

TRABAJO FIN DE GRADO.

**SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES EN EL
BUQUE TANQUE “HESPÉRIDES”.**



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NAUTICA
MÁQUINAS Y RADIOELECTRÓNICA NAVAL.

SEPTIEMBRE 2016.

Jhoan Andrés Mesa Márquez.

Héctor José Correa Molina.

SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES EN EL BUQUE TANQUE “HESPÉRIDES”.



Fuente: www.petrogas.es [4]

Tutor: Antonio González Marrero.

Nombres: Jhoan Andrés Mesa Márquez.

Héctor José Correa Molina.

Grado: Tecnologías Marinas

Septiembre 2016

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	3
III. PARÁMETROS DE EMISIONES	5
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BUQUE.....	6
3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA PROPULSORA.....	7
3.1.2. CONSUMOS DE LA PLANTA PROPULSORA.....	9
3.1.3. EMISIONES DE LA PLANTA PROPULSORA.....	11
3.2 CONSECUENCIA DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS.....	12
3.2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL (EFECTO INVERNADERO).....	12
3.2.2 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	13
3.2.3 PROBLEMÁTICA DE LAS EMISIONES MARINAS EN LA SALUD.....	15
IV. NORMATIVA.....	17
4.1. NORMATIVA PARA REGULAR LOS NOX.....	20
4.2. NORMATIVA PARA REGULAR LOS SOX.....	21
V. MÉTODOS DE REDUCCIÓN.....	23
5.1. SISTEMAS REDUCCIÓN NOX.....	24
5.1.1. SISTEMAS PRIMARIOS DE REDUCCIÓN DE NO _x	24
5.1.2. SISTEMAS SECUNDARIOS DE REDUCCIÓN NO _x	25
5.2. SISTEMAS REDUCCIÓN SOX.....	26
VI. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES DEL BUQUE HESPÉRIDES.....	28
6.1. SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES NO _x	28
6.1.1. LIMITACIÓN DE EMISIONES NO _x SEGÚN MARPOL.....	28

6.1.2. INSTALACION DEL SISTEMA SCR EN EL BUQUE.....	30
6.2. SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES SO _x	35
6.2.1. LIMITACIÓN DE EMISIONES SO _x SEGÚN MARPOL.....	35
6.2.2 INSTALACION DEL SISTEMA SCRUBBER EN EL BUQUE.....	37
6.3. APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES.....	41
ENERGÍA EÓLICA; SKYSAILS.	41
VII. CONCLUSIONES.....	45
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	50

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1:Tabla características "Hespérides"	6
Tabla 2: Potencia motores y auxiliares.....	7
Tabla 3: Equipos de la planta propulsora.	8
Tabla 4: Consumo de motor principal.....	9
Tabla 5:: consumo de motores auxiliares.	10
Tabla 6: consumo de calderas	10
Tabla 7: Tabla de consumos.	11
Tabla 8: Datos de emisiones del motor principal	11
Tabla 9: Marco jurídico. (Evolución cronológica)	18
Tabla 10: sistemas primarios reducción de NOX.....	24
Tabla 11: sistemas secundarios de reducción NO _x	25
Tabla 12: sistemas secundarios de reducción SO _x	26
Tabla 13: limites NO _x	28
Tabla 14: dimensiones reactores SCR	34
Tabla 15: Contenido límite de azufre en combustible	35
Tabla 16: límite de SO _x en gases de emisión	36
Tabla 17: Alcalinidad de mares y puertos.....	38
Tabla 18: Sistema SkySails.....	42

ÍNDICE DE IMÁGENES.

Imagen: 1 Buque "Hespérides" Propiedad de "Distribuidora Marítima Petrogás"	5
Imagen: 2 Evolución normativa NO _x	20
Imagen: 3 evolución normativa SO _x	21
Imagen: 4 Esquema del sistema de reducción de NO _x	30
Imagen: 5 Sistema de Scrubber en combinación del SCR	37
Imagen: 6 Sistema scrubber tipo abierto	39
Imagen: 7 Gráfico comparativo del consumo de un buque con y sin cometa ..	42

I. INTRODUCCIÓN.

La motivación para realizar este trabajo fin de grado, surge tras la problemática a nivel mundial con relación a la contaminación provocada por las emisiones de los buques en el tráfico marítimo y la necesidad de los organismos tanto internacionales, europeos como nacionales por limitar este grave problema.

Este proyecto se ha realizado sobre el buque “Hespérides”, de la empresa “DISTRIBUIDORA MARÍTIMA PETROGÁS” que navega principalmente por aguas canarias.

El proyecto se basa en la aplicación de los sistemas de filtrado de gases de escape en el buque Hespérides con el fin de lograr la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera. Todo esto, cumpliendo con el Anexo VI del convenio MARPOL que regula los límites máximos de emisiones permitidos.

ABSTRACT.

The motivation to do this final project comes from the international problem about the exhaust gas emissions caused by vessels, and the need for international, european and national institutions to limit this serious problem.

This project have been realized about the vessel "Hespérides" which belong to "DISTRIBUIDORA MARÍTIMA PETROGÁS" and is used to sail in Canary Islands.

The project is based on the application of the systems of cleaning exhaust gas in the vessel Hesperides in order to achieve the reduction of pollutant emissions into the atmosphere. All this, fulfilling Annex VI of MARPOL, which regulates the maximum permitted emissions.

II. OBJETIVO DEL PROYECTO.

1.Observar los daños provocados por los gases contaminantes tanto en el ser humano como en el medio ambiente.



2.Estudiar los diferentes sistemas de reducción de emisiones de gases contaminantes.



3.Investigar la normativa competente de aplicación en cuanto a emisiones contaminantes.



4.Aplicación en el buque “Hespérides” de los sistemas de reducción de emisiones para cumplir con la normativa.

III. PARÁMETROS DE EMISIONES

Se ha tomado un buque tipo tanque para realizar las modificaciones e instalar algunos de los sistemas de reducción de emisiones es el buque “Hespérides”, propiedad de “Distribuidora marítima Petrogás”, dedicado al transporte de productos petrolíferos en las Islas Canarias, Marruecos y el sur peninsular.

Imagen: 1 Buque "Hespérides" Propiedad de "Distribuidora Marítima Petrogás"



Fuente: www.petrogas.es [4]

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BUQUE.

La tabla a continuación muestra los datos más relevantes del buque seleccionado para este trabajo de fin de grado.

Tabla 1:Tabla características "Hespérides"

Tipo de buque	Petrolero de productos
Matrícula	Santa Cruz de Tenerife
Registro	08/1997
Número IMO	9140853
Call sign	E.A.N.N.
Eslora total (m)	121,00
Eslora entre perpendiculares (m)	113,22
Manga (m)	18,55
Puntal (m)	10,113
Calado (m)	7,427
Arqueo bruto (GT)	6.405
Arqueo neto (NT)	2.785
Peso Muerto (DWT)	9359,40
Desplazamiento (T)	17.685
Velocidad (Kn)	11
Fecha de construcción	22/05/1997

Fuente: www.petrogas.es [4]

3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA PROPULSORA.

Este buque es propulsado por una hélice de paso variable de 3,97m de diámetro, accionada a través de un motor Wärtsilä 8L32 diésel de 8 cilindros en línea, 4 tiempos, no reversible, con turbocompresor e intercooler, inyección directa de combustible que desarrolla una potencia de 4640 kW a 750 rpm. También dispone de una hélice de proa tipo Kamewa de 500 kW como ayuda en las maniobras.

Tabla 2: Potencia motores y auxiliares.

Wärtsilä 8L32		AE/DE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE IMO Tier 2	AE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE SCR mode	AE SCR mode	ME SCR mode
Engine speed	RPM	750	750	750	750	750	750	750	750
Cylinder output	kW/cyl	500	500	580	580	580	580	580	580
Engine output	kW	4000	4000	4640	4640	4640	4640	4640	4640
Mean effective pressure	MPa	2.49	2.49	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88

Fuente: www.wartsila.com [5]

El motor Wärtsilä 32 fue desarrollado en respuesta a la necesidad del mercado de un nuevo motor de 320 mm por cilindro y desde 1998 más de 2500 de estos motores se han vendido para el mercado marino.

Debido a los grandes desarrollos en la tecnología de combustión, es destacado por su eficiencia y su fácil mantenimiento en relación con los largos periodos de funcionamiento sin mantenimiento. El motor está completamente equipado con todos los elementos esenciales.

El motor Wärtsilä 8L32 es totalmente compatible con las normas IMO Tier II sobre emisión de gases que se exponen en el Anexo VI del convenio MARPOL.

[1]

Además del motor principal, la planta propulsora está compuesta por 3 motores auxiliares, motor de emergencia y 2 calderas.

Tabla 3: Equipos de la planta propulsora.

Motor Principal	WÄRTSILÄ 8L32; 4640 kW; 750 rpm
Fuel	HFO 180 cSt 187g/kWh.
Motores Auxiliares	GUASCOR 3x 588 kW x 1.500 rpm (MDO)
Motor de emergencia	VOLVO PENTA TMD-102 ^a de 158 kW a 1.500 rpm
Calderas	2 x 732.000 kcal
Economizador	NO

Fuente: www.petrogas.es [4]

Para poder obtener los datos de la contaminación producida por los gases de escapes debido a los combustibles fósiles es necesario saber los consumos realizados por el buque en sus diferentes formas de navegación.

3.1.2. CONSUMOS DE LA PLANTA PROPULSORA.

Los valores del consumo de fuel utilizado en este proyecto han sido calculados en base a la información facilitada por los fabricantes de los equipos de la planta propulsora y la naviera dueña del buque Hespérides. Estos datos deben ser tomados como valores aproximados y no como valores absolutos o reales.

Hay que tener en cuenta que los consumos de fuel pueden variar por factores externos como las condiciones medioambientales, estados de carga, etc.

- **Consumos del motor principal**

Tabla 4: Consumo de motor principal

Consumo combustible según carga del motor	g/kWh
Consumo de HFO con una carga del 100%	184
Consumo de HFO con una carga del 85%	180
Consumo de HFO con una carga del 75%	180
Consumo de HFO con una carga del 50%	180

Fuente:www.wartsila.com [5]

Los datos ofrecidos en la tabla anterior han sido calculados gracias a información facilitada por el fabricante del motor Wärtsilä.

El buque consume IFO180 combustible marino perteneciente al grupo del fueloil residual (una mezcla de combustibles destilados y residuales, que generan un combustible intermedio), utilizado por buque-tanques en el mercado internacional.

- **Consumos de los motores auxiliares**

Tabla 5: consumo de motores auxiliares.

Consumo combustible de los auxiliares	g/kWh
Consumo de MDO con una cara del 100%	113

Fuente: www.guascor.com [12]

Los datos ofrecidos en la tabla anterior han sido calculados con información facilitada por el fabricante Guascor. No hay que olvidar que son 3 motores auxiliares, aunque estos normalmente no trabajen simultáneamente.

- **Consumos de calderas**

Por falta de información (horas de funcionamiento, rendimiento de la instalación...) no se ha podido calcular el consumo de las calderas.

Es por esta razón que se adoptarán los datos de una caldera semejante, basándonos en la potencia de salida que es el dato que nos ofrece Petrogas.

$$2 \times 732.000 \text{ kcal} = 2 \times 851,316 \text{ kW}$$

Tabla 6: consumo de calderas

Consumo combustible de calderas	Kg/h
Para una potencia de 851 kW	74.5

Fuente: Elaboración propia [8]

- **Consumos totales:**

La empresa Petrogas facilita la cantidad de consumo de combustible diario en el buque en varias formas de navegación además de tipos de consumo.

Tabla 7: Tabla de consumos.

Carga/descarga D.O.	5,6 t/día // 1,6 t / día
Calefacción carga D.O.	0,2 t/hora
Limpieza tanques D.O.	0,4t/hora
Navegación cargado H.F.O.	14 t/día
Navegación lastre H.F.O.	13,2 t/día

Fuente: www.petrogas.es [4]

3.1.3. EMISIONES DE LA PLANTA PROPULSORA.

Tabla 8: Datos de emisiones del motor principal

Sistemas de gases de escape (emisiones)	kg/s
suministro al 100% de carga	8.4
suministro al 85% de carga	7.5
suministro al 75% de carga	6.5
suministro al 50% de carga	4.5

Fuente: www.wartsila.com [5]

Ante la ausencia de datos de emisiones reales, se parte de la referencia de que el motor principal cumple con la normativa TIER II, se tomará estos datos como base de emisiones límites del buque que cumple con la normativa, la cual se ha quedado como límite de emisiones fuera de las zonas de control de emisiones puesto que en enero de 2016 ha entrado en vigor la normativa TIER III de la

Organización Marítima Internacional (IMO) la cual limita las emisiones dentro de las zonas de control de emisiones (ECAS y SECAS).

Se puede deducir que el buque no cumple con la normativa actual de emisiones TIER III, en este caso, sería necesario una adaptación de la planta propulsora para llegar a los nuevos límites establecidos

3.2 CONSECUENCIA DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS.

3.2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL (EFECTO INVERNADERO).

El efecto invernadero, es un fenómeno que se produce debido a que ciertos gases se acumulan en la atmósfera terrestre y retienen parte de la energía que emite la corteza terrestre producida por el sol. Esto es un proceso natural que evita que parte de la energía que llega a la tierra proveniente del sol vuelva al espacio, controlando de esta manera la temperatura terrestre. Pero debido a la acción del hombre en las emisiones de ciertos gases, ha provocado que la temperatura del planeta haya aumentado desde que se tienen datos, provocando cambios en los modelos de precipitaciones, aumento de las temperaturas, aumento del nivel del mar por la descongelación de los casquetes polares, mayor número de enfermedades tropicales, etc...

La comunidad científica internacional, pone de manifiesto que el incremento de la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera terrestre está provocando alteraciones en el clima. Los principales gases de efecto invernadero son: el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y los clorofluocarbonos (CFC). [2], [3]:

3.2.2 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

Las emisiones contaminantes, se pueden dividir en dos grupos; los gases y las partículas. La industria marítima, es la causante de graves vertidos a la atmósfera de estos contaminantes:

Óxido de nitrógeno (NO_x).

Los procesos de combustión producen productos como los óxidos de nitrógeno. A las altas temperaturas que se alcanzan en los procesos de combustión, el nitrógeno que normalmente es inerte, reacciona con el oxígeno y forma el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). Estos gases se les conoce como óxidos de nitrógeno (NO_x).

Este ácido es muy corrosivo y es uno de los principales causantes de la lluvia ácida, causante de graves problemas en los ecosistemas marinos, terrestres y a la población humana.

Óxido de azufre (SO_x).

Los óxidos de azufre son el resultado del contenido de azufre en los combustibles marinos. Durante los procesos de combustión, el azufre reacciona rápidamente con el oxígeno y forma el dióxido de azufre (SO₂). Y una parte de este azufre puede formar trióxido de azufre (SO₃) que en contacto con agua forma el ácido sulfúrico (H₂SO₄). Estos ácidos son arrastrados por la lluvia y al igual que los NO_x, son los causantes de la lluvia ácida provocando graves problemas al medio ambiente y a la salud de la población.

Óxido de carbono:

Los principales son el monóxido de carbono (CO), y el dióxido de carbono (CO₂). El CO es producido por la combustión incompleta del combustible ya que no llega a oxidarse completamente para formar CO₂ (combustión completa).

El monóxido de carbono es una sustancia altamente tóxica en la salud mientras que el dióxido de carbono se encuentra de forma natural en la naturaleza, pero en altas concentraciones tiene un papel fundamental en el efecto invernadero.

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son todos aquellos hidrocarburos que son muy volátiles a temperatura ambiente. Se puede considerar como COV aquel compuesto orgánico que a 20°C tenga una presión de vapor de 0.01 kPa o más, o una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso.

Según el ministerio de agricultura alimentación y medio ambiente, los COV los podemos clasificar en tres grupos:

- **Compuestos extremadamente peligrosos para la salud:** Benceno, cloruro de vinilo y 1,2 dicloroetano.
- **Compuestos clase A:** los que pueden causar daños significativos al medio ambiente como, por ejemplo: acetaldehído, anilina, tricloroetileno, etc.
- **Compuestos clase B:** tienen menor impacto en el medio ambiente. Pertenecen a este grupo, entre otros, acetona y etanol. [6]

Materia particulada (MP).

Los procesos de combustión siempre emiten a la atmósfera partículas sólidas o líquida de materia que no se ha quemado al completo.

A parte de los problemas medio ambientales que causa la materia particulada, también provoca grandes problemas en la salud, ya que es inhalada por las vías respiratorias de la población causando deficiencias pulmonares y cáncer de pulmón aumentando la mortalidad en dicha población.

3.2.3 PROBLEMÁTICA DE LAS EMISIONES MARINAS EN LA SALUD.

Un estudio de la Universidad de Rostock en Alemania, ha revelado que las emisiones producidas por los barcos, provocan miles de muertes al año a causa del cáncer de pulmón y enfermedades del corazón. Los científicos comentan que estas cifras podrían reducirse significativamente mediante dispositivos de filtración de los gases de escape instalados a bordo.

La mayor parte de la flota mundial, consume combustibles poco procesados con altas concentraciones de sustancias nocivas, incluyendo, azufre, hidrocarburos, metales pesados materia particulada¹ carcinógena (MP), etc...

Según los investigadores, las zonas poblacionales de mayor riesgo son las que se encuentran en las zonas costeras donde la mitad de la contaminación del aire por materia particulada (en zonas costeras, ríos y puertos) proviene de las emisiones de los buques.

Por este motivo, las instituciones han hecho esfuerzos para reducir las emisiones en el transporte terrestre de azufres y gases contaminantes, pero no han hecho el mismo esfuerzo para reducir las emisiones provenientes del sector marítimo donde se consume más de la quinta parte del combustible a nivel mundial.

Es por todo ello que la normativa internacional, en los últimos años ha realizado actualizaciones, para aumentar las restricciones de las emisiones. [9]

¹ MP: Materia Particulada (Los procesos de combustión siempre emiten partículas sólidas o líquidas de **materia** sin combustionar. La emisión de esas partículas ha sido objeto de definiciones y mediciones diversas. En general, el término **materia particulada** en suspensión, se refiere a partículas de todos los tamaños presentes en la atmósfera.)

IV. NORMATIVA.

El incremento de la preocupación sobre la polución del aire ha dado como resultado el control de las emisiones contaminantes en la industria marina. Para evitar el crecimiento de las emisiones contaminantes no controladas, la OMI (Organización Marítima Internacional) ha desarrollado el Anexo VI de Marpol el cual representa el primer conjunto de regulaciones en las emisiones de gases de escape.

El Anexo VI del Marpol, entró en vigor el 19 de mayo de 2005. Este anexo viene a hablar sobre los límites de emisiones permitidos procedente de los buques de óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Tanto en zonas de navegación restringida (ECAS² y ZECAS³) como en el resto de zonas de navegación mundial. Y prohíbe las emisiones deliberadas de sustancias que destruyen la capa de ozono.

En la siguiente tabla, se ha realizado un estudio cronológico de la evolución de la normativa internacional, europea y española con el fin de reducir las emisiones contaminantes procedentes del tráfico marítimo.

² **ECAS**: zona de control de emisiones de óxido de nitrógeno.

³ **SECAS**: zonas de control de emisión de óxido de azufre y partículas orgánicas.

Tabla 9: Marco jurídico. (Evolución cronológica)

	INTERNACIONALES	EUROPEAS	ESPAÑOLAS
1983	Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL 73/78)		
1997	Protocolo de Kioto		
2001		Directiva 2001/81/CE	
2004		Directiva 2004/107/CE	
2005	Anexo VI (MARPOL 73/78): Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques		
2007			Ley 34/2007

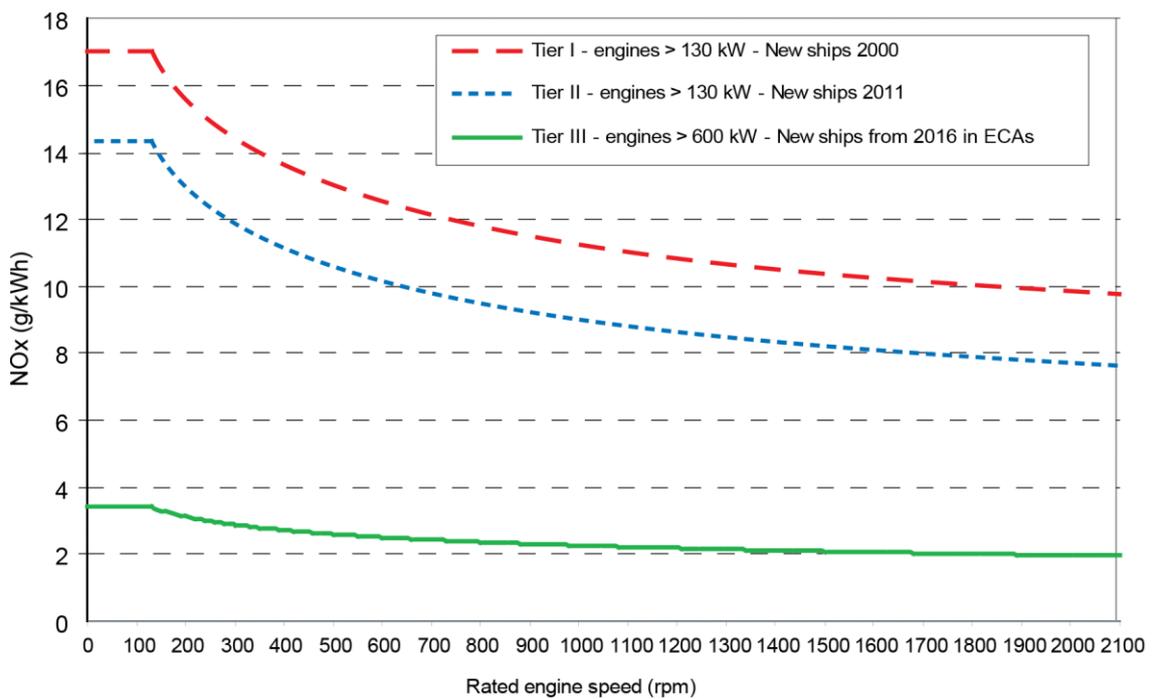
2008	Anexo VI revisado del Convenio MARPOL (Reglamento (CE) N473/2008/ Directiva 2008/50/CE	
2009		Directiva 2009/30/CE Directiva 2009/31/CE	
2010		Directiva 2010/75/UE	
2011	Normativa IMO Tier II		Real Decreto 102/2011
2012		Directiva 2012/33/UE	
2013	2ºPeriodo del Protocolo de Kioto	Reglamento (UE) 525/2013	
2014			Real Decreto 678/2014
2015	Anexo VI revisado del Convenio MARPOL		
2016	Normativa IMO Tier III		

Fuente: Elaboración propia [6]

4.1. NORMATIVA PARA REGULAR LOS NOX.

En la regla 13 dentro del Anexo VI del Marpol, se regulan los óxidos de nitrógeno (NO_x), esta regla se aplica a los motores con una potencia superior a 130kW e instalado en un buque construido después del 1 de enero de 2000. Se diferencian varios niveles (Tier, I, II, II) de emisiones NO_x basado en el año de construcción del buque y la velocidad del motor.

Imagen: 2 Evolución normativa NO_x

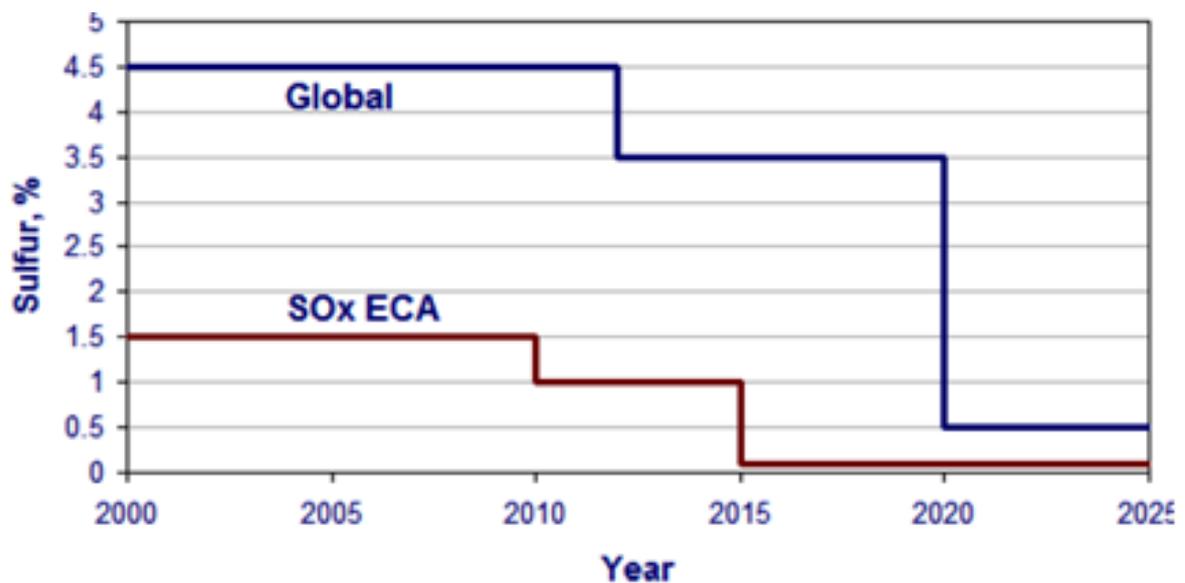


Fuente: www.wartsila.com [5]

4.2. NORMATIVA PARA REGULAR LOS SOX.

En la regla 14 dentro del Anexo VI del Marpol, se fija el límite de azufre permitido, actualmente fijado en 3,5% (desde el 1 de enero de 2012 hasta el 1 de enero de 2020) en peso para todos los combustibles usados a bordo de un buque. En el Anexo VI también se refleja el contenido mínimo de azufre en las zonas de control de emisiones (SECAS), donde el control de las emisiones de SO_x es aún más estricto, estando limitado en la actualidad a 0,1% masa/masa.

Imagen: 3 evolución normativa SO_x



Fuente: <http://maquinasdebarcos.blogspot.com.es/2015/01/oxidos-de-azufre-en-zonas-de-control-de.html>
[10]

V. MÉTODOS DE REDUCCIÓN.

Ante la legislación impuesta por la Organización Marítima Internacional (OMI), los armadores se ven obligados a cumplir con la normativa para poder seguir realizando una explotación comercial mediante la navegación de los buques mercantes.

A continuación, se exponen los medios para reducir la contaminación de los motores marinos. En los motores más modernos ya se cumple con las normativas del Anexo VI de Marpol, sobre la contaminación atmosférica sin tener que recurrir a sistemas de reducción de emisiones. Pero en zonas de navegación en las que las emisiones son más estrictas y por lo tanto la contaminación tiene que ser aún menor (Zonas Eca y Seca).

Los métodos para reducir las emisiones procedentes de los motores, se clasifican en soluciones primarias y soluciones secundarias. Las primeras evitan la formación de sustancias contaminantes mientras que las segundas eliminan las sustancias producidas y evitan su dispersión.

- **-Soluciones primarias:** se actúa directamente sobre el proceso de combustión del motor evitando la formación de las sustancias contaminantes.
- **-Soluciones secundarias:** en esta se actúa sobre la sustancia ya creada por la combustión, por lo tanto, se actúa sobre los gases de escape para tratar de eliminarlas y evitar la dispersión.

5.1. SISTEMAS REDUCCIÓN NOX.

5.1.1. SISTEMAS PRIMARIOS DE REDUCCIÓN DE NO_x.

Tabla 10: sistemas primarios reducción de NOX

Sistema	Reducción de NO_x	Ventajas	Desventajas
Recirculación de gases de escape EGR.	20-50%	<ul style="list-style-type: none">·Es económico.·Puede utilizarse con todos los combustibles	<ul style="list-style-type: none">· Disminuye el rendimiento del motor.· Aumente el consumo.· Produce mucho hollín y se tupe la válvula.
Combustión con bajo contenido en aire.	10-44%	<ul style="list-style-type: none">·Es efectiva.·El coste económico no es elevado.	<ul style="list-style-type: none">· Combustión incompleta.· Emite hollín, hidrocarburos y CO.
Inyección de agua en la cámara de combustión.	50-60%	<ul style="list-style-type: none">·El motor puede funcionar con o sin agua.·El volumen que ocupa es mínimo.·Bajo coste.	
Emulsión de agua.	30%	<ul style="list-style-type: none">·Incrementa la eficiencia del motor.·Reduce otros contaminantes.·Reduce el desgaste del motor e impide la acumulación de carbón.	
Inyección de agua en el aire de admisión.	40%	<ul style="list-style-type: none">·Alta eficiencia en la reducción de NO_x.·Bajos costes de operación.·Baja el consumo de combustible.·Buen rendimiento del motor·No requiere mucho mantenimiento.	

Fuente: Elaboración propia [6]

5.1.2. SISTEMAS SECUNDARIOS DE REDUCCIÓN NO_x.

Tabla 11: sistemas secundarios de reducción NO_x

Sistema	Reducción de NO_x	Ventajas	Desventajas
Reducción selectiva no catalítica (SNCR).	30-50%	<ul style="list-style-type: none">·Fácil de instalar.·Ocupa poco espacio.·Se puede utilizar junto con las soluciones primarias.	<ul style="list-style-type: none">·Donde son más eficientes es en las instalaciones con pocos niveles de emisiones.
Sistema de reducción catalítica (SCR).	80-90%	<ul style="list-style-type: none">·No afecta al rendimiento del motor.·Ocupa poco espacio.	<ul style="list-style-type: none">·Puede generar reacciones no deseadas.·Son caros de instalar, mantener y operar.

Fuente: Elaboración propia [6]

5.2. SISTEMAS REDUCCIÓN SO_x.

Tabla 12: sistemas secundarios de reducción SO_x

Sistemas	Reducción de SO _x	Ventajas	Desventajas
Scrubber System. Tipo seco.	90-99%	<ul style="list-style-type: none"> ·Bajo consumo energético. ·Elimina tanto SO_x como NO_x. ·No trasmite contaminantes al mar. ·Fácil de operar. 	<ul style="list-style-type: none"> ·Ocupa un gran volumen. ·Pueden existir contrapresiones que afecten al motor. ·Ocupa un gran volumen.
Scrubber System Húmedo. Tipo abierto.	90-99%	<ul style="list-style-type: none"> ·Bajo consumo energético. ·Alta eficiencia. ·Puede utilizar equipos del buque (bombas, tomas de agua salada). 	<ul style="list-style-type: none"> ·Puede no ser usado en puerto. ·Concentración de sustancias corrosivas. ·Genera residuos. ·Ocupa un gran volumen
Scrubber System Húmedo. Tipo cerrado.	90-99%	<ul style="list-style-type: none"> ·Bajo consumo energético. ·Alta eficiencia. ·Bajo mantenimiento. ·Puede ser usado tanto en puerto como en navegación 	<ul style="list-style-type: none"> ·Concentración de sustancias corrosivas. ·Genera residuos.
Scrubber System. Tipo Híbrido.	90-99%	<ul style="list-style-type: none"> ·Sistema flexible (opera tanto en sistema abierto como en sistema cerrado). 	<ul style="list-style-type: none"> ·Mayor mantenimiento. ·Ocupa un gran volumen. ·Es caro.

Fuente: Elaboración propia [6]

VI. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES DEL BUQUE HESPÉRIDES.

6.1. SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES NO_x.

6.1.1. LIMITACIÓN DE EMISIONES NO_x SEGÚN MARPOL.

El convenio Marpol en el anexo VI, limita las emisiones NO_x estableciendo un máximo permitido a los buques dependiendo del régimen nominal del motor y la fecha de construcción del mismo.

Tabla 13: límites NO_x

Límites permitidos NO_x		
Fecha en vigor	Régimen nominal del motor (n=rpm)	Límite permitido (g/kW·h)
Entre 1/1/1990 y 1/1/2000	$n < 130$	17,0
	$130 \leq n < 2000$	$45 \cdot n^{(-0,2)}$
	$2000 \leq n$	9,8
Entre 1/1/2000 y 1/1/2011	$n < 130$	17,0
	$130 \leq n < 2000$	$45 \cdot n^{(-0,2)}$
	$2000 \leq n$	9,8
Entre 1/1/2011 y 1/1/2016	$n < 130$	14,4
	$130 \leq n < 2000$	$44 \cdot n^{(-0,23)}$
	$2000 \leq n$	7,7
Después del 2016	$n < 130$	3,4
	$130 \leq n < 2000$	$9 \cdot n^{(-0,2)}$
	$2000 \leq n$	2,0

Fuente: Convenio Marpol Edición refundida de 2011 [7]

En la tabla anterior, se representa la cantidad de emisiones NO_x permitidas por Marpol dependiendo de la fecha de construcción y el régimen nominal (n) del motor (número de vueltas del cigüeñal).

El límite de emisiones NO_x permitido para el buque Hespérides construido en 1997, se calcula de la siguiente manera:

- **Límite NO_x = 45 · n^(-0,2) g/kW·h**

Por lo tanto, con unas revoluciones por minuto (n) de 750 rpm;

- **Límite NO_x = 45 · 750^(-0,2) g/kW·h**

- **Limite NO_x = 11,97292497 g/kW·h**

Para el cumplimiento de estos límites de emisiones, existen varios sistemas nombrados anteriormente, cuya función es reducir estos gases y cumplir con el Convenio Marpol.

En los motores Wärtsilä se cumplen con reglas sobre emisión de gases y también se ofrecen soluciones ante este problema.

En el caso de este buque, se ha optado por SCR⁴ (Selective Catalytic Reactor).

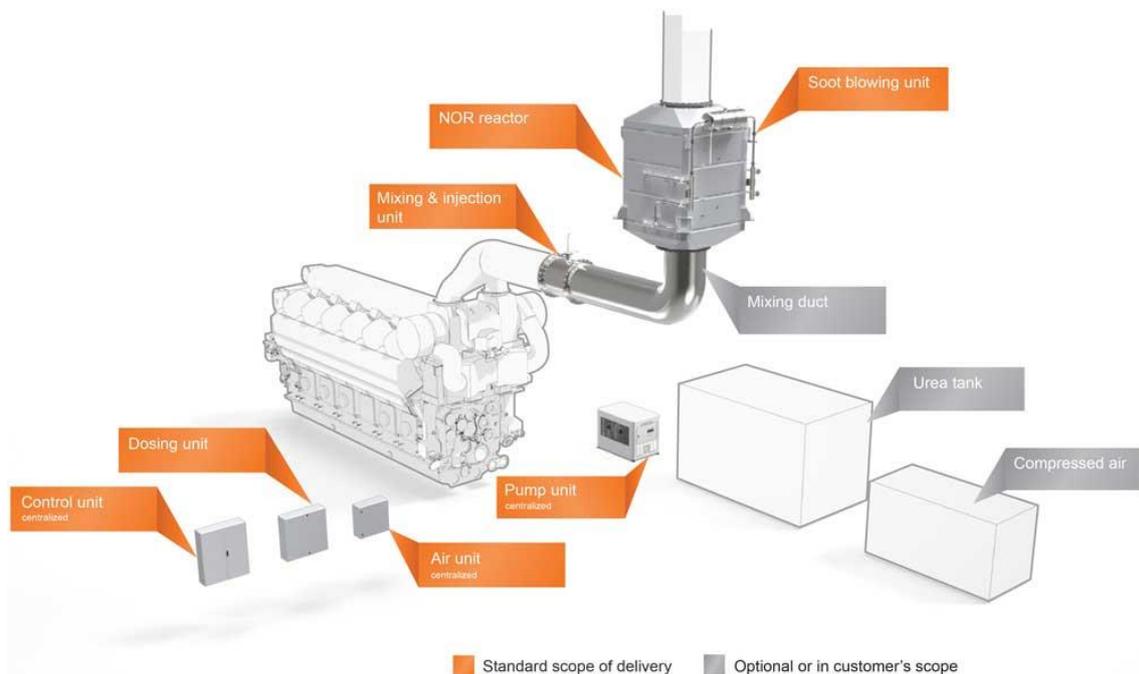
El motivo de la selección de este sistema se debe a que el proceso SCR es la tecnología más eficaz. Ofrece una reducción de hasta el 90% de NO_x y permite, por tanto, cumplir con las legislaciones más estrictas, incluso con las futuras normativas de limitaciones aún más severas.

⁴ SCR (Selective Catalytic Reactor): Sistema de Reducción Catalítica Selectiva

6.1.2. INSTALACION DEL SISTEMA SCR EN EL BUQUE.

El Reductor Wärtsilä de NO_x (NOR) es un sistema de reducción de emisiones de solución secundaria basado en la tecnología de Reducción Catalítica Selectiva (SCR) para la reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x). El sistema se adapta a las distintas necesidades de reducción de emisiones de NO_x, como las impuestas por el reglamento de OMI Tier III y las zonas ECAS.

Imagen: 4 Esquema del sistema de reducción de NO_x



Fuente: www.wartsila.com [5]

La empresa Wärtsilä cuenta con 40 diferentes dispositivos NOR en cuanto a tamaño para adaptarse a las diferentes peticiones; según potencia del motor y así poder abastecer a casi todos sus motores.

Los principales componentes que se incluyen en el suministro estándar son:

- Carcasa de Reactor.
- Elementos catalizadores.
- Unidad de soplado de hollín.
- Inyección de urea y unidad de mezclado.
- La unidad de dosificación de urea.
- Unidad de control y automatización.
- La unidad de bombeo de Urea.

Al suministro estándar también se le puede añadir extras como:

- El sistema de seguimiento de los contaminantes NO_x.
- Bomba de reserva Urea.

Otros componentes esenciales que son opcionales al del suministro estándar son:

- Conducto de mezcla.
- Estación de compresor (aire comprimido para la inyección de urea y sistema de soplado de hollín).
- Depósito de Urea.
- Aislamiento.
- Fuelle de expansión.
- Apoyo a la canalización y el reactor.
- Las tuberías y las válvulas para el sistema de reducción catalítica selectiva (set).

A continuación, se describe el funcionamiento una vez instalado en un motor:

Una bomba transfiere la urea desde el depósito de almacenamiento a la unidad de dosificación, que regula el flujo de urea al sistema de inyección basado en el funcionamiento del motor. La unidad de dosificación también controla el flujo de aire comprimido al inyector.

El inyector suministra urea como agente reductor en el conducto de gas de escape. Después de la inyección del agente reductor, el gas de escape fluye a través del tubo de mezcla al reactor, donde la reducción catalítica se lleva a cabo.

El reactor está equipado con un sistema de soplado de hollín para mantener los elementos catalizadores limpios. El reactor es el elemento principal del sistema y el cual se debe seleccionar según la potencia del motor, gracias a tablas ofrecidas por el fabricante.

6.1.2.1. REACTOR SCR.

Se denomina así a la cubierta que lleva el elemento catalizador y donde se producirá la reacción catalítica.

El gas de escape es conducido a través de un reactor, que contiene un número suficientemente grande de bloques de catalizador para proporcionar el área de superficie del catalizador requerido. La temperatura del gas de escape (y por lo tanto también el catalizador) está sujeta a limitaciones tanto en el lado superior (con el fin de evitar la oxidación del reductor) como en el lado inferior (para prevenir la formación de productos secundarios indeseados tales como sulfatos de amonio, que puede posteriormente tapar y desactivar el catalizador). El reactor es también equipado con una boca de acceso para la inspección de conductos y puertas de mantenimiento para servicio y sustitución de los elementos catalíticos.

El reactor estándar está diseñado de una manera flexible para la carga inicial de dos o tres bloques de catalizador dependiendo de la estructura del buque, éste se puede instalar vertical u horizontalmente a bordo del buque.

Si hay cualquier restricción de espacio específico, el reactor SCR puede ser hecho a medida a petición. Al reactor de SCR también se le puede integrar el silenciador, si así lo dispone la instalación.

Elección del SCR según el motor del buque:

De acuerdo a las condiciones técnicas descritas anteriormente del motor Wärtsilä 8L32 de la casa Wärtsilä, debemos fijarnos para este proyecto en la potencia de salida, dado que es este dato el que sirve de clasificación para los distintos NOR. A continuación, se adjunta la tabla con las medidas características del sistema NOR, señalando cual es el sistema que hemos seleccionado:

Según las características técnicas del motor Wärtsilä 8L32, la potencia de salida de éste es de 4640kW, por lo que según la tabla (14) adjunta a continuación debemos elegir el tipo 16, que abarca el rango de potencia desde 4401kW hasta 4800kW.

Tabla 14: dimensiones reactores SCR

Reactor Size	Engine power output (kW)	Reactor inlet DI Flange DN	Reactor outlet DO Flange DN	Weight (kg) (incl. catalyst elements)	L (mm) (incl. cones)	H (mm) (incl. 150 mm insulation)	W (mm) (incl. 150 mm insulation)	Mixing pipe, straight length (m) (bends are allowed after straight length)	Mixing pipe, total length (m) (includes straight length)
1	0...400	350	300	1100	3000	840	840	2.3	3
2	401...550	400	350	1200	3000	1000	840	2.4	3.2
3	551...700	450	400	1500	3116	1000	1000	2.5	3.4
4	701...900	500	400	1600	3116	1160	1000	2.6	3.6
5	901...1100	550	450	2000	3230	1160	1160	2.7	3.8
6	1101...1350	600	500	2100	3230	1320	1160	2.7	3.9
7	1351...1600	700	550	2500	3346	1320	1320	2.5	3.9
8	1601...1850	700	600	2600	3346	1480	1320	2.8	4.2
9	1851...2150	800	600	3000	3460	1480	1480	2.6	4.1
10	2151...2450	800	700	3100	3460	1640	1480	2.9	4.5
11	2451...2800	900	700	3500	3578	1640	1640	2.7	4.3
12	2801...3150	1000	800	3600	3578	1800	1640	2.6	4
13	3151...3600	1000	800	4100	3692	1800	1800	2.9	4.4
14	3601...4000	1100	900	4200	3692	1960	1800	2.7	4.2
15	4001...4400	1200	900	4700	3808	1960	1960	2.6	4
16	4401...4800	1200	1000	4800	3808	2120	1960	2.8	4.3
17	4801...5300	1300	1000	5300	3924	2120	2120	2.7	4.1
18	5301...5850	1300	1100	5400	3924	2280	2120	2.9	4.4
19	5851...6300	1400	1100	5900	4040	2280	2280	2.8	4.3
20	6301...6800	1400	1200	6000	4040	2440	2280	3	4.6
21	6801...7400	1500	1200	6600	4156	2440	2440	2.9	4.4
22	7401...8000	1500	1200	6800	4156	2600	2440	3.1	4.7
23	8001...8600	1600	1200	7300	4270	2600	2600	3	4.5
24	8601...9200	1600	1300	7500	4270	2760	2600	3.2	4.8
25	9201...9900	1700	1300	8300	4420	2760	2760	3.1	4.6
26	9901...10600	1700	1400	8500	4420	2920	2760	3.3	4.9
27	10601...11200	1800	1400	9400	4688	2920	2920	3.2	4.7
28	11201...11900	1900	1500	9600	4688	3080	2920	3.1	4.6
29	11901...12700	1900	1500	10500	4716	3080	3080	3.3	4.8
30	12701...13400	1900	1600	10700	4716	3240	3080	3.4	5.1
31	13401...14200	2000	1600	11700	4866	3240	3240	3.4	4.9
32	14201...15000	2000	1700	11900	4866	3400	3240	3.5	5.1
33	15001...15800	2000	1700	12800	5014	3400	3400	3.6	5.4
34	15801...16600	2200	1800	13000	5014	3560	3400	3.4	4.9
35	16601...17500	2200	1800	14000	5162	3560	3560	3.5	5.1
36	17501...18400	2200	1900	14300	5162	3720	3560	3.6	5.3
37	18401...19300	2200	1900	17300	5412	3720	3720	3.7	5.5
38	19301...20200	2200	2000	17500	5412	3880	3720	3.9	5.7
39	20201...21200	2200	2000	20600	5560	3880	3880	4	5.9
40	21201...22200	2200	2000	20900	5560	4040	3880	4.1	6.2

Fuente: www.wartsila.com [5]

Reactor SCR seleccionado:

- Tipo-16
- Altura del dispositivo: 2120 mm
- Ancho del dispositivo: 1960 mm
- longitud del dispositivo: 3808 mm
- Peso del dispositivo: 4800 mm
- Longitud incluyendo conductos: 2,8 m
- Altura total del dispositivo: 4,3 m

Estas serán las medidas del reactor a instalar en el buque HESPÉRIDES.

6.2. SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES SO_x.

6.2.1. LIMITACIÓN DE EMISIONES SO_x SEGÚN MARPOL.

El Convenio Marpol en la regla 14 del Anexo VI, limita el contenido de azufre de todo fueloil utilizado a bordo de los buques y no podrá exceder los siguientes límites:

Tabla 15: Contenido límite de azufre en combustible

Límites permitidos SO_x.	
Antes del 1/1/2012	4,50% masa/masa
Entre el 1/1/2012 y 1/1/2020	3,50% masa/masa
Después del 1/1/2020	0,50% masa/masa

Fuente: Convenio Marpol Edición refundida de 2011 [7]

Según se refleja en la tabla, en la actualidad, el contenido de azufre del combustible permitido a bordo no podrá exceder el 3,50% hasta el año 2020 que se limitará a 0,50%.

En la siguiente tabla, se representa los límites permitidos de emisión de óxidos de azufre (SO_x) en las zonas de control de emisiones (SECA).

Tabla 16: Límite de SO_x en gases de emisión

Límite permitido SO_x en las zonas de control de emisiones	
Antes del 1/7/2010	1,50% masa/masa
Entre el 1/7/2010 Y 1/1/2015	1,00% masa/masa
Después del 1/1/2015	0,10% masa/masa

Fuente: Convenio Marpol Edición refundida de 2011 [7]

Según las tablas, actualmente, el contenido de azufre de los gases de escape permitido dentro de las zonas de control de emisiones (SECA) no podrá exceder del 0,1% y fuera de estas zonas de control no podrán exceder el 3,5% y que será reducido en 0,5% en 2020; por lo que se hace necesario la instalación de algún sistema de reducción de SO_x.

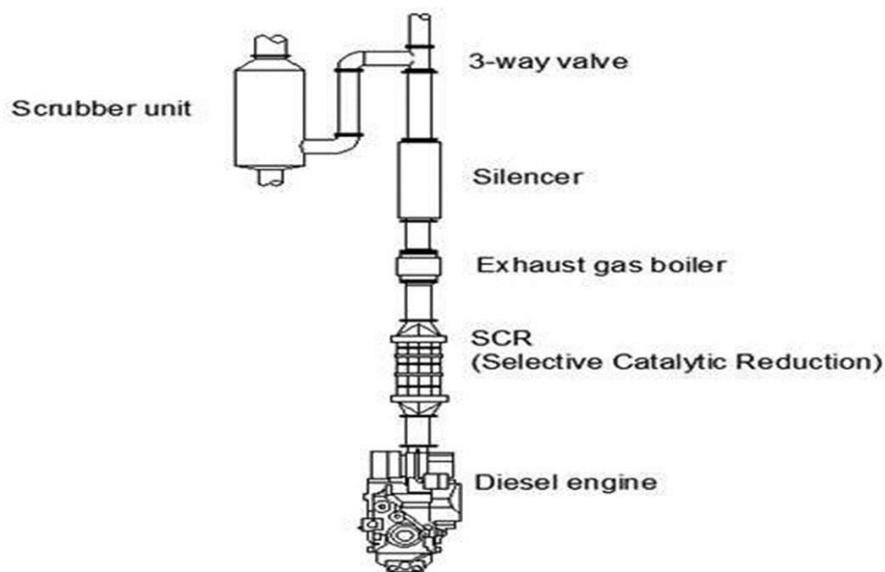
Por este motivo y para cumplir con la normativa internacional, se ha de instalar un sistema de reducción de emisiones SO_x.

En el buque Hespérides, el sistema escogido para la reducción de estos contaminantes es el Scrubber de la casa Wärtsilä.

6.2.2 INSTALACION DEL SISTEMA SCRUBBER EN EL BUQUE

El sistema scrubber de Wärtsilä es un sistema de reducción de emisiones de solución secundaria basado en el hecho de que los óxidos de azufre (SO_x) se disuelven en el agua. Este sistema se adapta para cumplir las necesidades impuestas en cuanto a reducción de emisiones de SO_x impuestas por el anexo VI del Marpol.

Imagen: 5 Sistema de Scrubber en combinación del SCR



Fuente: www.wartsila.com [5]

Hay varios tipos de funcionamiento para los sistemas scrubber los cuales han sido nombrados anteriormente (véase el punto 3.2).

Selección del sistema scrubber.

Para la selección del tipo de sistema scrubber a utilizar en el buque Hespérides, se debe tener en cuenta la alcalinidad del agua por la que el buque realizará sus rutas comerciales; pues las características naturales de alcalinidad del agua de mar, se puede utilizar para neutralizar la acidez de los gases de escape.

A continuación, se muestra los porcentajes de alcalinidad de los diferentes mares en un estudio llevado a cabo por la empresa Wärtsilä en el que también se incluye la alcalinidad de las aguas dentro de algunos de los puertos más relevantes internacionalmente

Tabla 17: Alcalinidad de mares y puertos.

AREAS			PORTS			
Alkalinity ($\mu\text{mol/l}$)			Alkalinity ($\mu\text{mol/l}$)			
Location	Min	Maks	Port	Min	Max	Estuary
Mediterranean Sea	2400		Krota	900	1000	Kymijoki
North Atlantic Ocean	2300		Miami	2300		
North Pacific Ocean	2100		Moss	850	2000	
North Sea	2200		New Orleans	2400	3000	Mississippi
Norwegian Sea	2300		Oslo	1350		
Panama	1800		Rotterdam	2200	2700	Rhine
Panama Canal	1000		St.Petersburg	490		Neva
Persian Gulf	2500		Travemünd	1800		
Philippine Sea	2100					
Red Sea	2400					
South Atlantic Ocean	2300					

Fuente: www.wartsila.com [5]

El buque Hespérides comprende una zona de navegación para sus rutas comerciales que incluye el Mar Mediterráneo y el Océano atlántico; de la información ofrecida por la tabla anterior se tomara los siguientes datos:

- Océano atlántico, norte y sur contiene un mínimo de alcalinidad de $2300\mu\text{mol/L}$
- Mar Mediterráneo contiene un mínimo de alcalinidad de $2400\mu\text{mol/L}$

Por lo tanto, el buque Hespérides navegará en aguas con una alcalinidad mínima que varía entre $2300\text{-}2400\mu\text{mol/L}$.

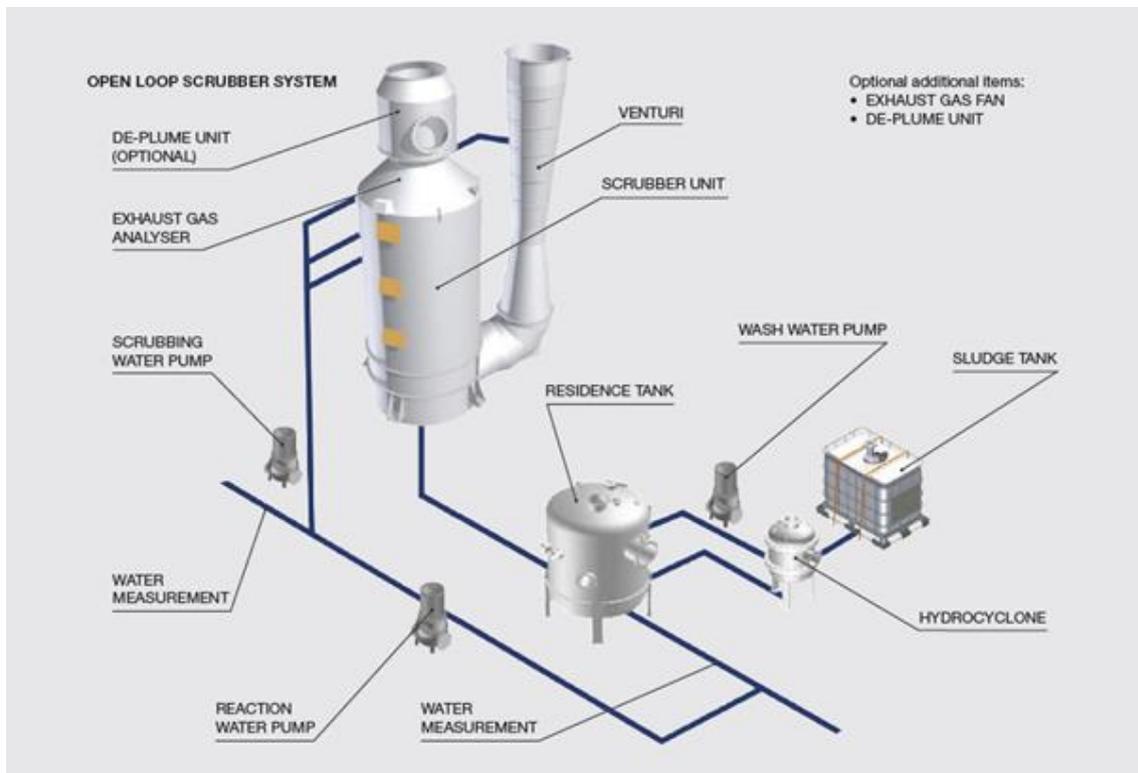
Con estos datos y conociendo los diferentes tipos de sistemas scrubber, la mejor selección para este buque sería el sistema scrubber de tipo **ABIERTO**. Ya que esta solución es óptima para los buques que naveguen en zonas de alta alcalinidad del agua de mar (alcalinidad $\geq 1,000 \mu\text{mol/L}$).

A continuación, se ofrecerá una pequeña explicación del funcionamiento de este sistema:

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 (H_2SO_4). 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, para no provocar daños en el medio ambiente marino.

Imagen: 6 Sistema scrubber tipo abierto



Fuente: www.wartsila.com [5]

Los principales componentes que se incluyen en el suministro estándar son:

- 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)

Para algunos de los componentes que establecen el sistema scrubber del tipo abierto, puede utilizarse los ya instalados en el buque, generando así un ahorro en la instalación del sistema.

Este sistema reduce del 90 al 99% de los SO_x, reduciendo los óxidos de azufre para cumplir con los límites impuestos por la normativa, incluso de los combustibles con un 3,50% masa/masa de azufre.

6.3. APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES.

ENERGÍA EÓLICA; SKYSAILS.

Como complemento a los sistemas de reducción de gases aplicados y explicados en apartados anteriores, existen diferentes aplicaciones de energías renovables en el mercado que pueden ser instaladas a bordo del buque objeto de este proyecto; el sistema Skysails cuenta con unos porcentajes de reducción de consumo de combustible una vez activos bastante considerable si se tiene en cuenta la cantidad de combustible que consume un buque. Lo que ofrece al buque no solo un ahorro en combustible, sino también una reducción en la emisión de gases contaminantes al reducir el consumo.

Este sistema es un sistema desarrollado por la empresa alemana Skysails GmbH perteneciente al grupo marítimo Beluga Shipping GmbH. El sistema consiste en equipar al buque de una cometa de grandes dimensiones que aproveche la energía eólica para la propulsión del mismo.

Para ello, es necesario instalar en la proa del barco tres componentes principales:

- Una cometa de tracción de unos 160m² (aproximadamente), fabricada de fibras textiles altamente resistentes a prueba de las inclemencias del tiempo, con un cable de alta resistencia.
- Un mástil en la proa del buque en el que se realizan las maniobras de despegue y aterrizaje por medio de un cabrestante.
- Un sistema de control automático para facilitar las maniobras.

Esto proporcionaría grandes ahorros energéticos ya que se reduciría el consumo de combustible entre un 20% y un 30% (según datos de la empresa SkySails).

[11]

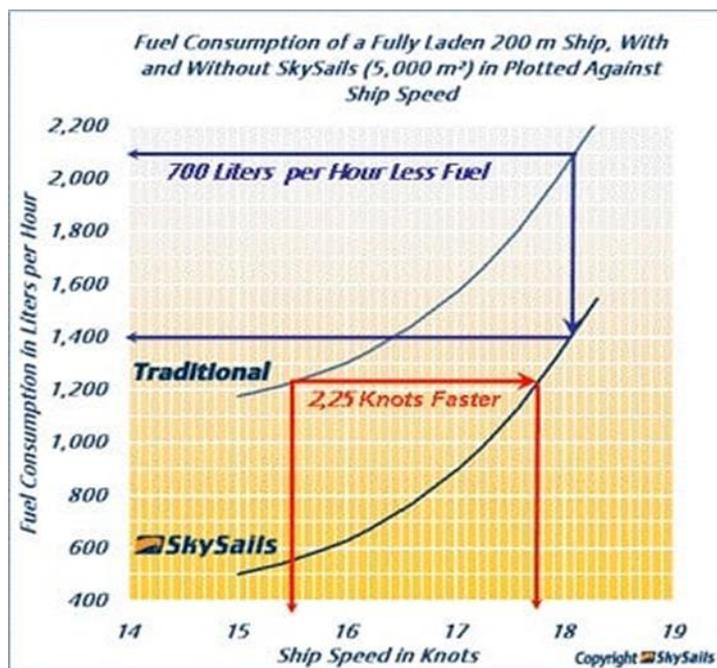
Tabla 18: Sistema SkySails

Sistema	Reducción de NOx	Ventajas	Desventajas
SkySails	20-30%	<ul style="list-style-type: none"> · Gran ahorro de combustible. · Reducción considerable de emisiones. · 	<ul style="list-style-type: none"> · Depende de las condiciones meteorológicas. · Las maniobras durante el uso del sistema son más lentas. · la inversión inicial es elevada.

Fuente: Elaboración propia [6].

La instalación de este sistema en el buque Hespérides, sería pionero en Canarias y favorecería a lograr grandes beneficios en las rutas que realiza entre Canarias, Marruecos y el sur peninsular.

Imagen: 7 Gráfico comparativo del consumo de un buque con y sin cometa



Fuente: <https://ingenieriamarina.wordpress.com/2008/09/12/propulsion-de-buques-asistida-por-energia-eolica/> [11]

VII. CONCLUSIONES.

Visto lo expuesto se ha llegado a la conclusión que para la navegación hace falta cumplir con un número de normativas. El buque Hespérides cumple con la normativa TIER II, la cual le permite navegar en zonas de navegación sin control de emisiones.

Debido a su ruta de navegación en la fecha actual no sería necesaria la modificación de este buque para cumplir con la normativa TIER III, pero al ser Canarias una de sus zonas de navegación más común, no habría que descartarlo. Pues Canarias es una zona de aguas altamente sensibles y con una biosfera bastante protegida, es por todo esto por lo que podría pasar a recibir la asignación de zona de control de emisiones (ECAS y SECAS).

En cuanto al cumplimiento con las emisiones de azufre, la aplicación del scrubber tipo abierto es un gran acierto y solución ya que tanto las rutas de navegación como las instalaciones del buque facilitan a la utilización de éste.

Para finalizar nombrar la gran dificultad para encontrar datos de emisiones reales de los buques, debido a la confidencialidad de las navieras. Ante esto las organizaciones marítimas deberían tomar papel sobre el asunto e imponer por normativa que las navieras expongan al público sus datos de emisiones reales de los diferentes buques que conforman sus flotas; en el que un interesado pueda ver que el buque en realidad cumple con la normativa impuesta para los gases de emisiones contaminantes, a pesar de tener el respaldo de las sociedades clasificadoras.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

[1]

<http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/diesel-engines/wartsila-32>

[2]

<http://cambioclimaticoglobal.com/gasesinv>

[3]

<http://www.concienciaeco.com/2010/08/21/que-es-el-calentamiento-global/>

[4]

www.petrogas.es

[5]

www.wartsila.com

[6]

Elaboración propia

[7]

OMI. (2011), Convenio Marpol Edición refundida de 2011.

[8]

<http://pdf.directindustry.es/pdf/attsu-termica-sl/caldera-vapor-rl/37754-313045.html#open>

[9]

<http://www.prevencionintegral.com/actualidad/noticias/2015/06/21/contaminacion-atmosferica-producida-por-buques-produce-60000-muertes-ano>

[10]

<http://maquinasdebarcos.blogspot.com.es/2015/01/oxidos-de-azufre-en-zonas-de-control-de.html>

[11]

<https://ingenieriamarina.wordpress.com/2008/09/12/propulsion-de-buques-asistida-por-energia-eolica/>

[12]

www.guascor.com

ANEXOS

1. ZONAS CON CONTROL DE EMISIONES DE NO_x:

- **Zona de Norte América** (desde agosto 2012) – Es decir, alrededor de 200 millas de la línea de costa de EEUU (incluyendo Hawaii) y Canadá junto con el territorio de las aguas de Saint-Pierre-et-Miquelon.
- **Zona del Mar Caribe de los Estados Unidos** – Desde 1 de enero 2014

2. ZONAS PARA EL CONTROL DE SO_x Y PARTÍCULAS:

- **Zona del Mar Báltico**; Como es definido en el Anexo I MARPOL.
- **Zona del Mar del Norte**; Como es definido en el Anexo V MARPOL.
- **Zona de Norte América**; Como es definido en el Apéndice VII del Anexo VI MARPOL.
- **Zona del Mar Caribe de los Estados Unidos.**

3. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR PRINCIPAL.

Wärtsilä 8L32, 750 rpm

Wärtsilä 8L32		AE/DE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE IMO Tier 2	AE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE SCR mode	AE SCR mode	ME SCR mode
Engine speed Cylinder output	RPM kW/cyl	750 500	750 500	750 580	750 580	750 580	750 580	750 580	750 580
Engine output	kW	4000	4000	4640	4640	4640	4640	4640	4640
Mean effective pressure	MPa	2.49	2.49	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
Combustion air system (Note 1)									
Flow at 100% load	kg/s	6.98	6.98	8.35	8.35	8.15	8.35	8.35	8.15
Temperature at turbocharger intake, max.	°C	45	45	45	45	45	45	45	45
Air temperature after air cooler (TE 601)	°C	55	55	55	55	55	55	55	55
Exhaust gas system (Note 2)									
Flow at 100% load	kg/s	7.2	7.2	8.6	8.6	8.4	8.6	8.6	8.4
Flow at 85% load	kg/s	6.85	6.61	7.8	7.8	7.5	7.2	7.2	7.2
Flow at 75% load	kg/s	6.2	5.9	7.1	7.1	6.5	6.5	6.5	6.5
Flow at 50% load	kg/s	4.35	4.95	4.8	4.8	4.5	4.8	4.8	4.5
Temperature after turbocharger, 100% load (TE 517)	°C	380	380	350	350	370	350	350	370
Temperature after turbocharger, 85% load (TE 517)	°C	325	336	320	320	330	340	340	340
Temperature after turbocharger, 75% load (TE 517)	°C	325	345	320	320	340	340	340	340
Temperature after turbocharger, 50% load (TE 517)	°C	345	315	360	360	350	360	360	350
Backpressure, max.	kPa	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Calculated pipe diameter for 35m/s	mm	694	694	741	741	744	741	741	744
Heat balance (Note 3)									
Jacket water, HT-circuit	kW	680	680	599	599	587	599	599	587
Charge air, HT-circuit	kW	650	650	1065	1065	1081	1065	1065	1081
Charge air, LT-circuit	kW	530	530	641	641	652	641	641	652
Lubricating oil, LT-circuit	kW	520	520	540	540	528	540	540	528
Radiation	kW	140	140	147	147	147	147	147	147
Fuel system (Note 4)									
Pressure before injection pumps (PT 101)	kPa	700±50	700±50	700±50	700±50	700±50	700±50	700±50	700±50
Engine driven pump capacity (MDF only)	m³/h	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Fuel flow to engine (without engine driven pump), approx.	m³/h	4.1	4.1	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
HFO viscosity before engine	cSt	16...24	16...24	16...24	16...24	16...24	16...24	16...24	16...24
HFO temperature before engine, max. (TE 101)	°C	140	140	140	140	140	140	140	140
MDF viscosity, min	cSt	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
MDF temperature before engine, max. (TE 101)	°C	45	45	45	45	45	45	45	45
Fuel consumption at 100% load, HFO	g/kWh	185	185	184	185	184	184	185	184
Fuel consumption at 85% load, HFO	g/kWh	182	181	181	182	180	183	184	180
Fuel consumption at 75% load, HFO	g/kWh	183	182	181	182	180	183	184	180

Wärtsilä 8L32		AE/DE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE IMO Tier 2	AE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE SCR mode	AE SCR mode	ME SCR mode
Engine speed Cylinder output	RPM kW/cyl	750 500	750 500	750 580	750 580	750 580	750 580	750 580	750 580
Fuel consumption at 50% load, HFO	g/kWh	193	191	188	189	180	190	191	180
Fuel consumption at 100% load, MDF	g/kWh	185	185	183	183	183	183	183	183
Fuel consumption at 85% load, MDF	g/kWh	182	181	180	181	179	181	182	180
Fuel consumption at 75% load, MDF	g/kWh	183	182	180	181	179	181	182	180
Fuel consumption at 50% load, MDF	g/kWh	193	191	187	189	179	188	190	180
Clean leak fuel quantity, MDF at 100% load	kg/h	15.5	15.5	17.8	17.9	17.9	17.8	17.9	17.9
Clean leak fuel quantity, HFO at 100% load	kg/h	3.1	3.1	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Lubricating oil system									
Pressure before bearings, nom. (PT 201)	kPa	500	500	500	500	500	500	500	500
Suction ability main pump, including pipe loss, max.	kPa	30	30	30	30	30	30	30	30
Priming pressure, nom. (PT 201)	kPa	50	50	50	50	50	50	50	50
Suction ability priming pump, including pipe loss, max.	kPa	30	30	30	30	30	30	30	30
Temperature before bearings, nom. (TE 201)	°C	63	63	63	63	63	63	63	63
Temperature after engine, approx.	°C	79	79	79	79	79	79	79	79
Pump capacity (main), engine driven	m³/h	105	105	105	105	105	105	105	105
Pump capacity (main), stand-by	m³/h	95	95	95	95	95	95	95	95
Priming pump capacity, 50Hz/60Hz	m³/h	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9	21.6 / 25.9
Oil volume, wet sump, nom.	m³	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Oil volume in separate system oil tank, nom.	m³	5.4	5.4	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
Oil consumption (100% load), approx.	g/kWh	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Crankcase ventilation flow rate at full load	l/min	1320	1320	1880	1880	1880	1880	1880	1880
Crankcase ventilation backpressure, max.	kPa	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Oil volume in turning device	liters	8.5...9.5	8.5...9.5	8.5...9.5	8.5...9.5	8.5...9.5	8.5...9.5	8.5...9.5	8.5...9.5
Oil volume in speed governor	liters	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Cooling water system									
High temperature cooling water system									
Pressure at engine, after pump, nom. (PT 401)	kPa	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static
Pressure at engine, after pump, max. (PT 401)	kPa	530	530	530	530	530	530	530	530
Temperature before cylinders, approx. (TE 401)	°C	85	85	77	77	77	77	77	77
HT-water out from engine, nom (TE402) (single stage CAC)	°C	96	96	96	96	96	96	96	96
HT-water out from engine, nom (TE432) (two stage CAC)	°C	96	96	96	96	96	96	96	96
Capacity of engine driven pump, nom.	m³/h	75	80	75	75	80	75	75	80
Pressure drop over engine, total (single stage CAC)	kPa	100	100	100	100	100	100	100	100
Pressure drop over engine, total (two stage CAC)	kPa	150	150	150	150	150	150	150	150

Wärtsilä 8L32		AE/DE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE IMO Tier 2	AE IMO Tier 2	ME IMO Tier 2	DE SCR mode	AE SCR mode	ME SCR mode
Engine speed Cylinder output	RPM kW/cyl	750 500	750 500	750 580	750 580	750 580	750 580	750 580	750 580
Pressure drop in external system, max.	kPa	100	100	100	100	100	100	100	100
Pressure from expansion tank	kPa	70...150	70...150	70...150	70...150	70...150	70...150	70...150	70...150
Water volume in engine	m ³	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Low temperature cooling water system									
Pressure at engine, after pump, nom. (PT 451)	kPa	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static	250 + static
Pressure at engine, after pump, max. (PT 451)	kPa	530	530	530	530	530	530	530	530
Temperature before engine (TE 451)	°C	25 ... 38	25 ... 38	25 ... 38	25 ... 38	25 ... 38	25 ... 38	25 ... 38	25 ... 38
Capacity of engine driven pump, nom.	m ³ /h	75	80	75	75	80	75	75	80
Pressure drop over charge air cooler	kPa	35	35	35	35	35	35	35	35
Pressure drop over oil cooler	kPa	30	30	30	30	30	30	30	30
Pressure drop in external system, max.	kPa	100	100	100	100	100	100	100	100
Pressure from expansion tank	kPa	70 ... 150	70 ... 150	70 ... 150	70 ... 150	70 ... 150	70 ... 150	70 ... 150	70 ... 150
Starting air system (Note 5)									
Pressure, nom.	kPa	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Pressure at engine during start, min. (20°C)	kPa	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Pressure, max.	kPa	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Low pressure limit in air vessels	kPa	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Air consumption per start	Nm ³	2.7	-	2.7	2.7	-	2.7	2.7	-
Air consumption per start without propeller shaft engaged	Nm ³	-	2.7	-	-	2.7	-	-	2.7
Air consumption per start with propeller shaft engaged	Nm ³	-	4.3	-	-	4.3	-	-	4.3
Air assist consumption (for engines with 580 kW/cyl)	Nm ³	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33

4. CONVENIO MARPOL ANEXO VI. (reglas 13,14 y 15).

Regla 13

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Ámbito de aplicación

1.1 La presente regla se aplicará:

- .1 a todo motor diésel marino con una potencia de salida superior a 130 kW instalado en un buque; y
- .2 a todo motor diésel marino con una potencia de salida superior a 130 kW que haya sido objeto de una transformación importante el 1 de enero de 2000 o posteriormente, salvo cuando haya quedado demostrado, de manera satisfactoria a juicio de la Administración, que tal motor constituye una sustitución idéntica del motor al que sustituye y no está contemplado en el párrafo 1.1.1 de la presente regla.

1.2 La presente regla no se aplicará:

- .1 a los motores diésel marinos destinados a ser utilizados solamente en caso de emergencia, o únicamente para accionar dispositivos o equipo destinados a ser utilizados solamente en caso de emergencia a bordo del buque en que estén instalados, ni a los motores diésel marinos instalados en botes salvavidas destinados a ser utilizados únicamente en caso de emergencia; ni
- .2 a los motores diésel marinos instalados en buques que estén exclusivamente dedicados a realizar viajes dentro de las aguas sometidas a la soberanía o jurisdicción del Estado cuyo pabellón están autorizados a enarbolar, a condición de que tales motores estén sometidos a otra medida de control de los NO_x establecida por la Administración.

1.3 No obstante lo dispuesto en el párrafo 1.1 de la presente regla, la Administración podrá permitir que la presente regla no se aplique a los motores diésel marinos que se instalen en los buques construidos antes del 19 de mayo de 2005 ni a los motores diésel marinos que sean objeto de una transformación importante antes de esa fecha, a condición de que los buques en que vayan instalados los motores estén exclusivamente dedicados a realizar viajes hacia puertos o terminales mar adentro situados en el Estado cuyo pabellón tienen derecho a enarbolar.

Transformación importante

2.1 A los efectos de la presente regla, por *transformación importante* se entenderá la modificación, el 1 de enero de 2000 o posteriormente, de un motor diésel marino que no haya sido certificado según las normas estipuladas en los párrafos 3, 4 o 5.1.1 de la presente regla, mediante la cual:

- .1 se sustituya el motor por un motor diésel marino o se instale un motor diésel marino adicional, o
- .2 se realice una modificación apreciable del motor, según se define ésta en el Código Técnico sobre los NO_x revisado de 2008, o
- .3 se aumente el régimen nominal máximo continuo del motor en más de un 10 % con respecto al régimen nominal máximo continuo indicado en la certificación original del motor.

2.2 En el caso de una transformación importante que suponga la sustitución de un motor diésel marino por un motor diésel marino no idéntico o la instalación de un motor diésel marino adicional, se aplicarán las normas estipuladas en la presente regla que estén en vigor en el momento de la sustitución o adición del motor. Por lo que respecta únicamente a los motores de sustitución, si el 1 de enero de 2016 o posteriormente no es posible que dicho motor de sustitución se ajuste a las normas indicadas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla (nivel III), ese motor de sustitución habrá de ajustarse a las normas indicadas en el párrafo 4 de la presente regla (nivel II). La Organización elaborará directrices para establecer criterios que sirvan para determinar los casos en que no sea posible que un motor de sustitución se ajuste a las normas indicadas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla.

2.3 Por lo que respecta a los motores diésel marinos mencionados en el párrafo 2.1.2 o 2.1.3, esos motores habrán de ajustarse a las normas siguientes:

- .1 en el caso de los buques construidos antes del 1 de enero de 2000, se aplicarán las normas estipuladas en el párrafo 3 de la presente regla; y
- .2 en el caso de los buques construidos el 1 de enero de 2000 o posteriormente, se aplicarán las normas que estén en vigor en el momento de construirse del buque.

Nivel I

3 A reserva de lo dispuesto en la regla 3 del presente Anexo, se prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel marino instalado en un buque construido el 1 de enero de 2000 o posteriormente y antes del 1 de enero de 2011, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno (calculada en forma de emisión total ponderada de NO_2) emitidos por el motor se encuentre dentro de los límites que figuran a continuación, siendo n el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal):

- .1 17,0 g/kWh si n es inferior a 130 rpm;
- .2 $45 \cdot n^{(-0,2)}$ g/kWh si n es igual o superior a 130 rpm pero inferior a 2 000 rpm;
- .3 9,8 g/kWh si n es igual o superior a 2 000 rpm.

Nivel II

4 A reserva de lo dispuesto en la regla 3 del presente Anexo, se prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel marino instalado en un buque construido el 1 de enero de 2011 o posteriormente, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno (calculada en forma de emisión total ponderada de NO_2) emitidos por el motor se encuentre dentro de los límites que figuran a continuación, siendo n el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal):

- .1 14,4 g/kWh si n es inferior a 130 rpm;
- .2 $44 \cdot n^{(-0,23)}$ g/kWh si n es igual o superior a 130 rpm pero inferior a 2 000 rpm;
- .3 7,7 g/kWh si n es igual o superior a 2 000 rpm.

Nivel III

5.1 A reserva de lo dispuesto en la regla 3 del presente Anexo, el funcionamiento de los motores diésel marinos instalados en buques construidos el 1 de enero de 2016 o posteriormente:

- .1 está prohibido, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno (calculada en forma de emisión total ponderada de NO_2) emitidos por el motor se encuentre dentro de los límites que figuran a continuación, siendo n el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal):
 - .1.1 3,4 g/kWh si n es inferior a 130 rpm;
 - .1.2 $9 \cdot n^{(-0,2)}$ si n es igual o superior a 130 rpm pero inferior a 2 000 rpm; y
 - .1.3 2,0 g/kWh si n es igual o superior a 2 000 rpm;

- .2 está sujeto a las normas indicadas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla si el buque está operando en una zona de control de las emisiones designada en virtud del párrafo 6 de la presente regla; y
 - .3 está sujeto a las normas indicadas en el párrafo 4 de la presente regla si el buque está operando fuera de una zona de control de las emisiones designada en virtud del párrafo 6 de la presente regla.
- 5.2 A reserva del examen establecido en el párrafo 10 de la presente regla, las normas indicadas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla no se aplicarán:
- .1 a los motores diésel marinos instalados en buques de eslora (*L*), según se define ésta en la regla 1.19 del Anexo I del presente Convenio, inferior a 24 m que estén específicamente proyectados, y se utilicen exclusivamente, para fines recreativos; ni
 - .2 a los motores diésel marinos instalados en buques con una potencia combinada de propulsión del motor diésel, según la placa de identificación, inferior a 750 kW, si se demuestra de manera satisfactoria a juicio de la Administración que el buque no puede cumplir las normas estipuladas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla debido a limitaciones de proyecto o construcción del buque.

Zona de control de las emisiones

- 6 A efectos de la presente regla, las zonas de control de las emisiones serán:
- .1 la zona de control de las emisiones de Norteamérica, por la cual se entiende la zona definida por las coordenadas que figuran en el apéndice VII del presente Anexo; y
 - .2 cualquier otra zona marítima, incluidas las portuarias, designada por la Organización de conformidad con los criterios y procedimientos indicados en el apéndice III del presente Anexo.

Motores diésel marinos instalados en buques construidos antes del 1 de enero de 2000

7.1 No obstante lo dispuesto en el párrafo 1.1.1 de la presente regla, los motores diésel marinos con una potencia de salida superior a 5 000 kW y una cilindrada igual o superior a 90 ℓ instalados en buques construidos el 1 de enero de 1990 o posteriormente, pero antes del 1 de enero de 2000, cumplirán los límites de emisión indicados en el párrafo 7.4 de la presente regla, siempre que la Administración de una Parte haya certificado un método aprobado para ese motor y lo haya notificado a la Organización. El cumplimiento de lo dispuesto en el presente párrafo se demostrará mediante uno de los procedimientos siguientes:

- .1 instalación del método aprobado certificado, que haya sido confirmado mediante un reconocimiento en el que se haya utilizado el procedimiento de verificación especificado en el expediente de método aprobado, incluida la debida anotación de la presencia del método aprobado en el Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica del buque; o
- .2 certificación del motor en la que se confirme que el motor funciona dentro de los límites establecidos en los párrafos 3, 4 o 5.1.1 de la presente regla, y la debida anotación de la certificación del motor en el Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica del buque.

7.2 El párrafo 7.1 se aplicará a más tardar en el primer reconocimiento de renovación que se realice, como mínimo, 12 meses después de haberse depositado la notificación indicada en el párrafo 7.1. Si el propietario de un buque en el que vaya a instalarse un método aprobado puede demostrar, de manera satisfactoria a juicio de la Administración, que el método aprobado no estaba disponible comercialmente a pesar de haber hecho todo lo posible por obtenerlo, ese método aprobado se instalará en el buque a más tardar en el primer reconocimiento anual de ese buque que corresponda realizar después de que el método aprobado esté disponible comercialmente.

7.3 Por lo que respecta a los motores diésel marinos con una potencia de salida superior a 5 000 kW y una cilindrada igual o superior a 90 ℓ instalados en buques construidos el 1 de enero de 1990 o posteriormente, pero antes del 1 de enero de 2000, en el Certificado internacional de prevención de la contaminación

atmosférica correspondiente a un motor diésel marino al que se aplique lo dispuesto en el párrafo 7.1 de la presente regla se indicará que se ha aplicado un método aprobado con arreglo a lo dispuesto en el párrafo 7.1.1 de la presente regla, o que el motor se ha certificado con arreglo a lo dispuesto en el párrafo 7.1.2, o que no existe todavía un método aprobado, o que el método aprobado no está todavía disponible comercialmente tal como se describe en el párrafo 7.2 de la presente regla.

7.4 A reserva de lo dispuesto en la regla 3 del presente Anexo, se prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel marino descrito en el párrafo 7.1 de la presente regla, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno (calculada en forma de emisión total ponderada de NO_x) emitidos por el motor se encuentre dentro de los límites que figuran a continuación, siendo n el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal):

- .1 17,0 g/kWh si n es inferior a 130 rpm;
- .2 $45 \cdot n^{(-0,2)}$ g/kWh si n es igual o superior a 130 rpm pero inferior a 2 000 rpm; y
- .3 9,8 g/kWh si n es igual o superior a 2 000 rpm.

7.5 La certificación de un método aprobado se realizará de conformidad con lo dispuesto en el capítulo 7 del Código Técnico sobre los NO_x revisado de 2008, e incluirá la verificación:

- .1 por el proyectista del motor diésel marino de referencia al que se aplique el método aprobado, de que el efecto calculado del método aprobado no reducirá la potencia del motor en más de un 1,0 %, ni aumentará el consumo de combustible en más de un 2,0 %, calculado de conformidad con el ciclo de pruebas correspondiente estipulado en el Código Técnico sobre los NO_x revisado de 2008, ni tendrá un efecto adverso en la durabilidad o fiabilidad del motor; y
- .2 de que el coste del método aprobado no es excesivo, lo cual se determina comparando la cantidad de NO_x reducida por el método aprobado para cumplir la norma establecida en el párrafo 7.4 de la presente regla con el coste de adquirir e instalar dicho método aprobado.*

Certificación

8 La certificación, las pruebas y los procedimientos de medición correspondientes a las normas estipuladas en la presente regla se recogen en el Código Técnico sobre los NO_x revisado de 2008.

9 Los procedimientos para determinar las emisiones de NO_x especificadas en el Código Técnico sobre los NO_x revisado de 2008, tienen por objeto ser representativos del funcionamiento normal del motor. Los dispositivos manipuladores y las estrategias irracionales de control de emisiones van en contra de este propósito, y no están permitidos. La presente regla no prohíbe el uso de dispositivos de control auxiliares que se utilicen para proteger el motor y/o su equipo auxiliar en caso de condiciones de funcionamiento que pudieran ocasionar daños o averías o para facilitar el arranque del motor.

Examen

10 La Organización efectuará un examen, que se iniciará en 2012 y se completará a más tardar en 2013, de los avances tecnológicos que se hayan producido, a fin de implantar las normas indicadas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla y, de ser necesario, ajustará los plazos establecidos en ese párrafo.

* El coste de un método aprobado no deberá exceder de 375 derechos especiales de giro/tonelada métrica de NO_x calculado mediante la siguiente fórmula de eficacia en función de los costes:

$$C_e = \frac{\text{Coste del método aprobado} \cdot 10^6}{P(\text{kW}) \cdot 0,768 \cdot 6\,000(\text{horas/año}) \cdot 5(\text{años}) \cdot \Delta\text{NO}_x(\text{g/kWh})}$$

Véase la circular MEPC.1/Circ.678: «Definiciones de los elementos de la fórmula de eficacia en función de los costes que figura en la regla 13.7.5 del Anexo VI revisado del Convenio MARPOL».

Prescripciones generales

- 1 El contenido de azufre de todo fueloil utilizado a bordo de los buques no excederá los siguientes límites:
 - .1 4,50 % masa/masa antes del 1 de enero de 2012;
 - .2 3,50 % masa/masa el 1 de enero de 2012 y posteriormente; y
 - .3 0,50 % masa/masa el 1 de enero de 2020 y posteriormente.
- 2 El contenido medio de azufre a escala mundial del fueloil residual suministrado para uso a bordo de los buques se vigilará teniendo en cuenta las directrices elaboradas por la Organización.

Prescripciones aplicables en las zonas de control de las emisiones

- 3 A efectos de la presente regla, las zonas de control de las emisiones serán:
 - .1 la zona del mar Báltico definida en la regla 1.11.2 del Anexo I y la zona del mar del Norte definida en la regla 5.1 f) del Anexo V;
 - .2 la zona de Norteamérica definida por las coordenadas que figuran en el apéndice VII del presente Anexo; y
 - .3 cualquier otra zona marítima, incluidas las portuarias, designada por la Organización de conformidad con los criterios y procedimientos indicados en el apéndice III del presente Anexo.
- 4 Mientras los buques operen dentro de las zonas de control de las emisiones, el contenido de azufre del fueloil utilizado a bordo no excederá los siguientes límites:
 - .1 1,50 % masa/masa antes del 1 de julio de 2010;
 - .2 1,00 % masa/masa el 1 de julio de 2010 y posteriormente; y
 - .3 0,10 % masa/masa el 1 de enero de 2015 y posteriormente.
- 5 El proveedor demostrará mediante la pertinente documentación, según lo prescrito en la regla 18 del presente Anexo, el contenido de azufre del fueloil mencionado en los párrafos 1 y 4 de la presente regla.
- 6 En los buques que utilicen fueloil de distintos tipos para cumplir lo prescrito en el párrafo 4 de la presente regla y que entren o salgan de una zona de control de las emisiones indicada en el párrafo 3 de la presente regla, se llevará un procedimiento por escrito que muestre cómo se debe realizar el cambio de fueloil, a fin de prever el tiempo suficiente para limpiar el sistema de distribución de combustible de todo fueloil con un contenido de azufre superior al especificado en el párrafo 4 de la presente regla, antes de entrar en una zona de control de las emisiones. Se anotarán en el libro registro prescrito por la Administración, el volumen de fueloil con bajo contenido de azufre de cada tanque, así como la fecha, la hora y la situación del buque, cuando se lleve a cabo una operación de cambio del fueloil antes de entrar en una zona de control de las emisiones o se inicie tal operación al salir de ella.
- 7 Durante los 12 meses siguientes a una enmienda por la que se designe una zona específica de control de las emisiones en virtud de lo dispuesto en el párrafo 3 de la presente regla, los buques que penetren en dicha zona de control de las emisiones estarán exentos del cumplimiento de las prescripciones de los párrafos 4 y 6 de la presente regla y de las prescripciones del párrafo 5 de la presente regla en lo que respecta al párrafo 4 de la misma.

* Véase la resolución MEPC.192(61): «Directrices para la vigilancia del contenido medio de azufre a escala mundial del fueloil residual suministrado para uso a bordo de los buques, 2010».

Examen de la norma

8 Antes de 2018 se llevará a cabo un examen de la norma especificada en el párrafo 1.3 de la presente regla, con objeto de determinar la disponibilidad de fueloil a fin de cumplir la norma del fueloil que figura en dicho párrafo, y en él se tendrán en cuenta los elementos siguientes:

- .1 el estado de la oferta y la demanda mundial de fueloil para cumplir lo indicado en el párrafo 1.3 de la presente regla, en el momento en que se realice el examen;
- .2 un análisis de las tendencias en los mercados de fueloil; y
- .3 cualquier otra cuestión pertinente.

9 La Organización constituirá un grupo de expertos, integrado por representantes con los conocimientos oportunos sobre el mercado del fueloil y los distintos aspectos marítimos, ambientales, científicos y jurídicos, para que lleve a cabo el examen mencionado en párrafo 8 de la presente regla. El grupo de expertos elaborará la información pertinente para que las Partes puedan decidir con conocimiento de causa.

10 Las Partes, basándose en la información elaborada por el grupo de expertos, podrán decidir si es posible que los buques se ajusten a la fecha que se especifica en el párrafo 1.3 de la presente regla. Si se decide que ello no es posible, la norma indicada en ese párrafo entrará en vigor el 1 de enero de 2025.

Regla 15

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

1 Si las emisiones de COV procedentes de un buque tanque se reglamentan en un puerto o puertos o en una terminal o terminales sometidos a la jurisdicción de una Parte, dicha reglamentación se ajustará a lo dispuesto en la presente regla.

2 Toda Parte que adopte una reglamentación para los buques tanque en relación con las emisiones de COV enviará una notificación a la Organización, en la que se indicarán el tamaño de los buques que se han de controlar, las cargas que requieren el empleo de sistemas de control de las emisiones de vapores y la fecha de entrada en vigor de dicho control. La notificación se enviará por lo menos seis meses antes de la fecha de entrada en vigor.

3 Toda Parte que designe puertos o terminales en los que se vayan a reglamentar las emisiones de COV procedentes de los buques tanque, garantizará que en los puertos y terminales designados existen sistemas de control de la emisión de vapores aprobados por dicha Parte, teniendo en cuenta las normas de seguridad elaboradas al efecto por la Organización,* y que tales sistemas funcionan en condiciones de seguridad y de modo que ningún buque sufra una demora innecesaria.

4 La Organización distribuirá una lista de los puertos y terminales designados por las Partes a las demás Partes y otros Estados Miembros de la Organización, a efectos de información.

5 Todo buque tanque al cual se aplique el párrafo 1 de la presente regla estará provisto de un sistema de recogida de las emisiones de vapores aprobado por la Administración teniendo en cuenta las normas de seguridad elaboradas al efecto por la Organización,* el cual se utilizará durante el embarque de las cargas pertinentes. Todo puerto o terminal que haya instalado sistemas de control de las emisiones de vapores de conformidad con la presente regla podrá aceptar buques tanque que no estén equipados con un sistema de recogida de vapores durante un periodo de tres años a partir de la fecha de entrada en vigor a que se hace referencia en el párrafo 2 de la presente regla.

* Véase la circular MSC/Circ.585: «Normas para los sistemas de control de la emisión de vapores».

5. TECNOLOGÍA DE CONTROL DE EMISIONES.

5.1 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE NO_x.

5.1.1 SISTEMAS PRIMARIOS DE REDUCCIÓN NO_x.

SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE (EGR-EXHAUST GAS RECIRCULATION).

La recirculación de los gases de escape para la reducción de las emisiones de NO_x en motores que queman HFO, tiene por finalidad reducir el oxígeno que contiene el aire de admisión disponible en la zona de combustión, esto genera a un enfriamiento, que produce un descenso en la temperatura de la llama. De esta manera, se reduce la formación de NO (óxidos de nitrógeno) por vía térmica.

Existen dos tipos de sistemas EGR:

-**Sistema EGR (interno)**: realmente no es un sistema, sino un concepto que consiste en aumentar los gases residuales obtenidos durante la carrera de escape lo que conlleva a una reducción de emisiones NO_x. Para lograr esto:

- **Menor cruce de válvulas** (ángulo durante el que las válvulas de admisión y escape están abiertas simultáneamente)
- **Cierre temprano de válvula de escape**
- **Apertura válvula de admisión durante el escape**

-**Sistema EGR (externo)**: es el más empleado, este sistema utiliza la recirculación de gases de escape por medio de una válvula. Esto reduce la temperatura de la llama y con ello la formación de NO, el efecto es aún mayor si se enfrían los gases antes de reintroducirlos en el conducto de admisión.

SISTEMA COMBUSTIÓN CON BAJO EXCESO DE AIRE.

Este sistema es efectivo en la disminución de NO_x durante la quema del combustible. El objetivo es controlar la cantidad de oxígeno en el aire por encima del nivel estequiométrico requerido para lograr el 100% de la combustión. Se utiliza la mínima cantidad de aire en exceso que se requiere para la combustión, de esta manera se dispone de menos oxígeno para la reacción en la zona de altas temperaturas de la llama. Pero, la quema incompleta del combustible provoca emisiones de hidrocarburos, hollín y CO (óxidos de carbono). Para evitar esto, se puede emplear la combustión en dos etapas:

1- El combustible se quema a una temperatura alta, con una cantidad de exceso aire, por ejemplo, del 90 al 95 % del requerido estequiométricamente. La formación de NO se limita por la ausencia de exceso de oxígeno.

2- En la segunda etapa, se quema el combustible a una temperatura relativamente baja en exceso de aire. La baja temperatura evita la formación de NO_x .

La técnica de bajo exceso de aire reduce las emisiones NO_x en un 20%. En plantas térmicas alimentadas con gas se ha llegado a reducir en un 90% por medio de un proceso de combustión de dos etapas.

La mayor desventaja de esta técnica es el exceso de aire puede incrementar las emisiones de CO y pueden reducir la estabilidad de la llama.

SISTEMA DE INYECCIÓN DIRECTA DE AGUA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN (DWI-DIRECT WATER INJECTION).

Esta técnica reduce las emisiones de NO_x entre el 50-60% sin afectar al rendimiento del motor. Los motores con este sistema están equipados con un inyector y una tobera combinada que permite la inyección de agua y fuel oil en el cilindro. La tobera tiene posee dos agujas operadas de forma independiente, lo que significa que de ningún modo afectara la operación del motor.

La inyección de agua se inicia antes de la inyección de combustible en el cilindro con el fin de enfriar la cámara de combustión antes de la ignición combustible para asegurar una baja formación NO_x.

Este sistema posee un mecanismo de seguridad de flujo que actúa, cerrando el paso de agua al cilindro en el caso de un caudal excesivo de agua o goteo.

El agua a alta presión es generada por medio de una bomba de alta presión que se utiliza para aumentar la presión del agua de 200 a 400 bar. También se necesita una bomba de baja presión para asegurar un flujo estable de agua a la bomba de alta presión. Los filtros instalados en el sistema, están instalados antes de la bomba de baja para eliminar todas las partículas sólidas del agua.

Beneficios de la inyección directa de agua:

- Reducción de emisiones un 50-60% de NO_x.
- El motor también puede funcionar sin inyección de agua.
- El motor Puede cambiarse a funcionar “sin agua” en cualquier momento.
- Cuando se activa una alarma, el cambio a “sin agua” es automático e instantáneo.
- Espacio requerido para el equipo es mínimo.
- Bajo costo de inversión.
- Puede instalarse mientras el barco está operando.

EMULSIÓN DE AGUA EN COMBUSTIBLE (WFE-WATER FUEL EMULSION).

La combustión del combustible normalmente es incompleta provocando no sólo emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO_2), sino también de monóxido de carbono (CO) y materia particulada, lo que provoca serios problemas medioambientales. De este modo, en la cámara de combustión se generan depósitos de hollín provocando un aumento en el consumo de combustible y empeoramiento en la refrigeración. Ante esta situación, el sistema de combustible emulsionado se presenta como una alternativa para mejorar la eficiencia y, por tanto, el impacto ambiental de los combustibles diésel.

La tecnología de combustible emulsionado consiste en crear una emulsión estable entre y agua. Se pueden añadir agentes activos que recubren las gotas de agua dispersas de forma microscópica durante todo el proceso e impiden su unión.

Las gotas de combustible líquido de gran tamaño no se queman completamente, generando un residuo carbonoso (hollín) que se acumula en las superficies de la cámara de combustión o se escapa como partículas a través de los gases de escape. El principio de funcionamiento de la tecnología se basa en provocar una segunda atomización, adicional a la que experimenta el combustible convencional, en el interior del motor, caldera. De este modo, cuando las gotas micrométricas del diésel emulsionado son sometidas a las altas temperaturas y presiones del interior de la cámara de combustión, se produce la violenta evaporación del agua contenida. Esta transformación de agua en vapor separa el combustible que lo rodea en gotas mucho más pequeñas que ofrecen un área superficial mucho mayor, lo que mejora de manera significativa la eficiencia de la combustión. Asimismo, la generación de dicho vapor de agua reduce las máximas temperaturas alcanzadas en la combustión, lo que resulta en la menor formación de emisiones NO_x .

ventajas del combustible emulsionado en motores diésel:

- Eficiencia Mejorada.
- Mediante pruebas se ha demostrado que la eficiencia del motor diésel puede incrementarse hasta un 10%.
- Dependiendo del tipo de motor y su estado, las emisiones de contaminantes pueden reducirse de forma significativa, especialmente en el caso de los NO_x, (hasta un 30 % menos), CO (hasta un 60 % menos), de partículas (hasta un 60 % menos) y humos (hasta un 80 % menos).
- Impide la acumulación de carbón en el interior del motor, reduciendo su desgaste.

5.1.2 SISTEMAS SECUNDARIOS DE REDUCCIÓN NO_x.

SISTEMA DE REDUCCIÓN SELECTIVA NO CATALÍTICA (SNCR).

Reducción mediante la inyección de urea o un producto amoniacal (NH₂, NH₃), en la cadena de tratamiento de humos. Las reducciones alcanzadas son de 30-50%. El proceso de reducción selectiva no catalítica (SNCR) es una medida secundaria para la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno. Opera sin catalizador, a temperaturas entre 850-1100°C.

El rango de temperaturas tiene gran importancia, por encima, este el agente reductor puede oxidarse, lo que conlleva la producción de NO_x adicional, mientras que, por debajo de este rango de temperaturas, las reacciones del proceso se pueden ver frenadas, dando lugar a una excesiva emisión de agente reductor no reaccionado.

El tiempo de residencia requerido para estos rangos de temperatura varía entre 0.2-0.5 segundos. Este tiempo de contacto es bastante inestable, por lo que la relación reductora/NO_x debe ser superior a la estequiometría. Se requiere de una optimización de esta relación. La eficiencia de reducción de NO_x es mayor con altas relaciones, pero al mismo tiempo se producen mayores pérdidas de agente

reductor, produciendo problemas con corrosión y ensuciamiento. La relación reductora/ NO_x óptima para neutralizar ambos efectos es de 1.5-2.5.

El equipo de SNCR es fácil de instalar y no requiere mucho espacio, aunque se requiera más de un nivel de inyección. La eficiencia de reducción del proceso SNCR es baja, por lo que solo debe usarse en instalaciones que tengan pequeños niveles de emisión. También puede ser útil en instalaciones que cuenten con medidas primarias de reducción de NO_x .

SISTEMA REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (SCR-SELECTIVE CATALITIC REACTOR).

El proceso de reducción catalítica selectiva se basa en la reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) con la inyección de amoníaco (NH_3), en presencia de exceso de oxígeno (O_2) y un catalizador, todo esto dentro de un rango de temperatura apropiado dan lugar a la transformación de los NO_x en sustancias inocuas tales como el nitrógeno (N_2) y en vapor de agua (H_2O).

El amoníaco necesario para la reducción se obtiene de una disolución de urea al 32,5% en agua.

Las siguientes reacciones son las que deberían darse en el interior del SCR de un NO_x reactivo (NO , NO_2) al combinarse con una solución de Urea en una atmósfera rica en O_2 se obtiene N_2 (sustancia no nociva para la atmósfera) y agua que se evapora.

Dentro de este tipo de catalizadores ocurren tres procesos:

- Mediante una reacción química en la que la disolución de urea se hidrata, obtenemos el amoníaco que necesitamos para la siguiente transformación.
- El amoníaco obtenido se utiliza en la transformación (reducción) de los óxidos de nitrógeno para la obtención de Nitrógeno y Agua.
- El amoníaco sobrante se oxida (se quema) obteniéndose en el proceso nitrógeno y agua.

La adopción del uso combinado del filtro de partículas (DPF) y el catalizador de reducción selectiva (SCR) durante el proceso de salida de gases de escape, permite reducir las emisiones de gases contaminantes o altamente contaminantes en torno a un 80%, logrando así el doble objetivo marcado, el cumplimiento de los umbrales permitidos por la normativa aplicable, sin verse afectado el rendimiento del motor.

ventajas y desventajas del scr.

Ventajas:

- 80-95% de reducción de emisiones NO_x contaminantes.
- Se reducen las emisiones de NO_x hasta 2 g/kWh.
- Este sistema no afecta al rendimiento del motor ya que no incide en la combustión.
- Ocupa poco espacio.
- El control se reduce a la dosificación, cuanto mayor dosificación de amoníaco, es decir solución de urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, mayor eliminación de NO_x .

Desventajas:

- Son caros de instalar, operar y mantener.

5.2 SISTEMAS PARA REDUCIR SO_x .

5.2.1 SISTEMAS SCRUBBERS.

Existen distintos diseños de sistemas marinos de limpieza de gases de escape (conocidos 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**

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 SO_x 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 NO_x como los SO_x 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 NO_x.
- 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.

SCRUBBER HÚMEDO. TIPO ABIERTO.

El agua que se utiliza para el sistema scrubbing, se obtiene del mar, luego es tratado y se descarga de vuelta al mar. Se utiliza la composición natural del agua de mar para neutralizar el SO₂ y eliminarlo. Habitualmente los sistemas abiertos de agua de mar tienen una capacidad de 45m³/MWh para el proceso de scrubbing.

Los Scrubber de Agua de Mar necesita mezclar los gases de escape con el agua salada para disolver los óxidos de azufre. Los fabricantes utilizan diferentes técnicas para lograr la mezcla sin obstruir el paso de los gases de escape, ya que podrían provocar una contrapresión fuera de los límites establecidos por el fabricante del motor y afectar negativamente en 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.

Funcionamiento:

Los sistemas de limpieza de gases de escape de tipo abierto se basan en el funcionamiento de los sistemas de torres de gas inerte empleado para la inertización de tanques. En cambio, en estos sistemas de scrubber para gases de escape, se utiliza el agua de mar para la eliminación de los SO_x de los gases de escape.

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, para no provocar daños en el medio ambiente marino.

SCRUBBER HÚMEDO. TIPO CERRADO.

El sistema de tipo cerrado, utiliza agua dulce tratada con un químico alcalino como soda caustica para neutralizar el SO_x 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.

Funcionamiento.

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 caustica (NaOH). Los SO_x 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.

SCRUBBER HÚMEDO. 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 SO_x.

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 cáustica, 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.

Ventajas:

- El consumo energético del sistema es insignificante.
- Alta eficiencia en la eliminación de partículas sólidas.
- Poco mantenimiento.
- Tratamiento de gases corrosivos, el SO_x forma ácido sulfúrico (H₂SO₄) en combinación con el agua a altas temperaturas
- Mayor tolerancia ante distintos rangos de humedad y temperatura si los comparamos con otros sistemas anti-polución.

Desventajas:

- Concentración de sustancias corrosivas en el interior del sistema
- Alta caída de presión

Generación de residuo líquido que contiene partículas o compuestos tóxicos (ceniza, ácidos...)