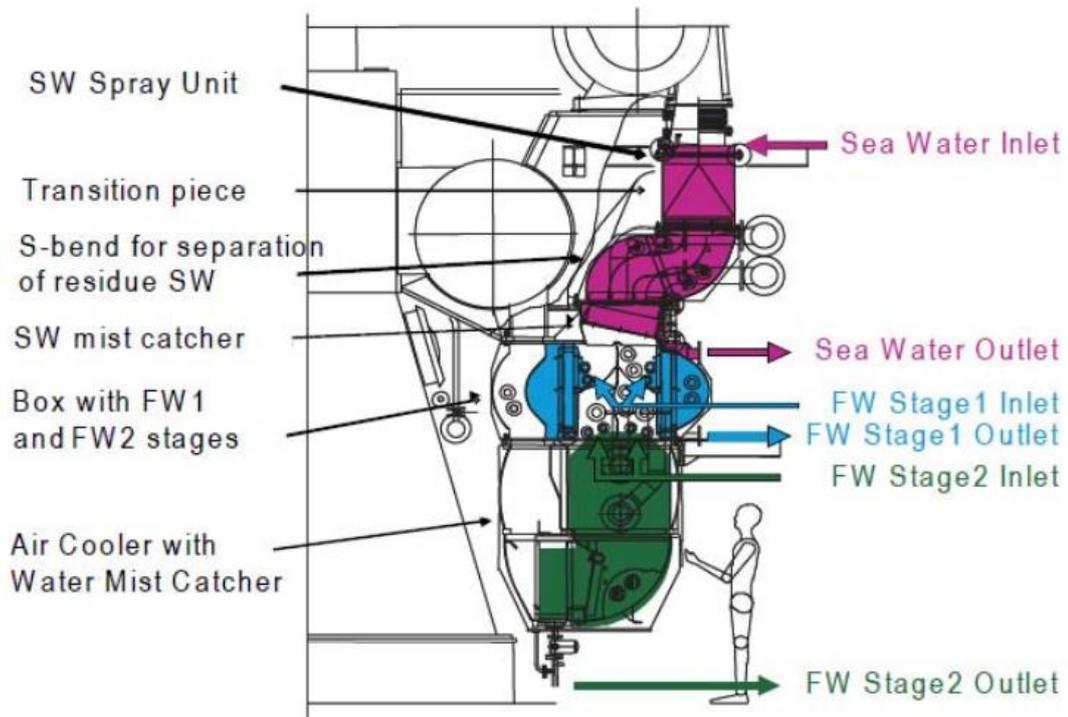


Imagen 6: Sistema SAM. Fuente: US environmental, (2019)

El tercer tipo ha sido desarrollado por Wärtsilä. Como ha pasado con el anterior, este también lleva el mismo principio de funcionamiento que el primero. La reducción que podemos conseguir con este sistema es del 50% y el consumo de agua es el doble del consumo de fuel oil.

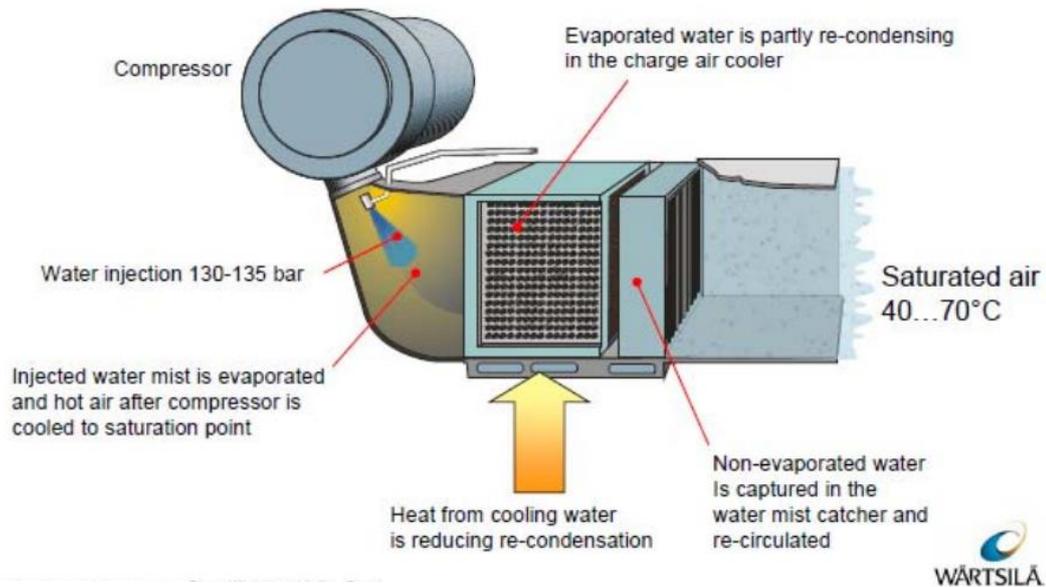


Imagen 7: Sistema Wetpac H. Fuente: US environmental, (2019).

c) Emulsión de agua.

Este es otro método con el cual introducimos agua dentro de la cámara de combustión emulsionándolo con el combustible.

Para poder mantener las características del motor referentes a la entrega de potencia en los diferentes puntos de carga, los inyectores deben ser modificados para poder asumir el aumento de volumen que debe inyectarse al llevar el combustible el agua adicionada. Y para poder adaptarse a este cambio, normalmente, se modifica el diseño de la tobera.

Puede ir montado en sistemas de inyección mecánicos o electrónicos. En los sistemas electrónicos las ventajas frente a los de inyección mecánica son mayores, ya que el ratio óptimo de inyección puede ser logrado con o sin contenido de agua y también permite el uso de grandes cantidades de agua aunque el motor se encuentre a baja carga.

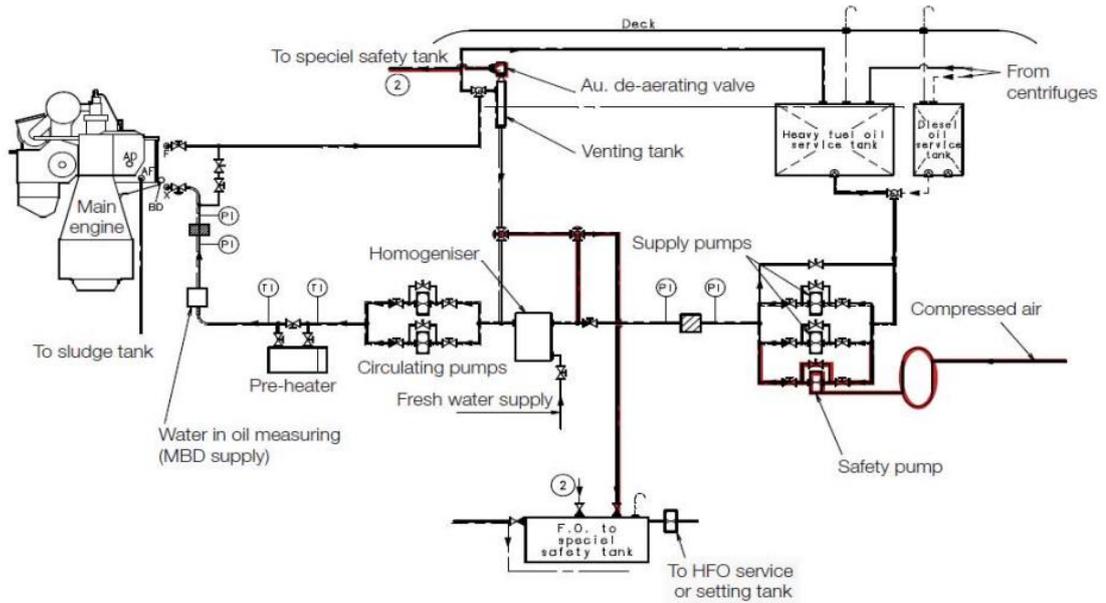


Imagen 8: Emulsión de agua. Fuente: US environmental, (2019).

Se requiere un conjunto de modificaciones que van desde la bomba de combustible, el árbol de levas y el sistema de control. Es necesario instalar un sistema que mantenga la mezcla presurizada para evitar la ebullición y la cavitación antes de pasar a la bomba de alta, necesita de un sistema de dosificación de agua y un tanque para homogeneizar la mezcla. Para poder trabajar con la misma viscosidad que si no tuviera agua la temperatura debe ser 20°C mayor y la presión del combustible debe ser mayor para evitar que el agua pueda comenzar a hervir.

Añadiendo un 10% de agua a la mezcla se puede conseguir una reducción de las emisiones de NO_x del 10%, aunque podemos llegar a conseguir una reducción del 50%.

d) Recirculación de gases de escape (EGR)

Se trata de aprovechar una parte de los gases de escape para volverlos a utilizar como aire de admisión. Los gases de escape pasan por una etapa de enfriamiento y de limpieza antes de ser introducidos en la cámara de combustión. Esta reutilización hace que la concentración de oxígeno en la mezcla sea menor y que aumenten la relación de gases inertes, haciendo que se reduzca la temperatura de combustión y la formación de NO_x.

El siguiente esquema nos muestra su principio de funcionamiento:

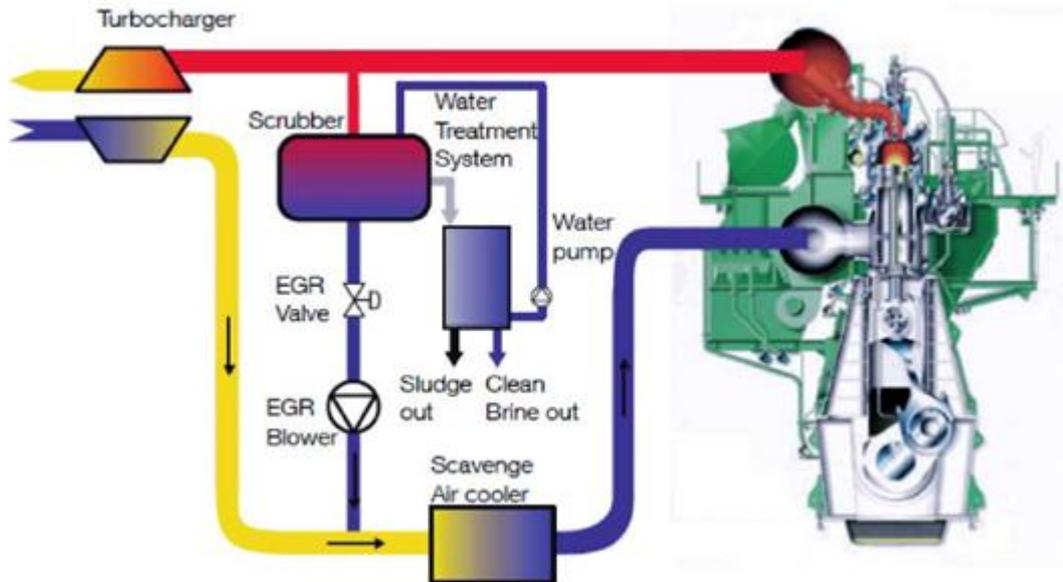


Imagen 9: Sistema EGR. Fuente: Máquinas de barcos, (2019)

Como podemos ver sus principales componentes son: depuradora de gases (Scrubber), sistema de tratamiento de agua, soplante (EGR Blower), enfriador y válvula EGR.

2.3.2.2 Sistemas secundarios:

a) Sistema de reducción catalítica:

Este sistema trata de reducir los NO_x a nitrógeno y agua realizando unas inyecciones de un reactivo, como puede ser amoniaco o urea, en los gases de escape antes del catalizador montado en el propio tubo de escape.

El catalizador suele estar fabricado con óxido de vanadio o de óxido de titanio. El catalizador no se consume con el paso del tiempo, pero si puede perder eficiencia por las impurezas que pueden quedar adheridas. Siempre van a ser mayores si el combustible es un HFO que un MDO.

El rango de temperaturas de escape en las que se puede utilizar, sin peligro de provocar daños térmicos en el catalizador, es desde 210°C hasta 500°C .

Como podremos ver a continuación, los componentes principales del sistema SCR son los siguientes:

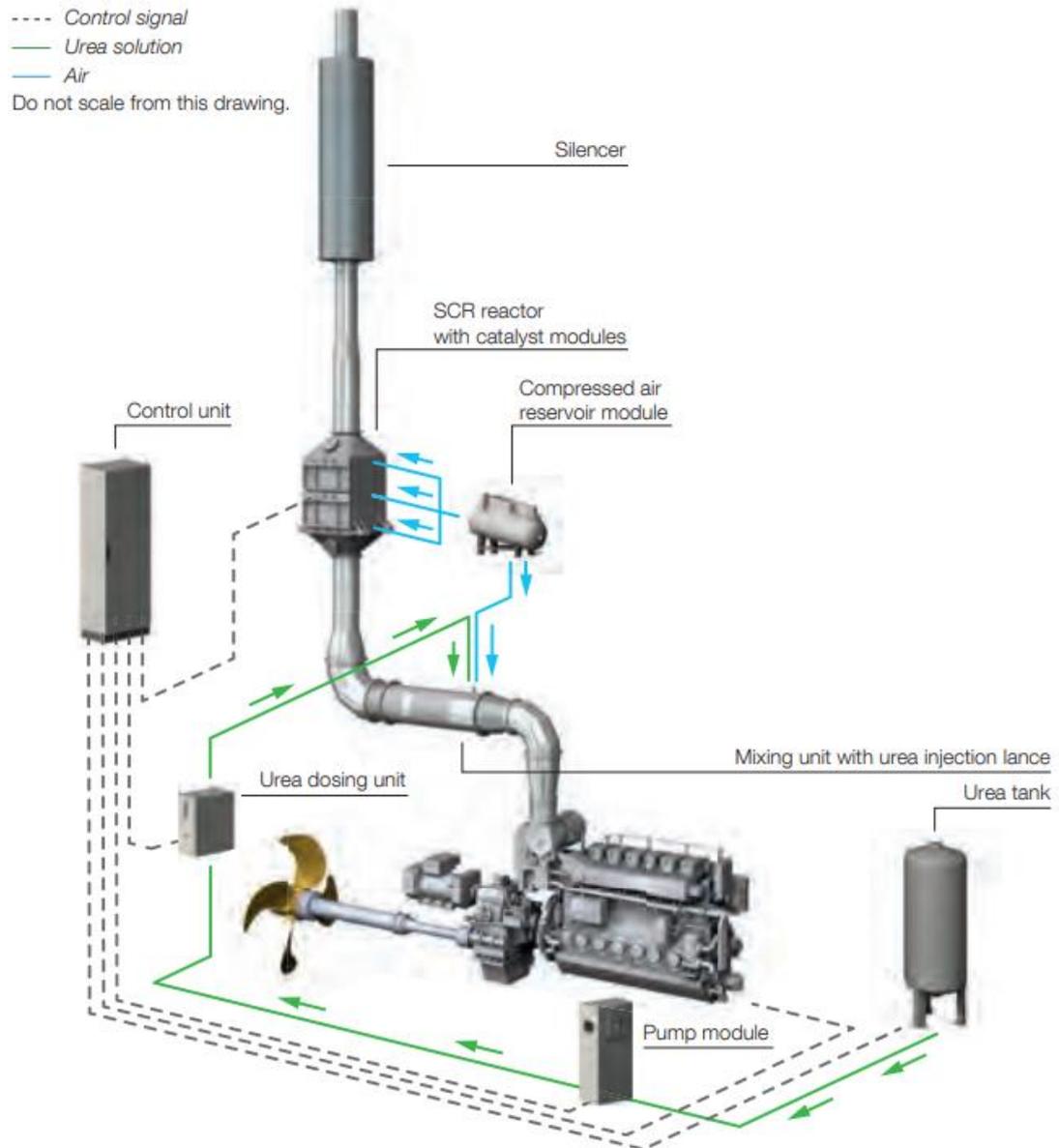


Imagen 10: Sistema SCR. Fuente: MAN Diesel & Turbo, (2019).

La bomba transfiere el reactivo desde el tanque hasta la unidad de dosificación, la cual es la encargada de regular la cantidad necesaria en función de la carga del motor y la humedad del aire ambiente. También controla el flujo de aire necesario en el inyector.

Con el sensor de humedad recogiendo datos para que la unidad de control establezca cual es la cantidad adecuada a inyectar, nos aseguramos de cumplir los límites establecidos por la OMI en su nivel actual (Tier 3) bajo todas las condiciones ambientales.

La solución de reactivo es inyectada a los gases de escape antes de entrar estos en el reactor, donde en combinación con los catalizadores se produce la reducción de NO_x . Para poder mantener limpios los elementos catalizadores existe un equipo de soplado de hollín (2).

Estos sistemas pueden llegar a reducir las emisiones de NO_x en más de un 90%, eso sí, es preferible que el combustible contenga una baja proporción de azufre. En la combustión se pueden crear altas emisiones de SO_x y puede impedir que los materiales del catalizador no funcionen de manera efectiva, además al reaccionar con el oxígeno se puede formar ácido sulfúrico que puede corroer el sistema SCR.

2.3.3 SISTEMAS DE REDUCCIÓN SO_x

Para poder combatir la emisión de SO_x después de la combustión podemos utilizar los siguientes métodos: combustibles con bajo contenido en azufre, combustibles alternativos o sistemas de limpieza de gases de escape.

Los sistemas de limpieza de gases de escape, llamados Scrubber, constan de un depurador instalado en el conducto de escape, donde se tratan los gases con diferentes sustancias con el fin de reducir la mayor cantidad posible de SO_x y materia particulada, así como una pequeña proporción de NO_x .

Existen diferentes tipos de Scrubbers, tenemos los secos y los húmedos. Dentro de los húmedos se distinguen en regenerativo o abierto, no regenerativo o cerrado e híbrido.

2.3.3.1 Scrubber de tipo seco.

Este tipo no utiliza ninguna inyección líquida para poder depurar los gases de escape que lo atraviesan. Su funcionamiento básico es hacer pasar a los gases de escape por un reactor lleno de hidróxido de calcio granulado.

No es un sistema que se suela instalar en los buques, aunque últimamente se está teniendo en cuenta. Aunque requiere de un gran espacio para la instalación existe una ventaja clara al no refrigerar los gases de escape. Con

este sistema podemos también utilizar economizadores de gases de escape para producir vapor y además podemos instalar conjuntamente catalizadores reductivos selectivos (SCR) y así disminuir también las emisiones de NO_x . Con este sistema podemos eliminar hasta el 99% de las emisiones de SO_x . Como el reactivo se presenta en forma granulada es más sencilla su manipulación y posterior reciclaje y así no es posible la transmisión de contaminantes al mar.

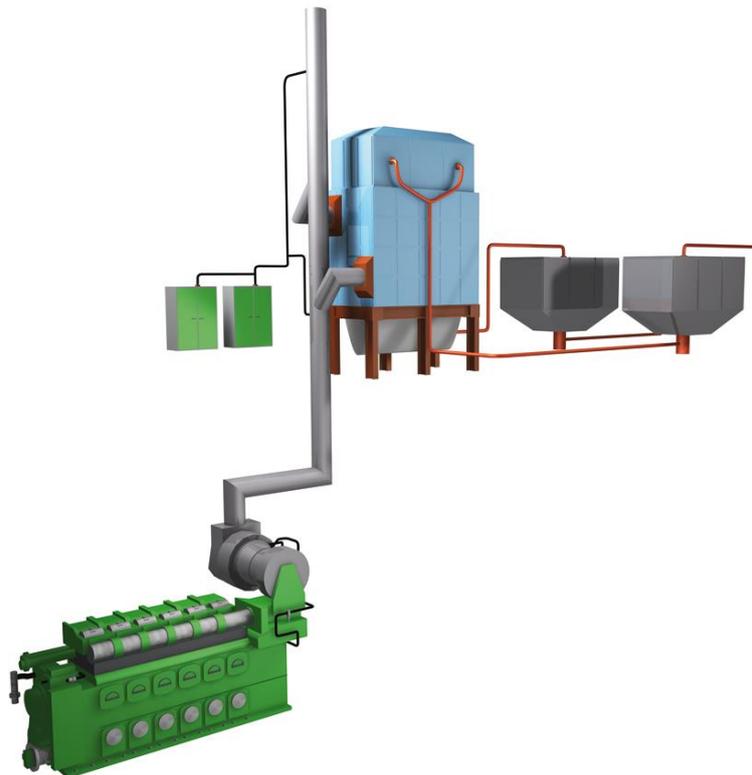


Imagen 11: Scrubber seco. Fuente Maritime propulsión, (2019).

El hidróxido de calcio (CaO_2H_2), comúnmente llamada cal hidratada, reacciona con las emisiones de SO_x creando sulfato de calcio sólido (CaSO_4). Este subproducto será tratado de acuerdo a las directrices impuestas por la OMI para poder deshacernos de ello.

2.3.3.2 Scrubber húmedo.

Esta tecnología está basada en la posibilidad de disolver los óxidos de azufre en el agua. Una vez disueltos forman ácidos fuertes que reaccionan con el agua de mar o con las sustancias añadidas, como pueden ser hidróxido de sodio, formando sulfato de sodio. Esta sal se disuelve en agua de mar no siendo contaminante ya que está presente de forma natural en el agua de mar. Las partículas en suspensión que arrastren los gases de escape serán también atrapadas por el agua de lavado formando lodos que serán tratados para su descarga.

Como hemos mencionado anteriormente los Scrubbers pueden ser cerrados o abiertos. Esto significa que pueden ser regenerativos o no regenerativos, ya que de esto va a depender que el producto que se genere en el proceso pueda ser reutilizado o disuelto para poder desecharlo al mar, o por el contrario, sea necesario almacenarlo para poder ser eliminado correctamente.

a) Scrubber de circuito abierto:

Este limpiador de gases de escape está diseñado para que con la propia alcalinidad del agua de mar sean neutralizados los óxidos de azufre producidos en los gases de escape a tratar. Al tratarse de un circuito abierto el agua de mar que se utiliza para hacer la limpieza es devuelto nuevamente al mar, es decir, no se recircula y no requiere de más productos químicos.

Esta solución es efectiva siempre y cuando se navegue por zonas de alta alcalinidad, igual o superior a 2000 $\mu\text{mol} / \text{l}$.

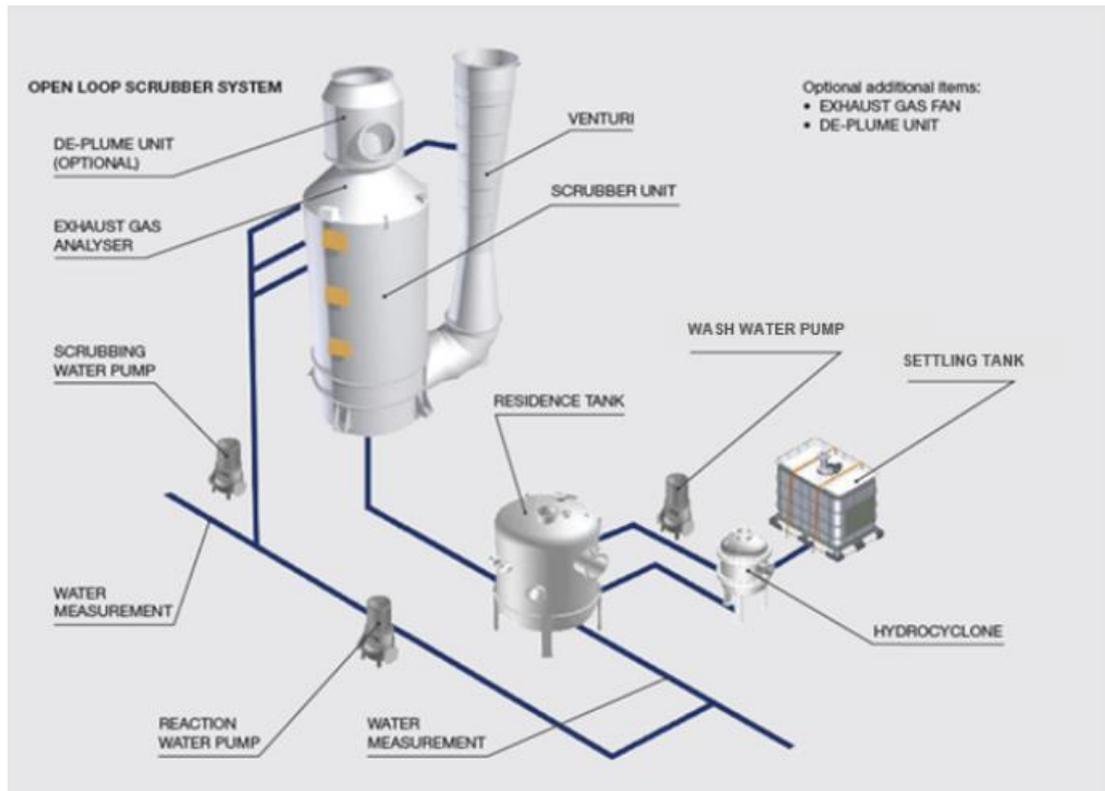


Imagen 12: Instalación Scrubber abierto. Fuente: Wärtsilä, (2019).

b) Scrubber de circuito cerrado:

En un circuito cerrado, como su nombre indica, el agua para el tratamiento de los gases de escape no es desechada en cada limpieza y se mantiene independiente al sistema de agua salada del buque. Esta agua se va tratando para eliminar y almacenar los lodos generados, por tanto se eliminará una pequeña parte o ninguna dependiendo del funcionamiento del sistema instalado.

Estos circuitos funcionan con agua de mar o agua dulce tratada. El tratamiento que se le da es la adición de hidróxido de sodio alcalino para que reaccione con los óxidos de azufre y poder así neutralizarlos.

Según diferentes fabricantes este tipo de scrubber necesita menos cantidad de agua para realizar el tratamiento que los de tipo abierto para conseguir los mismos resultados. Esto se produce por la posibilidad de ir añadiendo más reactivo al tener constantemente monitorizado el valor de la alcalinidad.

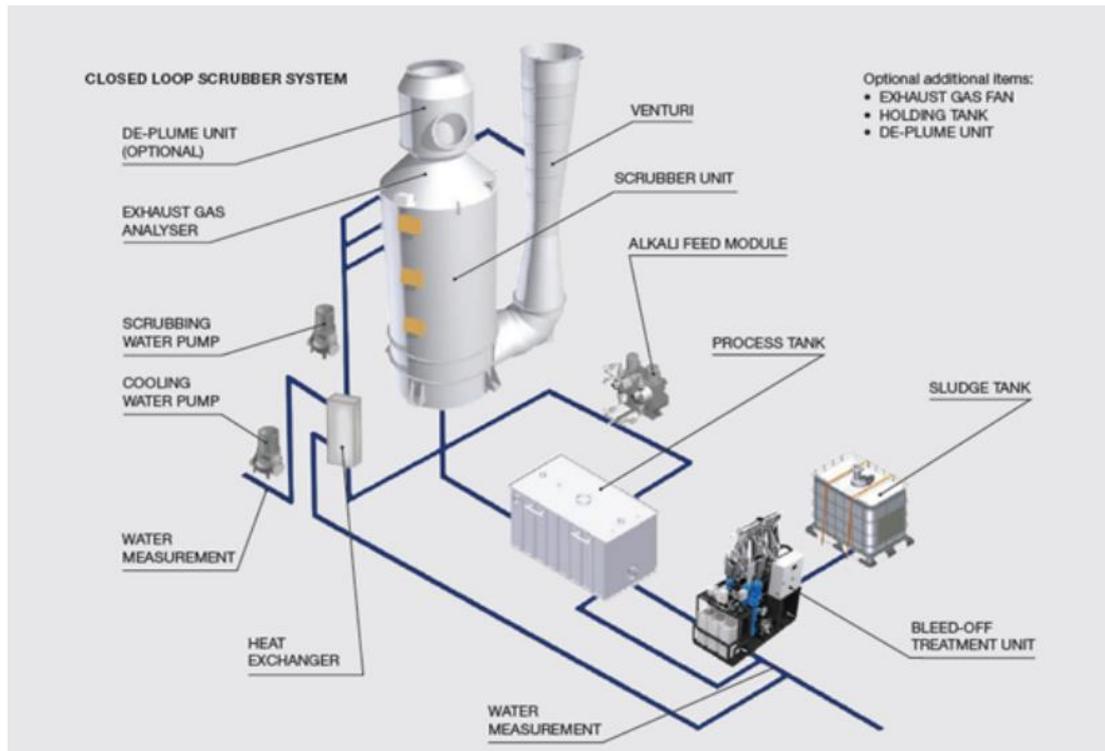


Imagen 13: Instalación Scrubber cerrado. Fuente: Wärtsilä, (2019).

c) Scrubber de circuito híbrido:

Este sistema es utilizado para poder funcionar tanto en circuito abierto como en circuito cerrado. Cuando la alcalinidad propia del agua de mar sea elevada el sistema estará funcionando como circuito abierto, pero cuando se atraviesen zonas con menos alcalinidad el sistema pasará a ser uno de circuito cerrado. En este último caso será necesaria la adición de hidróxido de sodio para aumentar la alcalinidad y que el sistema siga trabajando en óptimas condiciones.

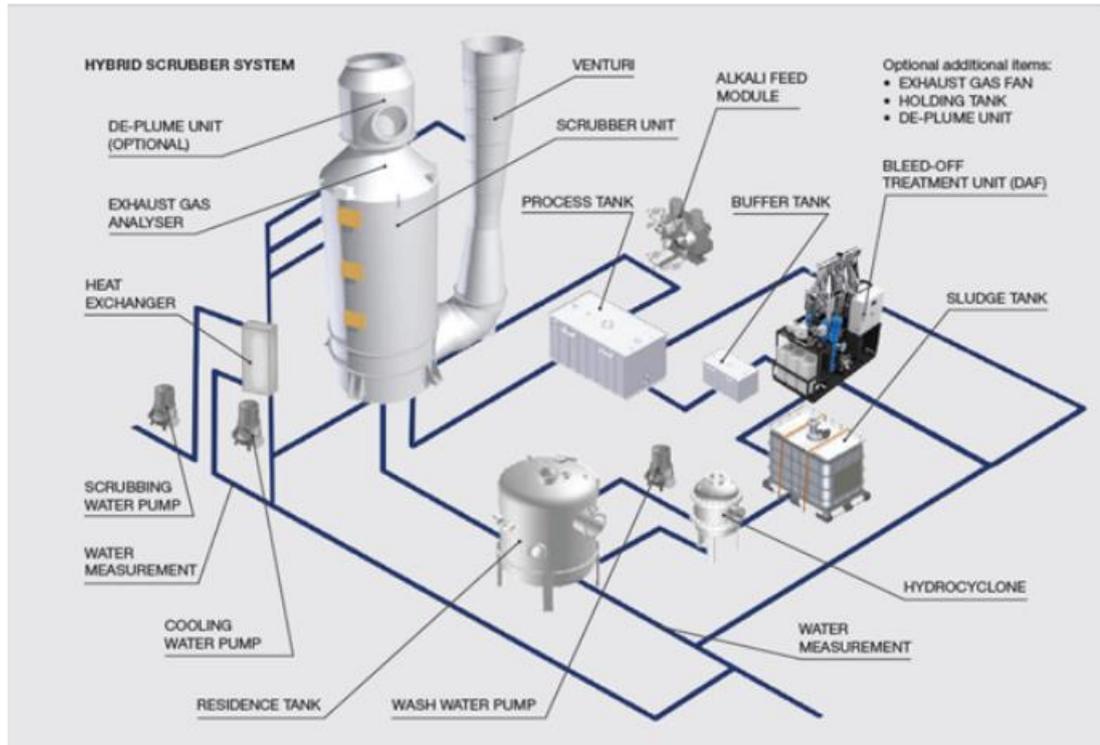
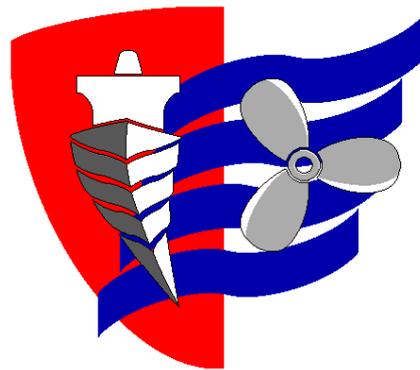


Imagen 14: Instalación Scrubber hibrido. Fuente: Wärtsilä, (2019).

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



APLICACIÓN PRÁCTICA

3 APLICACIÓN PRÁCTICA

Según recoge un medio especializado en información marítima, portuaria y logística (El Estrecho Digital, 2019), tanto la OMI como Francia están intentando conseguir que el mar Mediterráneo forme parte de las zonas de control de emisiones como ya ocurre en otras costas de la unión europea como son el mar báltico, el mar del Norte y el Canal de la Mancha.

Esto puede suponer un cambio aún mayor en cuanto a las restricciones del 0,5 % de contenido de azufre en los combustibles a nivel mundial que se va a implantar en enero del 2020. Si se declara zona ECA el porcentaje de azufre contenido en el combustible tiene que ser de 0,1 % como máximo.

Las regulaciones para las emisiones de NO_x solo se dan para buques de nueva construcción o con una modificación significativa en los motores. Por lo que no aplicaría esta normativa a nuestro buque en estudio.

En cuanto a las emisiones de SO_x no existe una única solución para todos los buques, ya que depende en gran medida del tipo de buque, el tamaño, los patrones operativos y los combustibles disponibles a corto y largo plazo.

Las operaciones que requieran de nuevas instalaciones hay que tener en cuenta la complejidad de la instalación y la vida útil del buque ya que no siempre vamos a poder amortizar ese gasto de manera productiva.

3.1 MEDIDAS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas que podríamos aplicar al buque en estudio para cumplir con la nueva legislación pueden ser los siguientes:

- Cambio de fuel oil con alto contenido en azufre a gasoil marino o destilados.
- Uso de fuel oil con muy bajo contenido en azufre o mezclas de combustible compatibles (0.5% de azufre)
- Remotorizar el buque para utilizar combustibles alternativos como el LNG (gas natural licuado) u otros combustibles sin azufre.

- Instalación de sistemas de limpieza de gases de escape (Scrubbers) que permiten operar con fuel oil intermedios.

Recientemente se ha determinado que los buques que tengan instalados las torres de lavado serán los únicos que puedan tener a bordo combustible con contenido en azufre más elevado que el que marca la OMI, a excepción de buques donde el fuel oil sea la carga transportada. Esta medida se ha tomado para facilitar a los puertos un control más sencillo, ya que es complicado saber si se ha utilizado o no. Además, así se evita que una vez el buque se encuentre en aguas internacionales incumplan la normativa vigente.

El cambio a combustibles destilados repercutirá de manera sustancial en el costo del propio combustible y además puede repercutir en la planta de tratamiento de combustible teniendo que hacer modificaciones para tratar el combustible que tiene unas características diferentes al actual.

La principal preocupación con el uso de MGO o destilados es la disponibilidad en los puertos y el costo más elevado. Las plantas de desulfuración son muy costosas por lo que las refinerías optarán por refinar combustibles en lugar de invertir en sistemas de desulfuración. Con la mezcla de combustibles para cumplir con el tope de 0,5% de azufre se pretende reducir el coste en un 10-15% en comparación a los destilados directamente según una publicación de DNV GL, (2018).

El GNL se espera que obtenga una posición más favorable como alternativa para el combustible marino, pero eso implica tener que cambiar los motores para que sean adecuados para este tipo de combustible. Con el uso de este combustible eliminaríamos las emisiones a la atmósfera de SO_x y MP, así como una reducción de hasta el 85% de los NO_x .

En cuanto a la selección del tipo de Scrubber (Anave, 2016) tenemos que tener en cuenta su perfil operativo y su ruta. Como ya hemos comentado anteriormente tenemos Scrubbers de circuito abierto, circuito cerrado y circuito híbrido. Los de circuito abierto son adecuados para buques que naveguen por zonas donde la alcalinidad del agua sea elevada. Si este

mismo buque tendría que navegar también por zonas con menor alcalinidad, como ríos o aguas salobres, sería más aconsejable utilizar Scrubbers de circuito híbrido. Además tenemos que tener en cuenta que existen puertos donde no se permite la descarga al mar de las aguas de lavado de un Scrubber aunque cumpla los requisitos MARPOL.

Las directrices de la OMI para los sistemas de limpieza de gases de escape, MEPC.259 (68), nos ofrecen dos posibilidades para la aprobación del sistema:

- Esquema A:
Aprobación, supervisión y certificación del sistema mediante parámetros y controles de emisión. Se verifica y certifica inicialmente haciendo revisiones periódicas posteriormente.
- Esquema B:
Aprobación, supervisión y certificación del sistema utilizando monitoreo continuo de las emisiones de SO_x . El rendimiento no es certificado en la instalación, si no que las emisiones se monitorean continuamente para demostrar que el sistema cumple las normas.

La mayoría de los sistemas instalados se rigen por el segundo esquema requiriendo mediciones continuas de SO_2 , las emisiones de CO_2 y la calidad del agua de lavado incluyendo pH, hidrocarburos poliaromáticos (PAH) y turbidez.

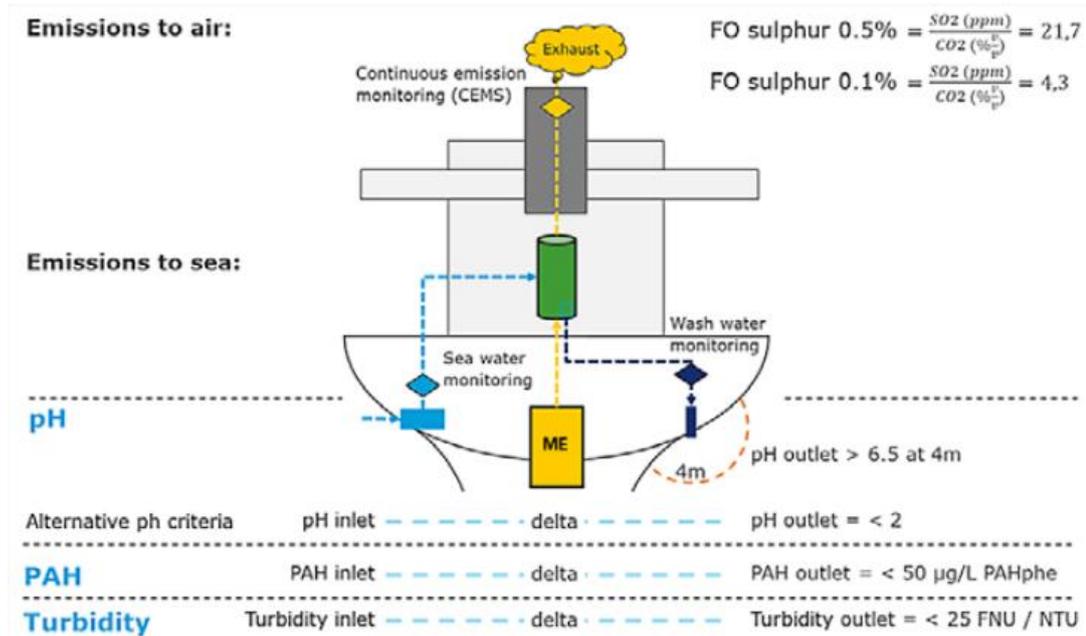


Imagen 15: Mediciones de emisiones. Fuente: DNV GL, (2018).

El azufre existente dentro de los combustibles reacciona en la combustión formando tanto dióxidos de azufre como trióxido de azufre, aunque solo se monitorean estos primeros ya que los segundos representan un porcentaje muy bajo. En cuanto a la reducción de materia particulada depende de la cantidad de azufre que lleve el combustible.

La OMI establece unos valores límite de pH para las aguas de descarga de una Scrubber, ya que esto afecta a los ecosistemas donde se realiza la descarga. El agua que descarguemos deberá tener un pH no inferior a 6,5 y si estamos durante la maniobra o en tránsito, la diferencia entre el pH de entrada y salida no puede ser mayor que 2 puntos. Estas medidas han sido impuestas así ya que el buque mientras se encuentra navegando genera una turbulencia en el agua que permite recuperar el pH normal del mar en poco tiempo.

Los hidrocarburos poliaromáticos pertenecen a un grupo de compuestos orgánicos compuestos de dos o más anillos constituidos por carbono e hidrógeno. Son compuestos muy volátiles y se distribuyen con facilidad por el aire, suelo y el agua. Además pueden acumularse en crustáceos y moluscos de consumo humano repercutiendo negativamente en la salud de

todos. Están presentes en el petróleo y en la combustión del combustible, generalmente, está presente en los inquemados. Los PAH de mayor peso molecular, que son menos solubles en el agua, se quedan en los sedimentos que hay en los puertos. En las maniobras estos sedimentos son removidos y pueden entrar en el sistema de agua de lavado, por eso la OMI requiere la medición de las cantidades a la entrada y a la salida.

Como las Scrubber son capaces de limpiar el 80% de la materia particulada debemos tener un sistema para depurar el agua de limpieza antes de ser vertida al mar.

Los Scrubbers los podemos elegir de una simple entrada o de múltiples entradas. Con la última opción podemos tratar las emisiones de varios motores a la vez, lo cual minimiza los elementos a instalar. Los de simple entrada van instalados en el silenciador, mientras que los de múltiples entradas se instala en el conducto de la chimenea.

3.2 ESTUDIO DE DIFERENTES CASAS COMERCIALES

Existen en el mercado diferentes empresas especializadas en investigación, diseño y fabricación de sistemas de limpieza de gases de escape. Muchas de ellas son miembros de una asociación llamada Asociación de Sistemas de Limpieza de Gases de Escape (EGCSA) donde todas participan del desarrollo de los sistemas, diseño y configuración final de la instalación, aprobación y aceptación del diseño de los sistemas para cumplir con las normativas vigentes o futuras dictadas por la OMI o autoridades nacionales.

La casa comercial Mikrotech, empresa China, tiene un gran número de patentes en el campo de la protección del medio ambiente y el ahorro de energía. Una de ellas es el sistema de limpieza de gases de escape MECOS.

Los parámetros generales, según el fabricante (EGCSA, 2019), en los que se mueve este sistema son los siguientes:

- + 98% de SO₂ eliminados.
- + 50% de las materias particuladas eliminadas.

- Consumo de 5-6 L x MWh x %S de sustancia alcalina.
- Consumo de 50 L/h x MWh x %S de agua.
- 2.5 kg/h x MWh de formación de lodos.
- La tasa de purgado es de $\approx 0.2 \text{ m}^3/\text{h}$
- Presión de retorno de 100mmWc (1000 Pa)
- La descarga de agua de lavado tiene un pH mayor a 6.5, una turbidez con una diferencia de 25 FNU(Unidad de formacina nefelométrica) y unos PAH de :

Tabla 3: Niveles de PAH. Fuente: EGCSA, (2019).

Volumen de agua utilizado en la Scrubber (t/MWh)	PAH (ug/L)
0-1	2250
2.5	900
5	450
11.25	200
22.5	100
45	50
90	25

La torre de limpieza puede ser del tipo U-type o I-type construidos con materiales diseñados para una vida larga en servicio como se pueden ver a continuación:

Tabla 4: Materiales de construcción. Fuente: EGCSA, (2019).

Material selection guide

Part of EGC scrubber	Operation condition	Material
Jet spary	Dry and wet zone Temperature: ~65°C PH: >5.5 CL-: ~20000ppm	254 SMO 1.4529
Bottom of jet spary	Wet zone Temperature: ~65°C PH: >5.5 CL-: ~20000ppm	Super duplex 2507
Bottom of absorber (including inernal)	Wet zone Temperature: <50°C PH: >4 CL-: <20000ppm	Super duplex 2507
Middle of absorber (including inernal)	Wet zone Temperature: <45°C PH: >6 CL-: <20000ppm	Duplex 2205
Top of absorber (including inernal)	Wet zone Temperature: <45°C PH: >7 CL-: <20000ppm	Duplex 2205

Los elementos internos utilizados por la Scrubber son de alta eficiencia, incluyendo las boquillas de baja presión. Los separadores de gotas de agua de lavado no obstruyen, reducen la caída de presión y reducen el peso. Tiene muy bajo coste de mantenimiento, alta fiabilidad y excelente eficiencia.

Scrubber internal

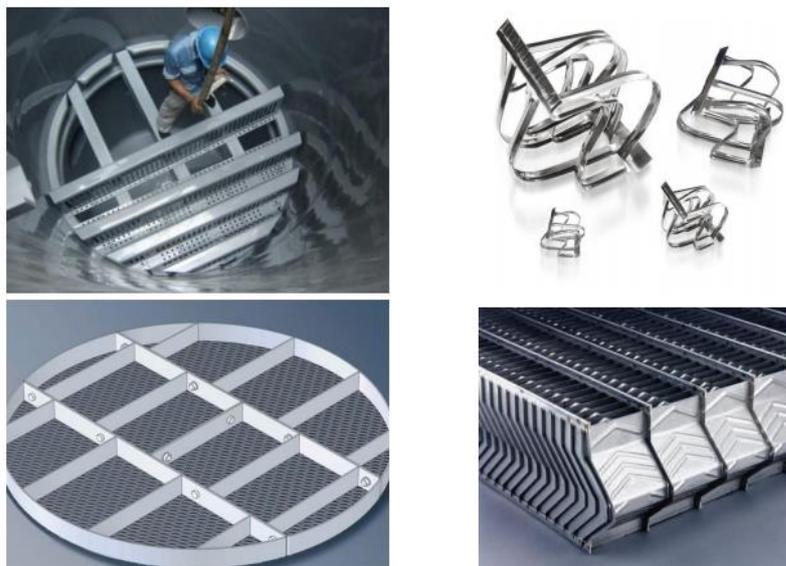


Imagen 16: Configuración interna. Fuente: EGCSA, (2019).

Otra empresa, Couple Systems, compañía con sede en Alemania con 25 años de experiencia en la industria de limpieza de los gases de combustión con todo tipo de tecnologías existentes en la actualidad, dispone de sistemas de limpieza en seco con posibilidad de montar un SCR.

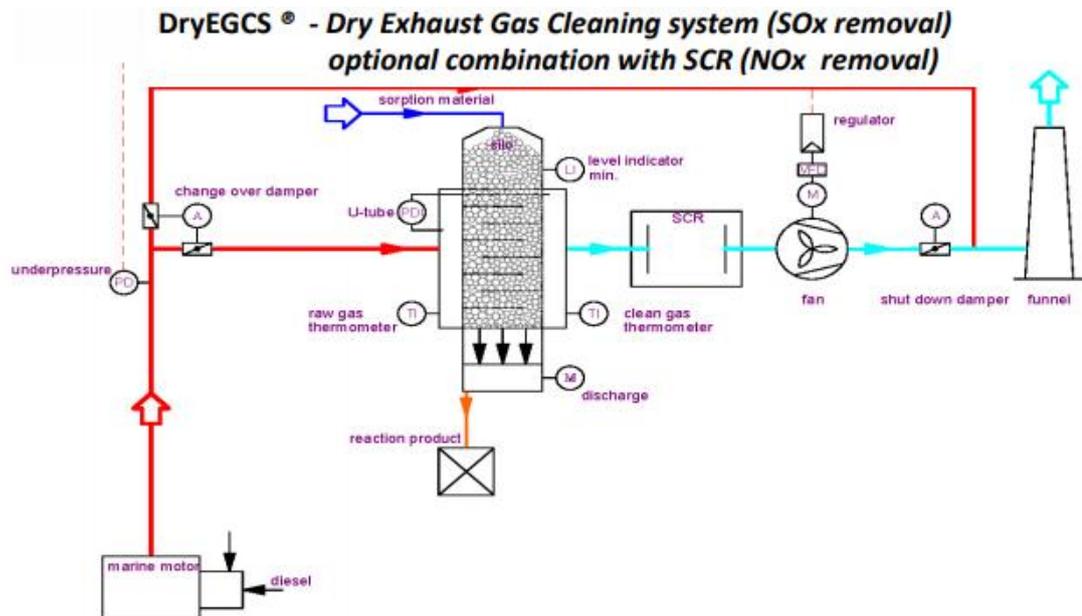


Imagen 17: Diagrama Scrubber seca DryEGCS. Fuente: EGCSA, (2019).

Las características que nos da el fabricante (EGCSA, 2019) son las siguientes:

- Cada unidad puede ir ligada a los escapes de un motor principal y 3 motores auxiliares.
- El máximo de %S en Fuel que puede tratar es de 5%.
- El porcentaje de limpieza es del 80%.
- Acompañada de un SCR es capaz de limpiar el 90% de NO_x.
- La cantidad de CO₂ eliminado es más del 15%.
- La limpieza de los gases se realiza con hidróxido de calcio granulado (Ca(OH)₂).
- No utiliza agua de lavado ni química adicional.
- El consumo de la química granulada es de 16 kg/h/MW basado en la utilización de un Fuel con 2.7% S y un consumo de éste en el motor de 200g/kWh.

- La potencia requerida para poner en servicio el sistema es de 1.5 a 2 kW/MW
- La superficie y la altura del equipo pueden ir entre 8.8 m² x 6.3 m para motores de 1MW, a 47.7 m² x 13.3 m para motores de 20MW.
- Los pesos en servicio van desde 14 t para motores de 1MW a 211 t para motores de 20 MW.
- La instalación suele ir directamente después de la turbo o entre la turbo y el economizador.
- Se requieren un tanque de química para ir adicionando de 14m³/MW.
- El sistema se rige por el esquema B determinado por MEPC.259 (68).

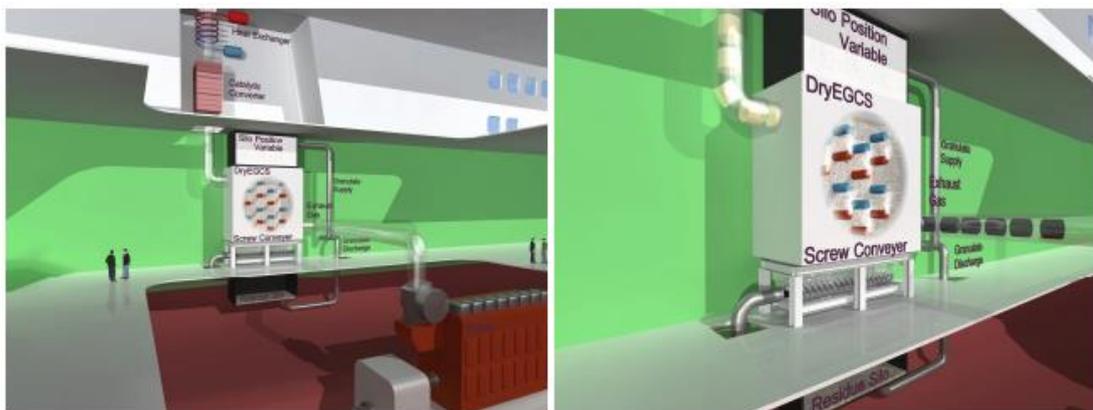


Imagen 18: Simulación de la instalación del sistema. Fuente: EGCSA, (2019).

Alfa Laval es una compañía sueca fundada en 1883 centrada en tres tecnologías clave: transferencia de calor, separación y manejo de fluidos, manteniendo posición de liderazgo en el mercado de la tecnología.

Lleva 10 años instalando su sistema PureSO_x para combatir la contaminación de los gases de escape y tras miles de horas de funcionamiento los primeros sistemas instalados siguen funcionando. Esto no ha sido igualado por ningún otro proveedor de la industria.

Las características del sistema de limpieza que nos da el fabricante (EGCSA, 2019) son las siguientes:

- El sistema puede ser instalado en circuito abierto, cerrado o híbrido.

- El sistema de limpieza puede tratar los gases de escape de una única fuente o de múltiples fuentes.
- El sistema estándar está diseñado para tratar los gases producidos por un combustible con un 3% S, pero es posible encargarlo para tratar hasta un contenido en azufre de 4.5%.
- Nos aseguran una limpieza de hasta un 80%.
- La cantidad de NO_x que puede eliminar el sistema es de 0.2%.
- El CO₂ eliminado es de menos de 0.1%.
- El medio de limpieza utilizado es agua de mar o agua dulce con sosa caustica (NaOH).
- La cantidad de agua de mar necesaria es de 50 m³/h/MW.
- La cantidad de agua dulce depende de la cantidad de horas utilizando el circuito cerrado y la temperatura del agua de mar.
- La cantidad de la solución al 50% de sosa caustica necesaria es para tratar los gases producidos por un combustible con 2,7% S es de 13-16.5 l/h/MW.
- Es necesario hacer uso de aire comprimido para su funcionamiento.
- La potencia requerida para el funcionamiento del sistema es de 10 a 12 kW/MW.
- La instalación se puede realizar en motores desde 1 MW hasta 80MW.
- Las dimensiones del sistema de limpieza van desde una diámetro de 0.8 m para motores de 0.5 MW hasta 7.5 m para motores de 60 MW.
- En cuanto al peso en servicio del sistema va desde 3 t para motores de 0.5 MW hasta 70 t para motores de 60 MW.
- La instalación del sistema se realiza en la propia chimenea o en un anexo a ésta.
- La planta de tratamiento de agua de lavado es de 4 m² y puede ser instalada en cualquier sitio disponible.
- Dependiendo de las instalaciones que haya a bordo será o no necesario un tanque para depositar los lodos generados que son de más o menos 0.2 l/MWh cuando el sistema trabaja en modo cerrado.

- El tanque de adicción de química dependerá de la cantidad de veces que se puede cargar en puerto, así que calcularemos a razón de 16 l/MWh para un fuel con 2.7 % S
- El tanque de recirculación de agua dulce tiene que ir desde 10 m³ para motores de 0 hasta 10 MW, hasta 40 m³ para motores de más de 20MW.
- El sistema se rige por el esquema B determinado por MEPC.259 (68).
- La instalación por parte de Alfa Laval incluye todos los equipos necesarios, pero no se encargan de las tuberías y el cableado necesario.

Alfa Laval Pure SO_x es un sistema compacto y muy efectivo en la eliminación de los óxidos de azufre. Es muy flexible, ya que admite una gama de configuraciones muy amplia que garantiza cubrir las necesidades de cada buque.

Wärtsilä también es una empresa líder mundial en tecnologías y soluciones de ciclo de vida completo para la industria marina maximizando el desempeño ambiental y económico de los buques. Hamworthy ha pasado a pertenecer a la familia de Wärtsilä aportando lo conocimientos adquiridos a lo largo de 50 años en la tecnología utilizada en los sistemas de gas inerte, los cuales se asemejan a los sistemas de lavado de gases de escape.

Las características del sistema de limpieza que nos da el fabricante (Wärtsilä, 2019) son las siguientes:

- Los sistemas pueden ser de ciclo abierto, cerrado o híbrido.
- El sistema puede ser de una unidad principal solamente para una entrada de gases o de unidades integradas para varias entradas.
- Los sistemas estándar pueden trabajar con un combustible de 3.5% S como máximo, aunque se puede encargar para mayores de 4.5%
- La reducción típica de las partículas conseguidas por este sistema es entre el 60% y el 85%.

- La reducción de NO_x es entre el 5% y el 10%, aunque si es necesario hacer una mayor reducción, Wärtsilä ofrece un SCR capaz de hacer una reducción entre el 80% y 90%.
- Este sistema no es capaz de eliminar ningún porcentaje de CO_2 .
- La depuración de los gases se produce por medio de agua de mar (circuito abierto) y por agua dulce y sosa caustica (circuito cerrado).
- El agua utilizada para la limpieza es de $45 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}$ en circuito abierto y de $25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}$ para circuito cerrado.
- El consumo de agua dulce es de más o menos $0.1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}$ dependiendo de los parámetros de operación.
- Basándonos en el consumo de un combustible con un 3.5% S y que la solución de sosa caustica es al 50%, se tiene un consumo de 18 l/h/MW de química.
- Según la configuración del sistema de tratamiento del agua se necesita poca cantidad de coagulante y floculante para el proceso de purga.
- Es necesario el uso de aire comprimido.
- La energía necesaria para poner en funcionamiento el sistema es entre 3 y 6 kW/MW en circuito cerrado y entre 10y 20 kW/MW en circuito abierto.
- Su diseño se adapta a cualquier potencia de motor, desde 400kW hasta los motores más potentes de la industria.
- La superficie y la altura del equipo pueden ir entre $1 \text{ m}^2 \times 5 \text{ m}$ para motores de 1MW, a menos de $20 \text{ m}^2 \times 7 \text{ m}$ para motores de 20MW.

Dim.	Description (Diameter A)	Ø850	Ø1050	Ø1250	Ø1450	Ø1650	Ø1850	Ø2050	Ø2250	Ø2450	Ø2650	Ø2850	Ø3050	Ø3250
	MW	1.2	1.9	2.7	3.6	4.7	5.9	7.2	8.7	10.3	12.0	13.9	15.9	18.1
	Gas flow (kg/S)	2.7	4.1	5.8	7.7	10.0	12.6	15.5	18.6	22.1	25.9	29.9	34.3	38.9
F	Total height (mm)	8,100	8,300	8,500	8,800	9,200	10,000	10,000	10,500	11,000	11,500	11,500	12,500	13,500
B	Overall length (mm)	950	1,150	1,350	1,550	1,750	1,950	2,150	2,350	2,550	2,750	2,950	3,150	3,350
B1	Overall width (mm)	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	3,400
C	Outlet height (mm)	6,100	6,300	6,500	6,800	7,200	7,450	7,450	7,950	8,450	8,950	8,950	9,450	9,450
G	Footprint (mm)	1,240	1,440	1,640	1,840	2,040	2,240	2,440	2,660	2,900	3,120	3,380	3,600	3,850
E	Drain below base (mm)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,250
N1	Inlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1500	DN1500
N2	Outlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1400
W1	Approx. dry weight (kg)	1,600	1,900	2,200	2,600	3,000	4,200	4,600	5,000	5,900	7,500	8,100	9,000	10,800
W2	Approx. operational weight (kg)	1,800	2,100	2,500	2,900	3,600	5,100	5,600	6,200	7,900	9,700	10,600	11,700	13,800

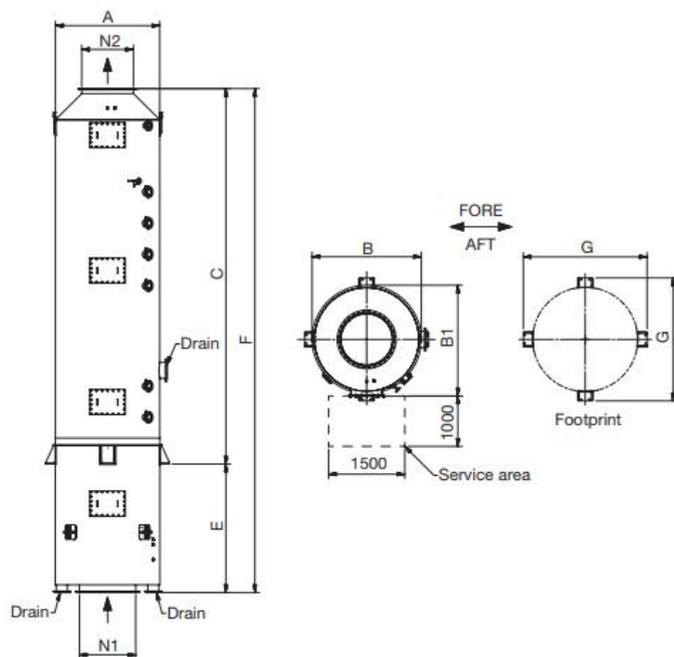


Imagen 19: Pesos y dimensiones estándar del sistema I-SO_x. Fuente: Wärtsilä, (2019).

- En cuanto al peso en servicio del sistema va desde 2 t para motores de 1 MW hasta 55 t para motores de 20 MW.
- La instalación en buques ya construidos se realiza en la chimenea o en un anexo a esta.
- La instalación de la planta de tratamiento de agua ocupa una superficie de 4.5 m² para un sistema que trate una potencia de 12 MW.
- La planta de tratamiento de agua puede ser instalada en cualquier espacio disponible y practico.
- Los residuos generados del tratamiento del agua de lavado son de entre 70 y 300 kg/MW.

- En circuito cerrado es necesario una adicción de más o menos 11.5 m³ de NaOH/MW para un combustible con un 2.7% de S.
- En circuito abierto se puede montar un tanque de desaireación
- Para circuito cerrado es necesario un tanque que recoja las purgas, su tamaño va a depender del tiempo programado por el buque el uso del sistema en este modo.
- El sistema se rige tanto por el esquema A como por el B determinado por MEPC.259 (68).
- Los componentes suministrados estarán ligados al proyecto firmado entre Wärtsilä y el armador.

3.3 ELECCIÓN DE LA MEDIDA MÁS FAVORABLE

Para el buque objeto de estudio la medida más favorable es la instalación de una Scrubber de múltiples entradas para limpiar las emisiones de los dos motores principales ya que el combustible utilizado contiene 0,9 % de Azufre. Los motores auxiliares y las calderas trabajan con MDO con un contenido en azufre de 0,09%, por lo que cumplen con la normativa no teniendo que hacer modificación alguna. Nos debemos asegurar que la Scrubber es capaz de alcanzar los niveles límites suficientes de emisiones de SO_x medidos como la relación entre SO₂/CO₂ según está estipulado en la normativa. Esta eficiencia en el sistema se calcula como la suma del porcentaje en azufre en el combustible y el límite permitido, todo ello dividido entre el contenido de azufre en tanto por ciento: $(\%S + \text{límite}) / \%S$

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

Imagen 20: Eficiencia requerida por los sistemas Scrubber. Fuente: MAN Diesel & Turbo, (2019).

Por lo tanto, para este buque tendremos que calcular cual es la eficiencia requerida en dependencia de la zona de navegación y del combustible que se vaya a utilizar.

En este caso la navegación del buque, como se ha comentado anteriormente, se encuentra englobada dentro de las aguas del mediterráneo, es decir, no pertenecientes a una zona de control de emisiones (ECA). El combustible utilizado para los motores principales es IFO 180 de 0,9% de azufre, y para los motores auxiliares y calderas se utiliza marine diésel oil (MDO) de 0.09% de azufre. Por lo tanto, solo requiere de tratamiento los motores principales. Con estos datos tenemos que conseguir una eficiencia del 50% en la limpieza de gases de escape por el sistema instalado.

Al navegar por el mediterráneo sabemos que los puertos donde opera no tienen ningún tipo de restricción para verter las aguas de limpieza, el sistema más adecuado será uno de circuito abierto. La empresa Alfa Laval, según artículo de Canary Ports (CP, 2018) ha anunciado recientemente que su sistema de limpieza de circuito abierto podrá ser modificado para convertirse en híbrido, de esta manera nos aseguramos su utilización en caso de que la legislación se modifique y nos impida la descarga al mar del agua resultante del lavado. Como podemos ver en el siguiente gráfico, la amortización es a corto plazo, teniendo en cuenta que la posible diferencia entre el coste de un fuel compatible y el HSFO es de 200 dólares/tonelada.

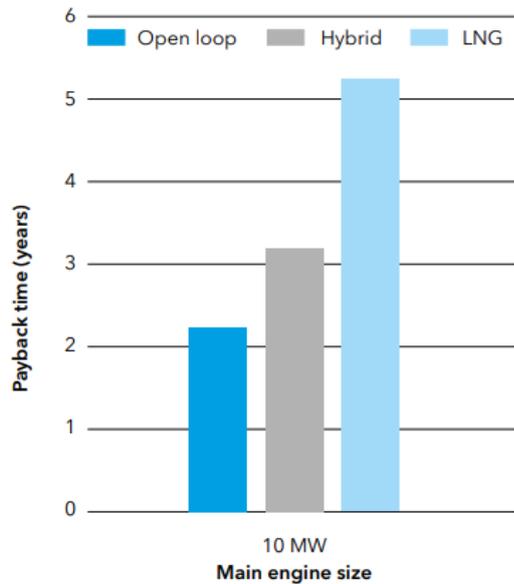


Imagen 21: Tiempos de amortización. Fuente: DNV GL, (2018).

En cuanto a la configuración del sistema podemos elegir un montaje donde el Scrubber se componga de dos elementos, un Scrubber jet y un absorbedor.

El Scrubber jet es la fase previa del sistema de limpieza, donde se inicia el lavado de los gases de escape mediante una pulverización en spray de agua de mar sobre ellos. Si es colocado para que los gases entren por la parte superior y con una altura mayor a la entrada de los gases en el absorbedor, se aumenta la eficiencia de lavado sobre todo de las materias particuladas.

Desde este primer sistema los gases de escape son reconducidos hasta el absorbedor pasando por un lecho empaquetado en el que el SO_x es eliminado hasta el nivel marcado por la eficiencia del tipo escogido.

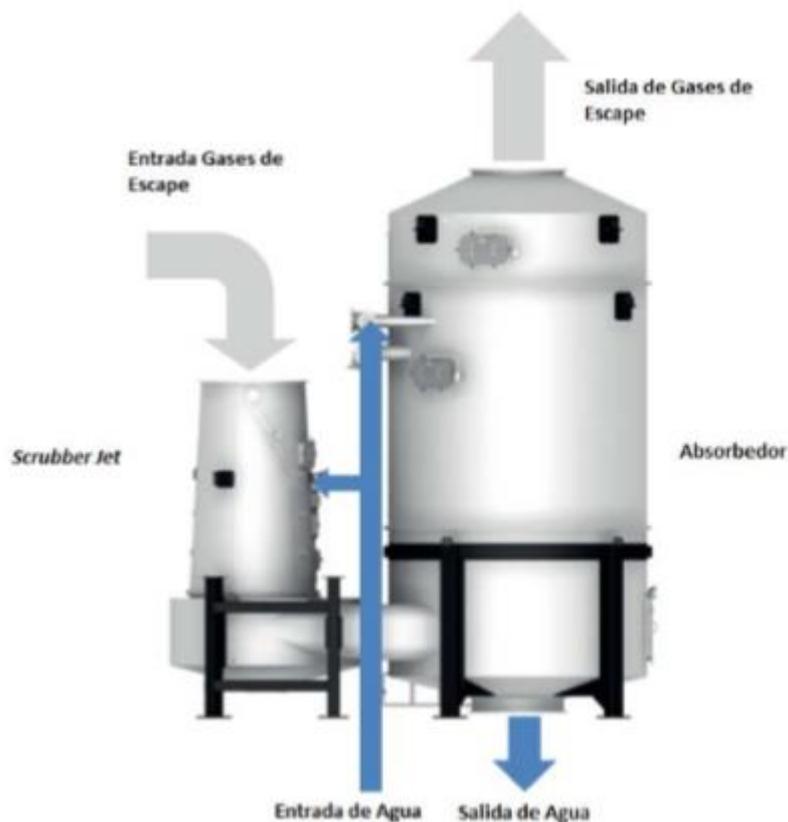


Imagen 22: Configuración del sistema Scrubber absorbedor con Scrubber jet. Fuente: Alfa Laval, (2019).

Los sistemas de limpieza de los gases de escape se instalan, normalmente, en la parte más alta del buque en la zona del guardacalor, ya que es donde más espacio disponemos para ubicar los elementos requeridos y además es de fácil acceso.

El sistema puede disponer de un by-pass para reconducir los gases directamente a la atmósfera cuando el sistema no se encuentre en funcionamiento, aunque muchos de ellos permiten pasar el flujo de gases a través de ellos aunque no se encuentren operativos. Por todo ello no es necesario seguir teniendo instalado un silenciador además de la Scrubber, ya que este hace las funciones del anterior.

Si se dispone de algún sistema de recuperación de calor deberá estar instalado antes del sistema de limpieza porque en el proceso de depuración

de los gases vamos a perder mucho poder calorífico al ser los gases tratados.

Por todo lo estudiado anteriormente, se ha escogido el sistema PureSOx fabricado por Alfa Laval porque nos permite hacer la instalación inicial de circuito abierto, siendo posible la conversión al sistema híbrido si fuera necesario fácilmente. Los componentes necesarios para hacer la instalación son los siguientes:

1. Inyectores de chorro de agua:

El gas de escape es enfriado a su paso por esta sección donde se produce la primera reducción del contenido de SO_x . Es donde se pulveriza el agua de mar.

2. Unidad de limpieza o depurador:

El cuerpo está fabricado con una aleación de acero especial para evitar la corrosión con un diseño robusto y confiable. Normalmente los inyectores de chorro de agua y el material absorbente son independientes, proporcionando un peso menor, mejorando la estabilidad del buque. Como comentamos anteriormente, esta unidad será con múltiples entradas reduciendo por tanto el peso, el costo y la instalación. Los gases circulan por el depurador después de pasar por los inyectores de chorros donde se produce el segundo paso de la limpieza, quedando los gases de escape con los niveles óptimos para poder expulsarlos a la atmósfera. El caudal en el suministro de agua de lavado dependerá de la carga del motor.

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



Imagen 23: Dimensiones Scrubber PureNOx. Fuente: Alfa Laval, (2019).

3. Válvulas de entrada al depurador o bypass:

Estas válvulas se utilizan para dirigir los gases de escape hacia el depurador si éste se encuentra en servicio o hacia el exterior si no es necesario realizar el lavado de los gases. Normalmente en un sistema multientradas para garantizar que no se produzca contraflujo de los gases de escape se utilizan válvulas de doble disco con aire de sellado permitiendo un sellado hermético. Además el aire de sellado evita que la válvula quede adherida a su asiento por la acumulación de hollín.

4. Ventiladores de aire de sellado:

Proporcionan el aire de sellado para las válvulas de entrada o bypass. También se utiliza para ventilar el depurador cuando se precise de mantenimiento.

5. Bomba de alimentación de agua salada:

Es la encargada de proporcionar el agua de mar al depurador desde la caja de mar. Para conseguir una limpieza de hasta 0,1% de S el flujo de agua deberá ser de 45 m³/MWh. Normalmente se instalan cuatro bombas, dos en servicio y las otras dos en stand-by.

6. Unidad de limpieza de agua:

Se trata de un separador centrífugo de alta velocidad, el cual ha sido desarrollado durante años por Alfa laval para que no se vea afectado por la inclinación y el balanceo. Este separador limpia el agua de limpieza eliminando el hollín atrapado de los gases de escape.

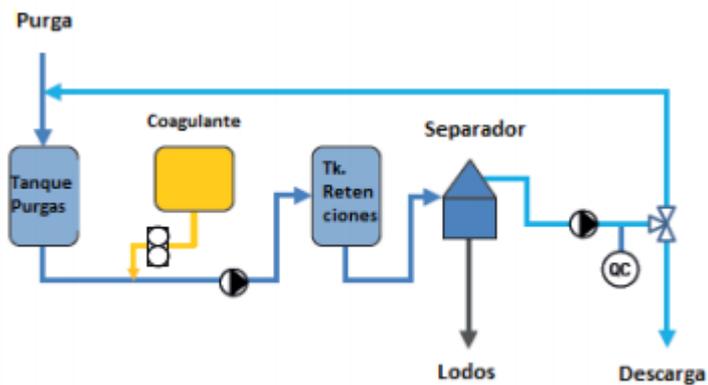


Imagen 24: Esquema del circuito de tratamiento del agua de limpieza. Fuente: Alfa Laval, (2019).

Es un sistema bastante compacto ya que solamente ocupa 6 m².

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



Imagen 25: Depuradora del agua de limpieza. Fuente: Alfa Laval, (2019).

7. Módulo monitorización agua de limpieza:

Están colocados tanto a la entrada como a la salida del depurador. Esto nos permite controlar en todo momento la diferencia entre el agua de mar y la que desechamos tras el lavado de los gases. Este sistema controlará los niveles de pH, la turbidez y la temperatura.

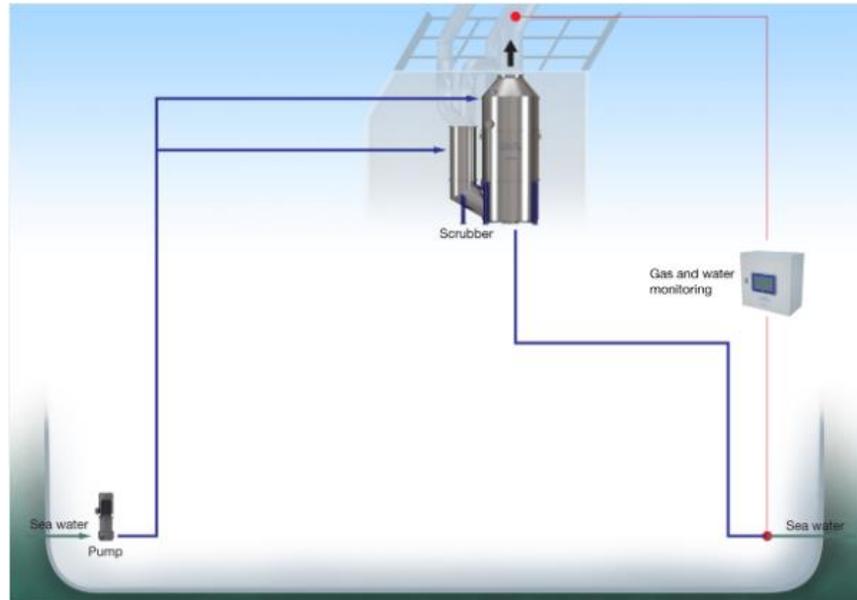


Imagen 26: Sistema abierto. Fuente: Alfa Laval, (2019).

Como hemos comentado anteriormente, si fuese necesario pasar a un sistema híbrido por un cambio en la normativa de los puertos donde opera el buque, los equipos necesarios serían los siguientes:

1. Bombas de recirculación:

Estas bombas son necesarias para alimentar al depurador de forma continua cuando esté en modo de circuito cerrado. Como ocurre con las bombas de alimentación, normalmente, llevan cuatro instaladas.

2. Tanque de circulación:

Estos tanques están realizados con epoxi reforzado con vidrio y polipropileno, así como las tuberías del circuito para evitar la corrosión y alargar la vida útil del sistema. Este tanque nos permite largos periodos de funcionamiento del depurador sin descargar al mar. Este tanque hace que no sea necesario agregar o purgar constantemente el agua y como es un ciclo cerrado el producto químico tiene más tiempo para reaccionar con el agua de circulación y el tiempo en el cual el sistema puede operar sin realizar ninguna purga depende del tamaño del mismo.

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

Imagen 27: Capacidad del tanque según potencia del motor. Fuente: Alfa Laval, (2019).

Para el buque en estudio se instalará un tanque de 20 m³ de volumen, ya que entre los dos motores casi suman una potencia de 16 MW.

3. Tanque de NaOH:

Este tanque debe ser adecuado para contener los aditivos químicos utilizados en el sistema y la cantidad necesaria va a depender directamente de la carga del motor y el contenido de azufre en el combustible. En el modo de operación de circuito cerrado, normalmente se utiliza sosa cáustica.

El tanque debe tener una temperatura mínima de 16°C, ya que la solución de sosa cáustica cristaliza a una temperatura inferior de 12°C. La situación, por tanto, es importante para tener en cuenta si la temperatura va a ser la idónea o por el contrario hay que instalar algún sistema de calefacción. Por el contrario no debe exceder de 45°C para evitar efectos negativos de la solución en el tanque.

Para calcular la capacidad necesaria para el tanque tenemos que tener en cuenta diferentes parámetros como son el tiempo de navegación del buque, la velocidad de navegación, la cantidad de motores en servicio, el contenido en azufre del combustible, la solución de NaOH y el periodo de aprovisionamiento programado.

4. Tanque de lodos:

El hollín eliminado en la limpieza con el separador centrífugo se recoge en este tanque en forma de lodo. Este hollín está formado por partículas de la combustión, componentes de azufre y otras materias. No se puede mezclar con otros lodos generados a bordo y se eliminará según dictamine el convenio MARPOL.

5. Intercambiador de placas:

Es necesario para enfriar el agua de tratamiento ya que esta está recirculando. El diseño del intercambiador suministrado por Alfa Laval está pensado para facilitar el mantenimiento y ocupa poco espacio.

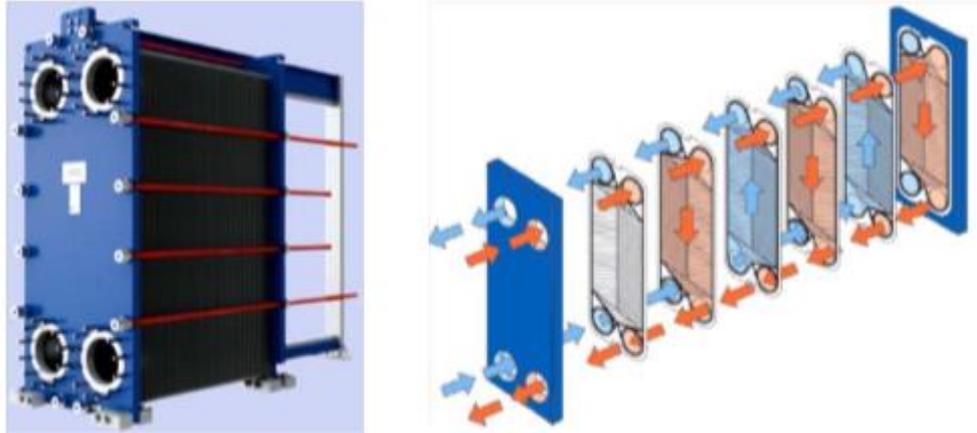


Imagen 28: Intercambiador de calor de placas. Fuente: Alfa Laval, (2019).

El funcionamiento básico de un intercambiador de placas es la transferencia de calor entre dos fluidos. En este caso entre el agua dulce del circuito cerrado y el agua salada. El formato corrugado de las placas proporciona una mayor superficie de contacto para una mayor eficiencia y evita las turbulencias. El material de las juntas tienen que tener en cuenta las variaciones de pH del agua para evitar un precipitado deterioro.

En la siguiente figura se muestra como sería la instalación del sistema:

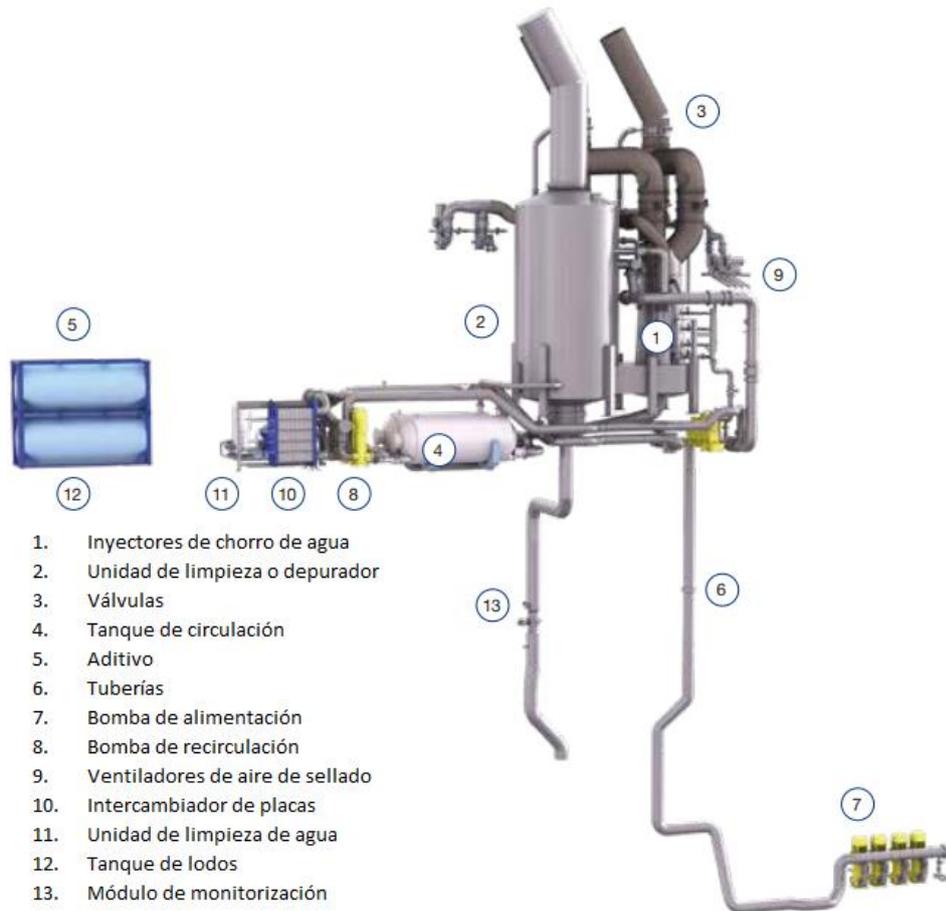
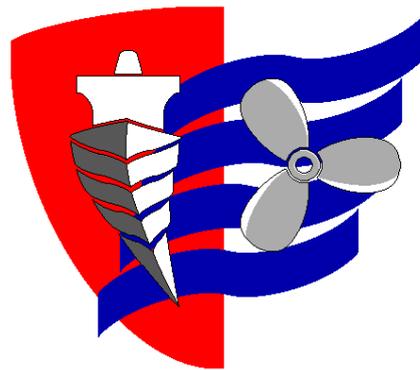


Imagen 29: Ejemplo de instalación circuito híbrido. Fuente: Alfa Laval, (2019).

Para el circuito abierto podemos aprovecharnos de la disposición actual de las tomas de mar y los filtros para poder instalar una bomba que suministre el agua salada requerida a la Scrubber. Además esta misma instalación nos sirve para redirigir parte del agua salada al intercambiador de placas para refrigerar el agua dulce del circuito cerrado. También se dispone de una descarga al mar en el costado del buque.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



CONCLUSIONES

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han estudiado los conocimientos básicos de los sistemas a tener en cuenta para mitigar las emisiones a la atmósfera como marca la OMI a través del Convenio MARPOL.

Se ha determinado diferentes formas de afrontarlos, pero todas ellas suponen un gasto económico bastante importante que los armadores tendrán que estudiar para valorar cual es el más adecuado para implementarlo en sus buques. De todas formas, estas inversiones pueden ser retornables a corto y medio plazo.

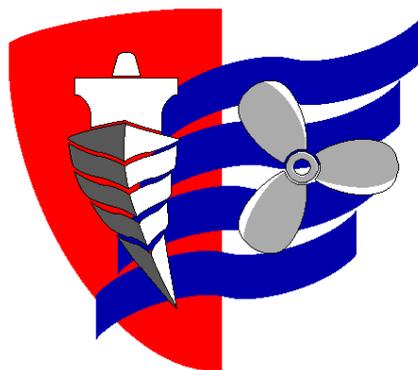
El factor más relevante suele ser el precio del combustible durante la vida útil del barco o el retorno de la inversión producida al instalar un sistema de limpieza de gases de escape durante un período determinado. El precio del combustible depende de varios factores difíciles o imposibles de prever. También hay que tener en cuenta la disponibilidad en el futuro de los distintos tipos de combustibles entre los que barajamos las diferentes soluciones. Con la entrada en vigor en Enero de 2020 del límite de 0,5% de azufre a nivel global hará que todo buque tenga que realizar algún cambio y no solo los que navegan por las zonas ECA.

Para el buque objeto de estudio hemos determinado la instalación de una scrubber para realizar la limpieza de los gases de escape que producen los dos motores principales para poder de esta manera seguir utilizando el mismo tipo de combustible. Puesto que los puertos donde navega no han restringido la descarga de agua de lavado de un depurador, nos hemos decantado por uno de circuito abierto que abarata mucho la instalación, aunque es posible en un futuro adecuarlo para poder trabajar con un circuito híbrido.

Esta decisión se ha tomado entendiendo que el cambio a una combustible con bajo contenido en azufre como puede ser un LSHFO o MGO va a suponer un gasto aún mayor a largo plazo.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfa Laval, (2019). <https://www.alfalaval.com/> [Consultada en Enero 2019]
- Anave, (2016). https://www.anave.es/images/tribuna_profesional/2016/tribuna_bia1016.pdf [Consultada en Enero 2019]
- Artículo sector marítimo Abril 2018, Revista Ingeniería Naval. <https://sectormaritimo.es/los-niveles-de-sox-se-reducen-en-la-ue> [Consultada en Enero 2019]
- Artículo sector marítimo Diciembre 2011, Revista Ingeniería Naval. <https://sectormaritimo.es/reduccion-de-las-emisiones-de-co2-procedentes-de-los-buques> [Consultada en Enero 2019]
- Bunkerworld, (2019). <http://www.bunkerworld.com/> [Consultada en Enero 2019]
- Caballero, M.; Lozano, S. y Ortega, B. (2007). "Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra". Revista Digital Universitaria, Volumen 8 Número 10. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf
- CP, (2018). <http://www.canaryports.es/texto-diario/mostrar/1186231/scrubbers-ciclo-abierto-alfa-laval-podran-convertir-hibridos> [Consultada en Enero 2019]
- DNV GL, (2018). <https://www.dnvgl.es/> [Consultada en Enero 2019]
- EGCSA, (2019). Asociación de Sistemas de Limpieza de Gases de Escape. <https://www.egcsa.com> [Consultada en Febrero 2019]
- El Estrecho Digital. <https://www.elestrechodigital.com/2018/12/15/cataluna-defiende-declarar-el-mediterraneo-como-zona-especial-de-bajas-emisiones/> [Consultada en Enero 2019]
- MAN Diesel & Turbo, (2019) . <https://marine.mandieselturbo.com/docs/default->

- <source/shopwaredocuments/marine-engine-programme-2217.pdf?sfvrsn=17> [Consultada en Enero 2019]
- Máquinas de Barcos, (2019). Blog sobre mantenimiento de Máquinas de Barcos. <http://maquinasdebarcos.blogspot.com/2012/11/man-diesel-turbo-presenta-el-primer.html> [Consultada en Enero 2019]
 - Maritime Maps, (2019). <http://www.maritimemaps.co.uk/Print/print.html> [Consultada en Enero 2019]
 - Maritime Propulsion, (2019). <http://articles.maritimepropulsion.com/article/Dry-Exhaust-Gas-Cleaning-System20954.aspx> [Consultada en Enero 2019]
 - MARPOL, (2019). Ingeniero Marino. <https://ingenieromarino.com/el-convenio-marpol-7378/> [Consultada en Enero 2019]
 - OMI, (2019). Organización Marítima Internacional. <http://www.imo.org/es/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/paginas/air-pollution.aspx> [Consultada en Enero 2019]
 - US environmental, (2019). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100GPCR.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006+Thru+2010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C06thru10%5Ctxt%5C00000033%5CP100GPCR.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150q16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> [Consultada en Enero 2019]
 - Wärtsilä Environmental Product Guide. <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/product-guide-o-env-environmental-solutions.pdf> [Consultada en Enero 2019]
 - Wärtsilä, (2019). <https://www.wartsila.com/> [Consultada en Enero 2019]

Aviso responsabilidad UC

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros.

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.