

ULL

Universidad
de La Laguna



EMISIONES DE AZUFRE EN ZONAS ECA
PROCEDIMIENTO DE CAMBIO DE COMBUSTIBLE PARA
BUQUES RO/RO

TRABAJO DE FIN DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADUADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

UD INGENIERÍA MARÍTIMA
SECCIÓN NÁUTICA, MÁQUINAS Y RADIOELECTRÓNICA NAVAL
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Santa Cruz de Tenerife

ÓSCAR ALBERTO MEDINA MOSEGUES

JUNIO 2016

D. Alexis Dionis Melián, Profesor Titular de Universidad de la UD de Ingeniería Marítima del Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna, certifica que:

D. Óscar Alberto Medina Mosegues, alumno que ha superado las asignaturas de los cuatro primeros cursos del Grado en Tecnologías Marinas, ha realizado bajo mi dirección y codirección de **D. Juan Ángel García Martín**, el Trabajo Fin de Grado nominado “*Emisiones de azufre en zonas ECA – Procedimiento de cambio para buques RO/RO*” para la Obtención del Título de Graduado en Tecnologías Marinas por la Universidad de La Laguna.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el Tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente certificado en Santa Cruz de Tenerife a 22/06/2016.



D. Alexis Dionis Melián
Director del Trabajo Fin de Grado

D. Juan Ángel García Martín, Profesor Titular de Universidad de la UD de Ingeniería Marítima del Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna, certifica que:

D. Óscar Alberto Medina Mosegues, alumno que ha superado las asignaturas de los cuatro primeros cursos del Grado en Tecnologías Marinas, ha realizado bajo mi dirección y codirección de **D. Alexis Dionis Melián**, el Trabajo Fin de Grado nominado *“Emisiones de azufre en zonas ECA – Procedimiento de cambio para buques RO/RO”* para la Obtención del Título de Graduado en Tecnologías Marinas por la Universidad de La Laguna.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el Tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente certificado en Santa Cruz de Tenerife a 22/06/2016.



D. Juan Ángel García Martín
Director del Trabajo Fin de Grado

En primer lugar, agradecer a los tutores de este trabajo, D. Alexis Dionis Melián y a D. Juan Ángel García Martín por todo el apoyo, dedicación y conocimientos, necesarios para mí en la tarea de realizar este proyecto.

A todos los profesores de la escuela que me han tutelado durante todos estos años, siendo para mí un gran apoyo y una fuente de aprendizaje ilimitada.

Agradecer a todo el personal del sector marítimo que me ha acogido durante mis prácticas profesionales y extracurriculares, así como en otros muchos momentos de mi carrera para atender todas y cada una de mis curiosidades, quienes me aconsejaron y enseñaron cuanto estaba en su mano.

A la naviera que me brindó la gran oportunidad de realizar todo el período de prácticas profesionales en varios de sus buques y, en especial, a David Hernández por la atención y sabiduría que me ha regalado durante estos últimos años, así como su cariño y amistad.

A mi gran familia, en especial a mis padres y mi hermana, quienes han convivido conmigo durante todo este tiempo, así como también han sufrido y compartido cualquiera de mis malos momentos, dándome la fuerza que necesitaba con su incondicional apoyo. Sé que siempre han estado, están y estarán conmigo por muy lejos que vaya para seguir creciendo personal y profesionalmente.

A las personas, compañeros y amigos que de algún modo han estado presente en estos cuatro años de carrera, por el buen compañerismo, por el apoyo y las innumerables experiencias que hemos vivido. Y en especial a Marta H. Alegre por jugar un papel muy importante en mi vida todo este tiempo.

A todas esas personas especiales que me rodean y sobre todo, a mi prima pequeña Iria, que sin estar ya en esta vida no ha dejado de acompañarme cuando más lejos estaba.

ÍNDICE

ÍNDICE

I.	Introducción	Pág .1
II.	Objetivos	Pág .9
	1. Objetivos generales	Pág .11
	2. Objetivos específicos	Pág .11
III.	Revisión y antecedentes	Pág .13
	1. Sistemas de propulsión empleados en aplicaciones marinas	Pág .15
	1.1 Sistemas de propulsión comunes	Pág .15
	1.2 ¿Por qué motor diésel?	Pág .18
	1.3 Factores en la formación de gases contaminantes	Pág .19
	1.4 Cómo enfrentar las emisiones de NOx	Pág .20
	2. Contaminación atmosférica y sus principales consecuencias	Pág .22
	2.1 Principales efectos de la contaminación	Pág .23
	2.1.1 La lluvia ácida	Pág .23
	2.1.2 Cambio climático y efecto invernadero	Pág .26
	2.2 Agentes contaminantes	Pág .34
	2.2.1 Óxidos de nitrógeno	Pág .36
	2.2.2 Dióxidos de carbono	Pág .37
	2.2.3 Monóxido de carbono	Pág .38
	2.2.4 Dióxido de azufre	Pág .38
	2.2.5 Trióxido de azufre	Pág .39
	2.2.6 Óxidos de azufre	Pág .39
	3. Anexo VI Convenio MARPOL	Pág .43
	3.1 Antecedentes	Pág .43
	3.2 Acuerdos de la OMI con respecto a la contaminación atmosférica	Pág .45
	3.3 Protocolo de 1997- Introducción de un nuevo Anexo	Pág .47

3.3.1	Disposiciones del Anexo VI	Pág .48
3.3.2	Código Técnico	Pág .50
3.3.2.1	Artículos más importantes que trata dicho código	Pág .51
3.3.2.2.	Ámbito de aplicación	Pág .52
3.4	Nuevas enmiendas sobre los límites de emisiones	Pág .53
3.5	Zona ECA (Emission Control Areas)	Pág .55
3.6	Contenido de azufre en el combustible	Pág .57
3.7.	Otras propuestas para mejorar las disposiciones del Anexo VI	Pág .61
4.	Métodos para la reducción de las emisiones de SO _x	Pág .69
4.1.	Métodos primarios	Pág .69
4.2.	Otros métodos	Pág .70
4.3.	Procedimiento de cambio para entrar en una zona seca	Pág .72
4.4	Aspectos a tener en cuenta	Pág .77
IV.	Material y métodos	Pág .79
1.	Material	Pág .81
1.1	Buque Galicia	Pág .81
2.	Metodología	Pág .98
V.	Resultados	Pág .105
1.	Legislación aplicable	Pág .108
1.1	Prescripciones generales	Pág .108
1.2.	Prescripciones aplicables a una zona seca	Pág .109
1.3.	Examen de la norma	Pág .110
2.	Condiciones de viscosidad del fuel	Pág .112
3.	Tanques y circuitos de combustible	Pág .113
4.	Evaluación de las medidas a tomar	Pág .122

ÍNDICE

4.1. Cambios a proceder	Pág .122
5. Tanques comprometidos en la operativa	Pág .134
6. Cálculo del volumen de fuel en el sistema	Pág .135
7. Consumo de los motores principales	Pág .139
8. Cambio de un combustible a otro	Pág .141
9. Calculadoras de tiempo de cambio y dilución de combustible	Pág .143
10. Procedimiento de cambio de combustible	Pág .150
10.1. Consideraciones generales	Pág .150
10.2. Operaciones previas	Pág .151
10.3. Cómo proceder al cambio paso a paso	Pág .151
10.4. Acciones en puerto con gasoil	Pág .154
11. Primer cambio	Pág .155
VI. Conclusiones	Pág .167
VII. Bibliografía	Pág .171

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Motor diesel 4 tiempos	Pág .19
Ilustración 2: Contaminación atmosférica	Pág .23
Ilustración 3: Lluvia ácida y sus efectos	Pág .24
Ilustración 4: Gases de efecto invernadero	Pág .28
Ilustración 5: Efecto invernadero	Pág .29
Ilustración 6: Efecto Albedo	Pág .31
Ilustración 7: Convenio MARPOL	Pág .43
Ilustración 8: Designación zonas ECA	Pág .57
Ilustración 9: Límites geográficos de aplicación de la zona de control de emisiones de SOx	Pág .60
Ilustración 10: Logotipo OMI	Pág .61
Ilustración 11: Mar Báltico y puertos pertenecientes a una zona micro-SECA	Pág .63
Ilustración 12: Varias de las asociaciones en el debate de la contaminación en puertos.	Pág .64
Ilustración 13: Buque Galicia	Pág .82
Ilustración 14: Plano de disposición de las cubiertas	Pág .84
Ilustración 15: Cubierta de botes y chimenea	Pág .85
Ilustración 16: Plano disposición de cámara de máquinas. Tecele alto	Pág .86
Ilustración 17: Cabina de control de máquinas (I)	Pág .87
Ilustración 18: Cabina de control de máquinas (II)	Pág .87
Ilustración 19: Generador auxiliar	Pág .88
Ilustración 20: Depuradoras de combustible y aceite	Pág .89
Ilustración 21: Cisterna	Pág .90
Ilustración 22: Enfriadores de alta y baja temperatura	Pág .91

Ilustración 23: Plano disposición de cámara de máquinas. Tecele bajo.	Pág .92
Ilustración 24: Motor principal	Pág .94
Ilustración 25: Reductora de motor principal	Pág .94
Ilustración 26: Central hidráulica de HPV	Pág .95
Ilustración 27: Chumacera	Pág .96
Ilustración 28: Alternador	Pág .96
Ilustración 29: Bombas de trasiego de FO y GO	Pág .97
Ilustración 30: Bombas de agua salada	Pág .97
Ilustración 31: Bombas de agua dulce	Pág .98
Ilustración 32: Documentación referente al Sistema de Gestión de la Seguridad	Pág .100
Ilustración 33: Indicadores Cabina de Control	Pág .101
Ilustración 34: Bomba de inyección extraída	Pág .102
Ilustración 35: Culata desmontada	Pág .103
Ilustración 36: Bombas de trasiego de combustible	Pág .114
Ilustración 37: Plano servicio de trasiego y purificación de fuel	Pág .117
Ilustración 38: Módulo de combustible	Pág .118
Ilustración 39: Plano servicio de trasiego y purificación de gasoil	Pág .120
Ilustración 40: Plano modificado del sistema de combustible	Pág .125
Ilustración 41: Pinchazo en la toma de consumo hacia 13 Er	Pág .126
Ilustración 42: Pinchazo en la línea de la depuradora de GO y salida hacia tanque de reboses	Pág .127
Ilustración 43: Pinchazo en la aspiración del tanque 13 Er	Pág .128
Ilustración 44: Pinchazo en la línea de trasiego con el tanque 26C y reboses	Pág .128
Ilustración 45: Plano representativo de nuevas líneas y elementos en el sistema de combustible	Pág .129

ÍNDICE

Ilustración 46: Nuevo enfriador de gasoil	Pág .130
Ilustración 47: Imagen virtual del enfriador instalado	Pág .131
Ilustración 48: Bombas Feeder y Booster	Pág .132
Ilustración 49: Plano representativo de las líneas desde el módulo de combustible hacia los motores principales	Pág .133
Ilustración 50: Circuito de combustible	Pág .135
Ilustración 51: Válvula de aspiración del tanque 28Br	Pág .142
Ilustración 52: Captura de la calculadora DNVGL	Pág .144
Ilustración 53: Gráficos del contenido de azufre en la mezcla	Pág .145
Ilustración 54: Captura de la herramienta FOBAS	Pág .146
Ilustración 55: Filtros bombas Feeder y Booster	Pág .157
Ilustración 56: Gráfica T(°C)/t en el momento de entrada a zona SECA	Pág .158
Ilustración 57: Conjunto bomba de inyección	Pág .159
Ilustración 58: Plantilla Drew Marine Calculator	Pág .160

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Emisiones de gases efecto invernadero	Pág .4
Gráfico 2: Emisión de gases de efecto invernadero de los diversos medios de transporte	Pág .4
Gráfico 3: Sistemas de propulsión de buques	Pág .17
Gráfico 4: Tipos de motor diesel	Pág .18
Gráfico 5: Evolución temporal de la concentración de CO ₂ y el aumento de la temperatura terrestre.	Pág .34
Gráfico 6: Límites de emisiones de NO _x en función de la velocidad nominal de la máquina	Pág .54
Gráfico 7: Fechas de aplicación de los límites del contenido de azufre en el fuel.	Pág .58
Gráfico 8: Diagrama de los tiempos de cambio entre los distintos tipos de fuel	Pág .76
Gráfico 9: Contenido de azufre con respecto al tiempo	Pág .163
Gráfico 10: Dilución de combustible con respecto al tiempo	Pág .164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Contribución real de diversos gases al efecto invernadero	Pág .33
Tabla 2: Niveles de concentración del aire limpio y el aire contaminado	Pág .35
Tabla 3: Grupos de contaminantes de la atmósfera	Pág .36
Tabla 4: Limite de las emisiones de NOx y factor de ponderación para ciclos de ensayo	Pág .49
Tabla 5: Fechas de aplicación de los límites de emisiones	Pág .54
Tabla 6: Fechas de aplicación de los límites del contenido de azufre en el fuel	Pág .58
Tabla 7: Tiempos de cambio entre distintos tipos de fuel	Pág .75
Tabla 8: Tripulación del MV Galicia	Pág .83
Tabla 9: Características generales del buque MV Galicia	Pág .83
Tabla 10: Características del motor principal	Pág .93
Tabla 11: Características reductora MMPP	Pág .93
Tabla 12: Capacidades iniciales de los tanques de fuel	Pág .113
Tabla 13: Capacidades iniciales de los tanques de gasoil	Pág .114
Tabla 14: Capacidades de los tanques de FO después de la adaptación	Pág .134
Tabla 15: Capacidades de los tanques de GO después de la adaptación	Pág .134
Tabla 16: Tuberías que conforman el sistema de combustible	Pág .137
Tabla 17: Otros componentes del sistema de combustible	Pág .137
Tabla 18: Consumos con uno y dos motores principales	Pág .139
Tabla 19: Representación del tiempo de dilución de combustible según Drew Marine	Pág .174
Tabla 20: Último consumo y cualidades del combustible	Pág .161
Tabla 21: Datos de entrada a una zona de control	Pág .161

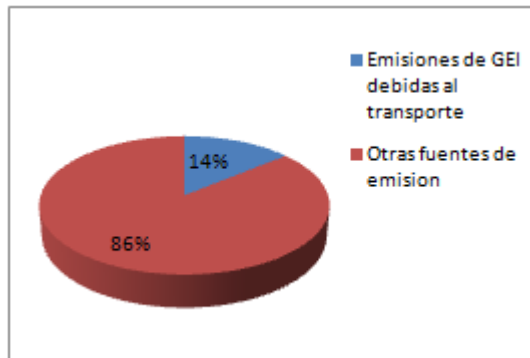
I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de la sociedad actual está íntimamente ligado al uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) como fuentes de energía, cuya utilización en las modernas sociedades industriales representa el 80% del CO₂ que se emite en la actualidad a la atmósfera. Según diversos estudios el 13,5% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial se deben al transporte en sus diversos ámbitos, teniendo en cuenta la importancia del transporte en el desarrollo de la sociedad y la dependencia que tienen los medios de transporte actuales de los combustibles fósiles, se puede entender la necesidad de tomar medidas con el fin de disminuir el nivel de emisiones contaminantes a la atmósfera.

En el debate actual sobre el cambio climático, el transporte marítimo merece ser considerado como la mejor solución disponible a las necesidades globales de transporte.

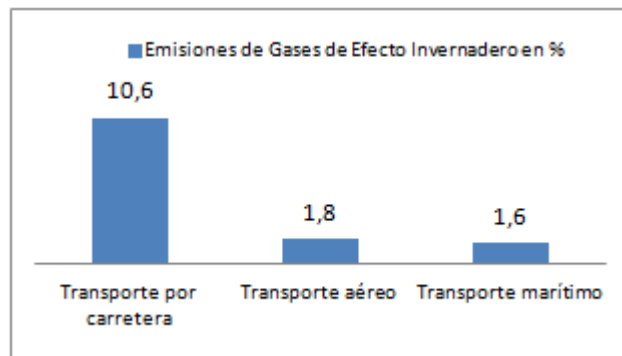
El buque es el modo de transporte más eficiente en términos de consumo de combustible por unidad de transporte (tonelada por km) y constituye la columna vertebral del comercio global. En relación con la enorme cantidad de mercancías que transportan (7.500 millones de toneladas/año) las emisiones de CO₂ producidas por los buques son muy reducidas. El “*Stern Review on the Economics of Climate Change*”, de octubre de 2006, estima que en 2000 el conjunto de todos los modos de transporte generaban un 14% de las emisiones globales de GEI (Gases de Efecto Invernadero), una participación que se espera no varíe sensiblemente hasta 2050. El 10,6% de las emisiones del transporte correspondería con el transporte por carretera, el 1,8% al transporte aéreo y el 1,6% restante al transporte marítimo.

Gráfico 1: Emisiones de gases de efecto invernadero.



Fuente: <http://anave.es/> (Elaboración propia)

Gráfico 2: Emisión de gases efecto invernadero de los diversos medios de transporte.



Fuente: <http://anave.es/> (Elaboración propia)

Por ello, en la lucha contra el cambio climático, el transporte marítimo no es el problema, sino parte de las soluciones. Incentivando el transporte marítimo, se reducirían las emisiones de CO₂ debidas al transporte. En este sentido avanzan las políticas de la Unión Europea apoyando el desarrollo del Short Sea Shipping, para reducir la congestión del tráfico en las carreteras.

Según señala la asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España (AINE), un buque mercante evita el tráfico de unos 25.000 camiones circulando por carretera al año y supone que se emiten entre 75.000 y 100.000 toneladas menos

de CO₂ a la atmósfera. Según AINE: *“Por cada tonelada por km transportada por mar se emiten 10 veces menos de CO₂ que por tierra. La carretera genera más del 80% de estas emisiones, mientras que el transporte marítimo se mantiene en este campo como el modo menos contaminante: 0,479 g/(t x km) de CO₂ por carretera, frente a 0,036 por buque, es decir, 13 veces menos. Algo parecido se puede afirmar de las emisiones a la atmósfera de óxidos de nitrógeno (NO_x): del total de este tipo de emisiones en la Unión Europea, el 51% procede de los vehículos por carretera y solo un 12% de los otros medios de transporte”*.

No obstante, debido al ingente volumen de mercancías transportadas, las emisiones de CO₂ de los buques, en términos absolutos, suponen cifras elevadas, que sería posible reducir. Además los buques emiten otros gases contaminantes, como los óxidos de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), que han sido objeto en los últimos años de una regulación muy exigente en el transporte terrestre, lo que no favorece al transporte marítimo en caso de comparación.

Dentro del ámbito que nos atañe, que es el del transporte marítimo, cualquier profesional del sector sabe que la regulación medioambiental en sus diferentes facetas es el reto más importante a que tiene que enfrentarse nuestro sector en los próximos años.

Existe una amplia regulación internacional para prevenir y compensar los daños por contaminación marina, sea por transporte de hidrocarburos en buques tanque, o por sustancias nocivas y peligrosas, así como la prevención de la contaminación por mercancías envasadas y basuras procedentes de los buques, que han hecho posible reducir un 85% en los últimos 15 años la contaminación accidental procedente de buques y una reducción drástica, de la debida a prácticas operacionales.

La reducción de las emisiones a la atmósfera de gases contaminantes procedentes de los buques es objeto de regulación en el Anexo VI de MARPOL (“Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships”).

Como alumno de máquinas de la empresa “Flota Suardiaz” en buques de carga rodada (Ro-Ro) durante diez meses, hemos adquirido la noción del importante efecto que suponen las emisiones de los gases contaminantes a la atmósfera en el sector marítimo en la actualidad, puesto que no se interpreta como un simple hecho asumible por las empresas navieras, sino como un aspecto importante a tener en cuenta para mejorar en la lucha contra las emisiones globales del transporte mundial de mercancías y personas.

Con la ayuda de navieras como Suardiaz, cumpliendo con lo dispuesto en el Convenio MARPOL referente al control de emisiones como solución al problema que nos atañe, se comprende la posibilidad de llevar a cabo dichos procesos de mejoras en cuanto a las emisiones de agentes contaminantes como el SO_x en un buque mercante cuya planta propulsora se basa en dos motores diésel comunes.

A lo largo del presente trabajo estudiaremos la evolución y alcance de las emisiones de los gases contaminantes a la atmósfera terrestre, así como también las medidas dispuestas por el Anexo VI del Convenio MARPOL “Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”. Del mismo modo estudiaremos cómo afecta dicha legislación al buque “Ro/Ro Galicia” y las medidas que ha de adoptar el buque para cumplir con las exigencias del Convenio, detallando las modificaciones sufridas en la sala de máquinas y el uso de un combustible apto para poder desarrollar de manera eficiente la navegación dentro una zona de control de emisiones.

Dicho estudio lo realizaremos desde el punto de vista legislativo y desde el punto de vista práctico, realizando por un lado, un examen de los estudios llevados a cabo durante los trabajos del Convenio MARPOL para lograr el Anexo vigente hoy día, y por otro lado, tomando como modelo de estudio la adaptación sufrida por el buque Galicia durante mi periodo de embarque como alumno de máquinas, así como las mejoras del mismo en cuanto a las emisiones de SO_x y los procedimientos para cumplir con lo establecido por la regla.

El presente trabajo se divide en seis capítulos. El capítulo de **Objetivos** se divide a su vez en dos apartados, partiendo del objetivo general que se pretende alcanzar a través de los objetivos específicos.

En el capítulo de **Revisión y Antecedentes** se hará un balance de los sistemas de propulsión actuales y sus consecuencias en la atmósfera. También se fundamentarán los antecedentes al Anexo VI del Convenio MARPOL, así como la definición de sus métodos y otros conceptos.

En el capítulo **Material y Métodos** se presentará el buque que ha servido como modelo para desarrollar el presente trabajo, así como la metodología tomada durante mi experiencia como alumno de máquinas durante el período de embarque, que dará pie al capítulo de Resultados.

En el capítulo de **Resultados** vamos a desarrollar el trabajo de campo realizado en el que analizamos la operativa del departamento de máquinas antes y después de sufrir las modificaciones pertinentes para poder cumplir con un límite de emisiones establecido previamente, así como también desarrollaremos los procedimientos llevados a la práctica y los métodos de manipulación del nuevo combustible.

Por último, expondremos las **Conclusiones** obtenidas del estudio del presente trabajo con respecto a los objetivos detallados al comienzo del mismo.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

La contaminación por emisión de agentes contaminantes, como es el SOx entre otros, es un efecto perjudicial para la atmósfera y un riesgo a largo plazo si no se toman las medidas oportunas a tiempo, siendo la aplicación y cumplimiento de las Reglas establecidas en el Anexo VI del Convenio Marpol “Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por los buques” vital para continuar desarrollando la actividad del transporte marítimo cada vez con mejores resultados. Este es un aspecto que no debe atemorizar a las compañías navieras sino animarlas a sumarse a los continuos progresos que se presentan en estos tiempos, realizando las modificaciones necesarias para contribuir a una emisión tolerante de agentes contaminantes.

Es por ello que el objetivo principal de este trabajo es demostrar la viabilidad de realizar los procedimientos y métodos exigidos por el Convenio MARPOL y, en consecuencia, la eficiencia en cuanto a emisiones de SOx.

1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un estudio sobre los sistemas de propulsión más comunes, así como determinar la importancia del impacto que supone la contaminación atmosférica.
2. Enumerar y destacar los métodos de prevención de la contaminación y de la reducción de emisiones de gases contaminantes.
3. Realizar un examen de la legislación del Anexo VI (Revisado) del Convenio MARPOL, así como de las prescripciones generales y aplicables a las zonas de control que afectan a la navegabilidad del buque.

4. Examinar el buque modelo desde el punto de vista del comportamiento de la máquina propulsora, en el que basaremos un procedimiento de cambio de combustible para acceder a una zona de control de emisiones.
5. Evaluar los cambios que ha sufrido el buque tras la adopción de mejoras en cuanto a emisiones de azufre.

III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES

1. SISTEMAS DE PROPULSIÓN EMPLEADOS EN APLICACIONES MARINAS.

En el presente apartado realizaremos un estudio sobre los sistemas de propulsión más comunes empleados en el transporte marítimo. Del mismo modo, repasaremos los factores influyentes en la formación de gases contaminantes, así como las técnicas y métodos para reducirlos.

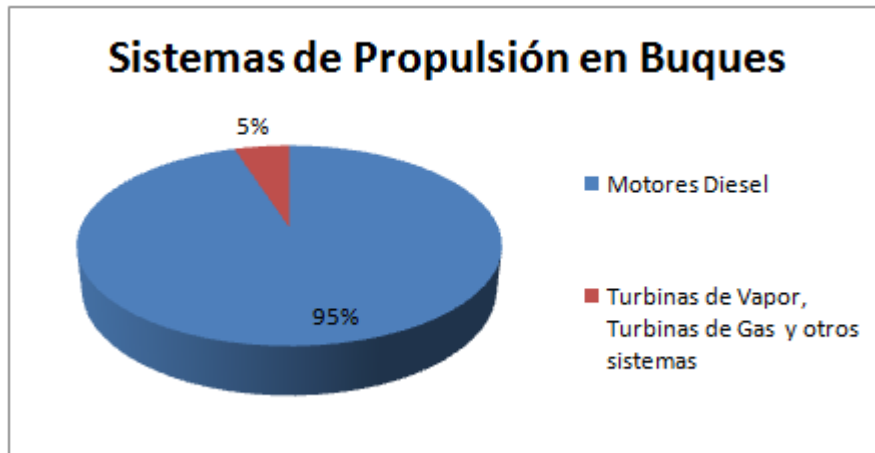
1.1. SISTEMAS DE PROPULSIÓN MÁS COMUNES.

La flota mercante mundial está compuesta por aproximadamente unos 90.000 buques con un GT superior a 100 t., de los cuales aproximadamente la mitad están dedicados al transporte de mercancías.

Esto significa que existen unos 120.000 motores destinados específicamente a la propulsión instalados en los buques, motores que desarrollan en conjunto una potencia de casi 300.000 MW.

Se ha realizado un estudio comparativo [1] sobre cuáles son los sistemas de propulsión marina más comunes, obteniendo como resultado que alrededor del 95% de los buques opera con motores de combustión o “diésel”, y que solamente el 5% emplea otros sistemas, basados fundamentalmente en la utilización de equipos formados por turbinas de gas, de vapor o incluso en algunos casos por medio de máquinas de vapor alternativas (Gráfico: 3).

Gráfico 3: Sistemas de propulsión de buques



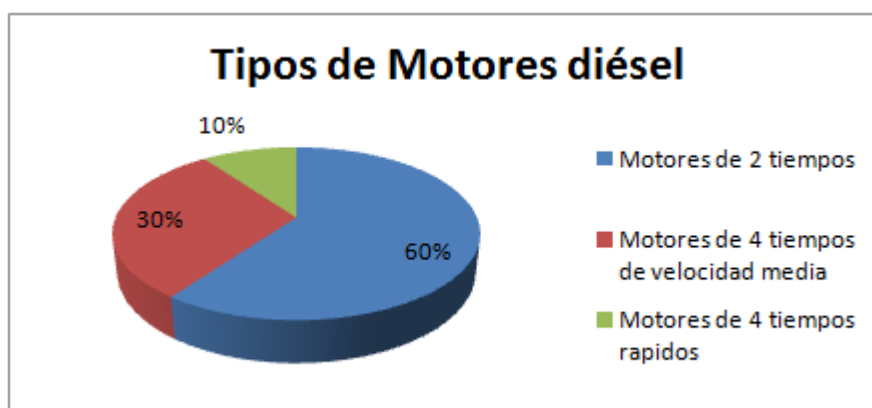
Fuente: <http://anave.es/> (Elaboración propia) [1]

Entre los motores diésel más comunes, destacan los motores lentos de dos tiempos, que constituyen el 60% de los motores instalados, seguidos por los de cuatro tiempos y velocidad media, y a continuación los motores rápidos de cuatro tiempos (Gráfico: 4).

En el campo de las turbinas se han consolidado de manera firme las turbinas de gas derivadas de las aéreas, aunque sus aplicaciones prácticas dentro del transporte marítimo están limitadas a las embarcaciones de alta velocidad, las turbinas de vapor son utilizadas en los grandes buques de transporte de gas natural (L.N.G) por la ventaja de poder quemar en las calderas de vapor el gas evaporado de los tanques de carga (Boil-off).

Los motores de cuatro tiempos y velocidad media conforman el 25 o 30% del total del sistema de propulsión en buques, su velocidad oscila entre 250 rpm hasta 1.100-1.200 rpm y se instalan principalmente en ferries, buques de pasaje, dragas, buques de carga general o remolcadores. La energía que desarrollan puede destinarse únicamente a la propulsión, utilizarse como energías auxiliares o ambas a la vez.

Gráfico 4: Tipos de motor diésel



Fuente: <http://anave.es/> (Elaboración propia) [1]

En buques de pasaje de nueva construcción es muy común el sistema de propulsión diésel-eléctrico, consistente en una planta diésel que reparte el total de la energía eléctrica producida en la propulsión del buque a través de motores eléctricos y en la demanda de la misma a bordo.

Habitualmente los buques petroleros, gaseros o portacontenedores de gran tamaño navegan con motores lentos de dos tiempos. Únicamente se utilizan como motores de propulsión y sus regímenes de trabajo varían entre 200 rpm para los motores más pequeños y 76 rpm para los más grandes, adecuados para impulsar la hélice directamente sin que sea necesario incorporar ningún mecanismo reductor entre el motor y el eje de la hélice.

A modo de ejemplo, decir que existen motores de dos tiempos en el mercado que desarrollan 97.300 kW a una velocidad de 92 rpm, que consumen a diario a plena carga unas 400 t/día.

1.2. ¿POR QUÉ EL MOTOR DIÉSEL?

Ilustración 1: Motor diesel de 4 tiempos.



Fuente: <http://img.directindustry.es/> [2]

Las razones principales por las que prevalece la utilización de los motores diésel dentro de la industria marítima frente a otros sistemas de propulsión pueden resumirse como sigue [3]:

- Proporciona un rendimiento global mayor frente a otros motores. Los motores diésel de velocidad media alcanzan niveles de rendimiento por encima del 45% y los de baja velocidad por encima del 53%, lo cual significa un bajo índice de consumo de combustible, bajos costos de operación y reducidas emisiones de CO₂ en la exhaustación de los gases.
- La posibilidad de funcionar con diferentes tipos de combustibles: fuel pesado (HFO), gasóleo (GO), diésel marino (MDO) y combustibles gaseosos tales como el gas natural, gas licuado o hidrógeno.
- Una vida prolongada de los elementos del motor, periodos de tiempo amplios entre reparaciones, así como la posibilidad de realizar el mantenimiento por parte de la tripulación del buque, lo que implica una mano de obra más económica y menos exigencias para su realización.

Dentro del diseño de un motor diésel para propulsión, el esfuerzo de los ingenieros se centra fundamentalmente en dos aspectos:

- Reducir los costes de fabricación,
- Reducir el número de elementos que conforman el motor, para lograr que el mantenimiento sea más sencillo, así como tener en cuenta una serie de directrices orientadas a satisfacer las necesidades del cliente.

Pero otro de los retos con los que se encuentra la industria consiste en resolver uno de los grandes problemas del motor: la compensación entre los agentes contaminantes implicados en el resultado de la combustión del motor.

El objetivo de cualquier ingeniero que diseñe motores es construir un motor que sea técnicamente más avanzado y eficiente, de modo que permita reducir el consumo de combustible, reduciendo así tanto los costes de operación como las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y compuestos orgánicos volátiles como la carbonilla o el hollín.

Por el contrario, un motor que desarrolle un alto rendimiento producirá rápidamente, debido a sus altas temperaturas de combustión, óxidos de nitrógeno tóxicos (NO_x), emisiones que están hoy en día reguladas mediante la legislación nacional e internacional.

1.3. FACTORES EN LA FORMACIÓN DE GASES CONTAMINANTES.

Las emisiones de gases de escape en los grandes motores marinos comprenden nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, con pequeñas cantidades de monóxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno, hidrocarburos parcialmente quemados y partículas. Las emisiones de SO_x y NO_x, junto con el dióxido de carbono son de interés especial por sus efectos en la salud humana y en el medioambiente. [4]

Los factores determinantes de la formación de NO_x en la cámara de combustión son la temperatura y el tiempo de residencia a alta temperatura. Cuanto más altos sean estos dos factores, mayor será la cantidad de NO_x formado.

1.4. CÓMO ENFRENTAR LAS EMISIONES DE NO_x.

En la actualidad, la industria está aplicando dos técnicas diferentes para reducir las emisiones de NO_x. Por un lado están los métodos primarios cuya finalidad es el control de la combustión, disminuyendo la concentración de oxígeno y la temperatura máxima de combustión y, por otro lado, están los métodos secundarios cuya finalidad es el tratamiento de los gases de combustión.

Los métodos primarios incluyen [5]

- Reducción de la presión máxima de combustión por retardo de la inyección, recirculación de los gases de escape (Exhaust Gas Recirculation), la humidificación del aire de combustión (Humid Air Motor), reducción de la cantidad de aire de barrido, inyección de agua en la cámara de combustión o uso de combustible emulsionado, el empleo de toberas especiales y el control de la inyección.
- La reducción de la presión de combustión por medio del retraso de la inyección baja rápidamente las temperaturas máximas y conduce a menor formación de los NO_x, pero eso también reduce invariablemente las máximas temperaturas del ciclo y ello implica un mayor consumo de combustible.
- Los diferentes inyectores y tipos de toberas tienen un impacto importante sobre la formación de los NO_x, así como en los humos y en la emisión de hidrocarburos. El gradiente de inyección tiene también un efecto importante sobre las emisiones. La influencia en los NO_x es debida al control ejercido por el sistema de inyección en la formación de la mezcla

combustible/aire y de la combustión consiguiente, del valor de la temperatura local de la llama y de la concentración de oxígeno en la zona de combustible.

Los métodos secundarios se basan en el tratamiento del caudal de gas de escape, por medio de varios métodos como la catálisis con urea o amoníaco, filtros de partículas, desulfuración, trampas de oxidación, etc...

2. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS PRINCIPALES CONSECUENCIAS

Ilustración 2: Contaminación atmosférica



Fuente: <http://s1064.photobucket.com/>

La atmósfera es esencial para la vida, por lo que sus alteraciones tienen una gran repercusión en el hombre y otros seres vivos y en general, en todo el planeta. Es un medio extraordinariamente complejo y la situación se hace todavía más complicada y difícil de estudiar cuando se le añaden emisiones de origen humano en gran cantidad, como está sucediendo en estas últimas décadas.

La contaminación atmosférica hace referencia a la alteración de la atmósfera terrestre por la adición de gases, o partículas sólidas o líquidas en suspensión en proporciones distintas a las naturales.

El nombre de contaminación atmosférica se aplica por lo general [6] a las alteraciones que tienen efectos perjudiciales sobre la salud de los seres vivos y los elementos materiales, y no a otras alteraciones inocuas. Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes como el ozono, que está considerado como un contaminante secundario y cuya formación es debida a la interacción de

hidrocarburos y óxidos de nitrógeno bajo la influencia de la luz solar. Igualmente, algunas industrias emiten gases nocivos en sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos inquemados.

La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones del mismo, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio general del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores.

2.1. PRINCIPALES EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN

2.1.1. LA LLUVIA ÁCIDA

Ilustración 3: Lluvia ácida y sus efectos



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Lluvia_%C3%A1cida [7]

La lluvia ácida se forma cuando la humedad en el aire se combina con el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas y vehículos que queman productos derivados del petróleo. En interacción con el

vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácidos nítricos. Finalmente, estas sustancias químicas caen a la tierra acompañando a las precipitaciones, constituyendo la lluvia ácida. [7]

Los contaminantes atmosféricos primarios que dan origen a la lluvia ácida pueden recorrer grandes distancias, trasladándolos los vientos cientos o miles de kilómetros antes de precipitar en forma de rocío, lluvia, llovizna, granizo, nieve o niebla. Cuando la precipitación se produce, puede provocar importantes deterioros en el ambiente.

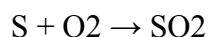
La lluvia normalmente presenta un pH de aproximadamente 5,65 (ligeramente ácido) debido a la presencia del CO₂ atmosférico, que forma ácido carbónico, H₂CO₃. Se considera lluvia ácida si presenta un pH de menos de 5 y puede alcanzar el pH del vinagre (pH 3). Estos valores de pH se alcanzan por la presencia de ácidos como el ácido sulfúrico, H₂SO₄, y el ácido nítrico, HNO₃. Estos ácidos se forman a partir del dióxido de azufre, SO₂, y el monóxido de nitrógeno que se convierten en ácidos. La combustión de hidrocarburos como fuente de energía, es la principal fuente de producción óxidos de azufre y nitrógeno. En interacción con el vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácidos nítricos. Finalmente, estas sustancias químicas suben a la atmósfera forman una nube y después caen a la tierra acompañando a las precipitaciones, constituyendo la lluvia ácida.

Formación de la lluvia ácida: [7]

Una gran parte del SO₂ (dióxido de azufre) emitido a la atmósfera procede de la emisión natural que se produce por las erupciones volcánicas, que son fenómenos irregulares. Sin embargo, una de las fuentes de SO₂ es la industria y los transportes, debido a la presencia de azufre en los combustibles derivados del petróleo.

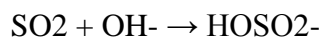
El SO₂ puede proceder también de otras fuentes, por ejemplo como el sulfuro de dimetilo, (CH₃)₂S, y otros derivados, o como sulfuro de hidrógeno, H₂S. Estos compuestos se oxidan con el oxígeno atmosférico dando SO₂.

Finalmente el SO₂ se oxida a SO₃ (interviniendo en la reacción radicales hidroxilo y oxígeno) y este SO₃ se puede quedar disuelto en las gotas de lluvia, es el de las emisiones de SO₂ en procesos de obtención de energía: el carbón, el petróleo y otros combustibles fósiles contienen azufre en unas cantidades variables (generalmente más del 1%), y, debido a la combustión, el azufre se oxida a dióxidos de azufre:

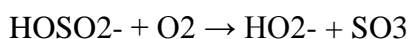


Hay otros procesos industriales en los que también se genera SO₂, por ejemplo en la industria metalúrgica.

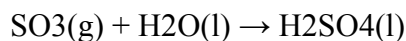
En la fase gaseosa el dióxido de azufre se oxida por reacción con el radical hidroxilo por una reacción intermolecular:



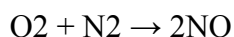
seguida por:



En presencia del agua atmosférica o sobre superficies húmedas, el trióxido de azufre (SO₃) se convierte rápidamente en ácido sulfúrico:



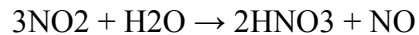
El NO se forma por reacción entre el oxígeno y el nitrógeno a alta temperatura:



Una de las fuentes más importantes es a partir de las reacciones de combustión en los motores de los medios de transporte. Este NO se oxida con el oxígeno atmosférico:



Y este 2NO_2 reacciona con el agua dando ácido nítrico que se disuelve en el agua:



Efectos de la lluvia ácida

La acidificación de las aguas de lagos, ríos y mares dificulta el desarrollo de vida acuática en estas aguas aumentando en gran medida la mortandad de peces. Igualmente, afecta directamente a la vegetación, produciendo daños importantes en las zonas forestales, así como acabando con microorganismos. [7]

La lluvia ácida, por su carácter corrosivo, corroe a las construcciones y las infraestructuras. Puede disolver, por ejemplo, el carbonato de calcio, CaCO_3 , afectando de esta forma a los monumentos y edificaciones construidas con mármol o caliza.

Un efecto indirecto muy importante es que los protones, H^+ , procedentes de la lluvia ácida lixivian (arrastran) ciertos iones del suelo. Por ejemplo, cationes de hierro, calcio, aluminio, plomo, zinc, Como consecuencia se produce un empobrecimiento en ciertos nutrientes esenciales y el denominado estrés en las plantas, que las hace más vulnerables a las plagas.

Los nitratos y sulfatos, sumados a los cationes lixiviados de los suelos, contribuyen a la eutrofización de ríos y lagos, embalses y regiones costeras, deteriorando sus condiciones ambientales naturales y afectando negativamente a su aprovechamiento.

2.1.2. CAMBIO CLIMÁTICO Y EL EFECTO INVERNADERO

Se denomina efecto invernadero al fenómeno por el cual determinados gases, componentes de una atmósfera planetaria retienen parte de la energía que el suelo

emite por haber sido calentado por la radiación solar. Afecta a todos los cuerpos planetarios dotados de atmósfera [8]. De acuerdo con el actual consenso científico, el efecto invernadero se está viendo acentuado en la Tierra por la emisión de ciertos gases, como el dióxido de carbono y el metano, debida a la actividad económica humana.

Este fenómeno evita que la energía solar recibida constantemente por la Tierra vuelva inmediatamente al espacio, produciendo a escala planetaria un efecto similar al observado en un invernadero.

Ilustración 4: Gases de efecto invernadero.

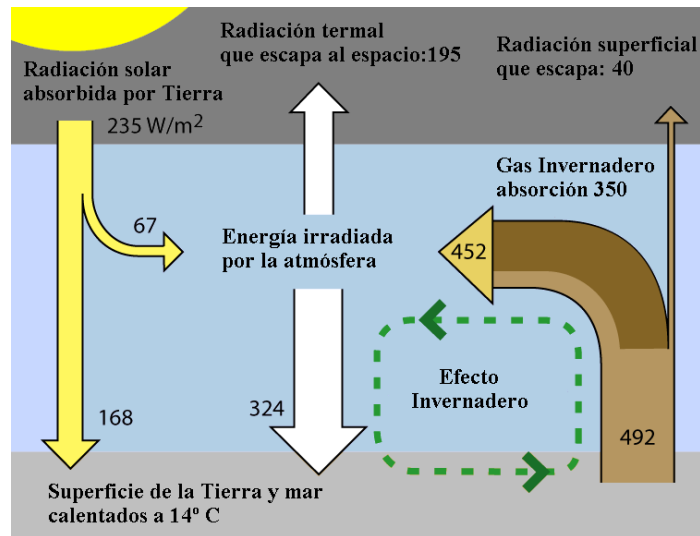


Fuente: <http://lanoticia.hn/> [8]

Balance Radiactivo Terrestre

La ilustración n°5 muestra cómo estos flujos se combinan para mantener caliente la superficie del planeta creando el efecto invernadero. Si 235 W/m^2 fuera el calor total recibido en la superficie, entonces la temperatura de equilibrio de la superficie de la Tierra sería de $-22 \text{ }^\circ\text{C}$. En cambio, la atmósfera de la Tierra recicla el calor que viene de la superficie y entrega unos 324 W/m^2 adicionales que elevan la temperatura media de la superficie a aproximadamente $+14 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ilustración 5: Efecto invernadero.



Fuente: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/> [9]

El efecto invernadero es un factor esencial del clima de la Tierra. Bajo condiciones de equilibrio, la cantidad total de energía que entra en el sistema por la radiación solar se compensará exactamente con la cantidad de energía radiada al espacio, permitiendo a la Tierra mantener una temperatura media constante en el tiempo.

Todos los cuerpos, por el hecho de estar a una cierta temperatura superior al cero absoluto, emiten una radiación electromagnética. La radiación electromagnética se traslada sin obstáculos a través del vacío, pero puede hacerlo también a través de medios materiales con ciertas restricciones. Las radiaciones de longitud de onda más corta (o frecuencia más alta) son más penetrantes, como ilustra el comportamiento de los rayos X cuando se los compara con la luz visible. También depende de las propiedades del medio material, especialmente del parámetro denominado transmitancia, que se refiere a la opacidad de un material dado para radiación de una determinada longitud de onda.

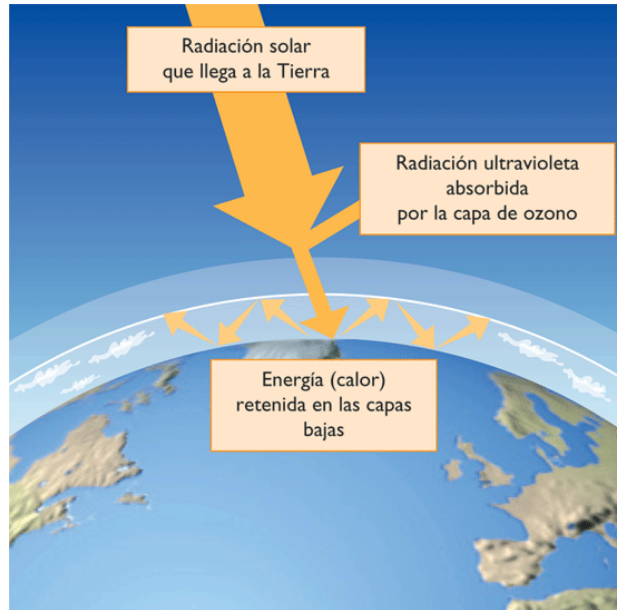
Radiación Recibida del Sol

El Sol es el responsable de casi toda la energía alcanzada desde el exterior a la superficie de la Tierra. El Sol emite radiación que se puede considerar de onda corta, centrada en torno a la parte del espectro a la que son sensibles los ojos, y que llamamos por ello luz visible. Incluye también dosis significativas de radiación ultravioleta, de longitud de onda menor que la visible. La parte ultravioleta es absorbida en buena parte por el ozono y otros gases en la alta atmósfera, contribuyendo a su calentamiento, mientras que la luz visible traspasa la atmósfera casi sin problemas. La Tierra intercepta una energía del Sol que en la parte superior de la atmósfera vale 1.366 W/m^2 . Sin embargo, sólo intercepta energía la sección de la Tierra orientada hacia el Sol, mientras que la emite toda la superficie terrestre, así que hay que dividir la constante solar entre 4, lo que lleva a 342 W/m^2 .

Albedo

De la radiación que llega al planeta, principalmente en forma de luz visible, una parte es reflejada inmediatamente. Esta fracción de energía que es devuelta inmediatamente al espacio se llama albedo [10], y para la Tierra vale 0,313 (31,3%), así que se pierden en el espacio $0,313 \times 342 = 107 \text{ W/m}^2$, por lo que quedan $342 - 107 = 235 \text{ W/m}^2$ que es la energía que no es reflejada por la atmósfera, el suelo sólido o el océano. El albedo de la Tierra es un factor causal importante de su clima, afectado por causas naturales y también por otras antropogénicas. Es frecuente confundir los efectos del albedo con los del efecto invernadero, pero el primero se refiere a energía devuelta directamente al espacio, mientras que el segundo lo hace a energía primero absorbida y luego emitida. En el primer caso se trata de los mismos fotones llegados desde el Sol, en el segundo se trata de los que la Tierra emite, tras calentarse, precisamente por no haber reflejado toda la radiación solar.

Ilustración 6: Efecto albedo



Fuente: <https://insidethenature.wordpress.com/que-es-el-efecto-albedo-3/> [10]

El Efecto Invernadero

La Tierra, como todo cuerpo caliente, emite radiación, pero al ser su temperatura mucho menor que la solar, emite radiación infrarroja de una longitud de onda mucho más larga que la que recibe. Sin embargo, no toda esta radiación vuelve al espacio, ya que los gases de efecto invernadero absorben la mayor parte. [11]

La atmósfera transfiere la energía así recibida tanto hacia el espacio (37,5%) como hacia la superficie de la Tierra (62,5%). Ello representa 324 W/m², casi la misma cantidad de energía que la proveniente del Sol, aun sin albedo. De este modo, el equilibrio térmico se establece a una temperatura superior a la que se obtendría sin este efecto. La importancia de los efectos de absorción y emisión de radiación en la atmósfera son fundamentales para el desarrollo de la vida tal y como se conoce. De hecho, si no existiera este efecto la temperatura media de la superficie de la Tierra sería de unos -22 °C, y gracias al efecto invernadero es de unos 14°C.

En zonas de la Tierra cuya atmósfera tiene poca proporción de gases de efecto invernadero (especialmente de vapor de agua), como en los grandes desiertos, las fluctuaciones de temperatura entre el día (absorción de radiación solar) y la noche (emisión hacia el cielo nocturno) son muy grandes.

Desde hace unos años el hombre está produciendo un aumento de los gases de efecto invernadero, con lo que la atmósfera retiene más calor y devuelve a la Tierra aún más energía causando un desequilibrio del balance radiactivo y un calentamiento global.

Gases de Efecto Invernadero (G.E.I)

Los denominados gases de efecto invernadero o gases invernadero, responsables del efecto descrito, son: [11]

- Vapor de agua (H₂O).
- Dióxido de carbono (CO₂).
- Metano (CH₄).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Ozono (O₃).
- Clorofluorocarburos (artificiales).

Tabla 1: Contribución real de diversos gases al efecto invernadero.

	Acción relativa	Contribución real
CO2	1 (referencia)	76%
CFCs	15 000	5%
CH4	25	13%
N2O	230	6%

Fuente: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/> [11]

Como se indica en la columna de acción relativa de la tabla 1, un gramo de CFC produce un efecto invernadero 15 000 veces mayor que un gramo de CO₂, pero como la cantidad de CO₂ es mucho mayor que la del resto de los gases, la contribución real al efecto invernadero es la que señala la columna de la derecha.

Otros gases como el oxígeno y el nitrógeno, aunque se encuentran en proporciones mucho mayores, no son capaces de generar efecto invernadero.

Si bien todos ellos (salvo los CFCs) son naturales, en tanto que ya existían en la atmósfera antes de la aparición del hombre, desde la Revolución Industrial y debido principalmente al uso intensivo de los combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte, se han producido sensibles incrementos en las cantidades de óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono emitidas a la atmósfera, con el agravante de que otras actividades humanas, como la deforestación, han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el dióxido de carbono, principal responsable del efecto invernadero.

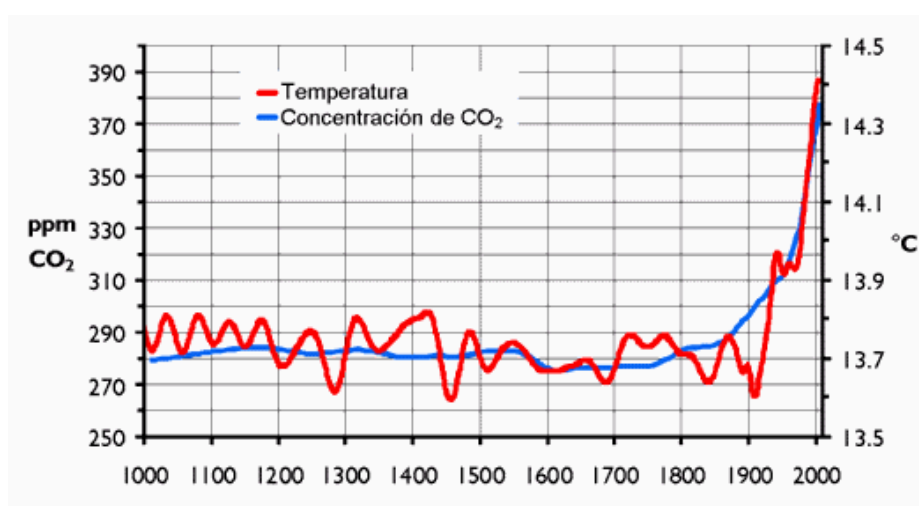
La concentración media de dióxido de carbono se ha incrementado desde unas 275 ppm antes de la revolución industrial, a 315 ppm cuando se empezaron a usar las primeras estaciones de medida exactas en 1958, hasta 361 ppm en 1996.

Los niveles de metano se han doblado en los últimos 100 años. En 1800 la concentración era de aproximadamente 0,8 ppm y en 1992 era de 17 ppm.

La cantidad de óxido de dinitrógeno se incrementa en un 0,25% anual. En la época preindustrial sus niveles serían de alrededor de 0,275 ppm y alcanzaron los 0,310 ppm en 1992.

Estos cambios causan un paulatino incremento de la temperatura terrestre, el llamado cambio climático o calentamiento global que, a su vez, es origen de otros problemas ambientales. En el gráfico 5 se puede apreciar el incremento de la temperatura de la tierra con el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera:

Gráfico 5: Evolución temporal de la concentración de CO₂ y el aumento de la temperatura terrestre.



Fuente: <http://anave.es/> [12]

2.2. LOS AGENTES CONTAMINANTES

Una atmósfera contaminada puede dañar la salud de las personas y afectar a la vida de las plantas y los animales. Pero, además, los cambios que se producen en la composición química de la atmósfera pueden cambiar el clima, producir lluvia ácida o destruir el ozono, fenómenos todos ellos de una gran importancia global. Se entiende la urgencia de conocer bien estos procesos y de tomar las medidas necesarias para que no se produzcan situaciones graves para la vida de la humanidad y de toda la biosfera.

Cada familia de contaminantes tiene sus fuentes, su difusión en la atmósfera y sus efectos. En particular, en el caso de la contaminación atmosférica, la difusión de los agentes contaminantes desempeña un papel importante en los efectos producidos: en ciertos casos, una contaminación importante pero de origen puntual puede dispersarse sobre una zona geográfica amplia y tener un impacto débil, en otros casos, una contaminación difusa (por ejemplo, la que generan los medios de transporte) se concentra por los vientos y el relieve, y tiene un impacto notable sobre las ciudades.

Algunos de los principales contaminantes atmosféricos son sustancias que se encuentran de forma natural en la atmósfera. Los consideramos contaminantes cuando sus concentraciones son notablemente más elevadas que en la situación normal. [13] Así se observa en la tabla 2 en la que se comparan los niveles de concentración entre aire limpio y aire contaminado.

Tabla 2: Niveles de concentración de los componentes del aire limpio y el aire contaminado.

Componentes	Aire limpio	Aire contaminado
SO ₂	0,001-0,01 ppm	0,02-2 ppm
CO ₂	310-330 ppm	350-700 ppm
CO	<1 ppm	5-200 ppm

III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES

NO _x	0,001-0,01 ppm	0,01-0,5 ppm
Hidrocarburos	1 ppm	1-20 ppm
Partículas	10-20 μ g/m ³	70-700 μ g/m ³

Fuente: <http://es.wikipedia.org/contaminacion/atmosferica> [13]

Resulta muy útil diferenciar los contaminantes en dos grandes grupos con el criterio de si han sido emitidos desde fuentes conocidas o se han formado en la atmósfera. Así tenemos, tal y como se puede ver en la tabla 3.

- Contaminantes primarios:- Aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión.

- Contaminantes secundarios:- Aquellos originados en el aire por interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los constituyentes normales de la atmósfera.

Tabla 3: Grupos de contaminantes de la atmósfera.

Fuentes	Contaminantes Primarios	Contaminantes Secundarios
Naturales	CO ₂	HNO ₃
	CO	SO ₃
	La mayoría de las partículas en suspensión	H ₂ SO ₄ O ₃
Estacionarias	NO	H ₂ S ₂
Móviles	SO ₂	La mayoría de las sales de NO ⁻ y (SO ₄) ⁻²
	La mayoría de los hidrocarburos	NO ₂ PAN (Nitrato de peroxiacetilo)

Fuente: <http://es.wikipedia.org/contaminacion/atmosferica> [13]

2.2.1. Óxidos de Nitrógeno

El término **óxidos de nitrógeno (N_xO_y)** se aplica a varios compuestos químicos binarios gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno. El proceso de formación más habitual de estos compuestos inorgánicos es la combustión a altas temperaturas, proceso en el cual habitualmente el aire es el comburente. [14]

Los óxidos de nitrógeno, llamados de modo general por sus siglas NO_x, más importantes toxicológicamente son el monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno (NO y NO₂, respectivamente).

El monóxido de nitrógeno es un gas a temperatura ambiente de olor dulce penetrante, fácilmente oxidable a dióxido de nitrógeno. Mientras que el dióxido de nitrógeno tiene un fuerte olor desagradable. El dióxido de nitrógeno es un líquido a temperatura ambiente, pero se transforma en un gas pardo-rojizo a temperaturas sobre los 21 °C.

Los óxidos de nitrógeno son liberados al aire desde el escape de vehículos de combustión interna, de la combustión del carbón, petróleo o gas natural, y durante procesos tales como la soldadura por arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita. También son producidos comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico con metales o con celulosa.

El emitido en más cantidad es el NO, pero sufre una rápida oxidación a NO₂, siendo éste el que predomina en la atmósfera. El NO₂ tiene una vida corta y se oxida rápidamente a NO₃⁻ en forma de aerosol o reacciona con el agua dando HNO₃ (ácido nítrico). Tiene una gran trascendencia en la formación del smog fotoquímico, del nitrato de peroxiacetilo (PAN) e influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono, tanto troposférico como estratosférico, así como en el fenómeno de la lluvia ácida. En concentraciones altas produce daños a la salud, a las plantas, corroe tejidos y materiales diversos.

Los óxidos de nitrógeno son usados en la producción de ácido nítrico, lacas, tinturas y otros productos químicos, como combustibles para cohetes, en la nitrificación de compuestos químicos orgánicos y en la manufactura de explosivos. Los motores que más las producen son los motores diésel.

2.2.2. Dióxido de Carbono

El **Dióxido de carbono** es un gas incoloro, inodoro y con un ligero sabor ácido, cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno (CO₂). El dióxido de carbono es 1,5 veces aproximadamente más denso que el aire. Es soluble en agua en una proporción de un 0,9 de volumen del gas por volumen de agua a 20 °C. [15]

El dióxido de carbono se encuentra en la atmósfera de forma natural, no es tóxico. Desempeña un importante papel en el ciclo del carbono en la naturaleza y enormes cantidades, del orden de 1.012 toneladas pasan por el ciclo natural del carbono en el proceso de fotosíntesis. El dióxido de carbono se produce también de otras formas por diversos procesos: por combustión u oxidación de materiales que contienen carbono, entre ellos los combustibles fósiles.

Dada su presencia natural en la atmósfera y su falta de toxicidad, no deberíamos considerarlo una sustancia que contamina, pero se dan dos circunstancias que lo hacen un contaminante de gran importancia en la actualidad:

- Es un gas que produce un importante efecto de atrapamiento del calor, el llamado efecto invernadero.
- Su concentración está aumentando en los últimos decenios por la quema de los combustibles fósiles y de grandes extensiones de bosques.

Por estos motivos es uno de los gases que más influye en el importante problema ambiental del calentamiento global del planeta y el consiguiente cambio climático.

En España, aproximadamente un 35% del emitido procede de combustiones diversas (industriales, domésticas, comerciales, etc.), un 25% de las plantas eléctricas, y alrededor de otro 25% procede del transporte.

La emisión española de CO₂ está por debajo de la media europea y así se justifica la postura de la Unión Europea en la Conferencia de Tokio de diciembre de 1997 sobre reducción de emisiones de gases con efecto invernadero. Toda Europa en conjunto ha disminuido las emisiones de CO₂ hasta el pasado año 2010, pero a España se le permite aumentarlas en una proporción de un 15%, porque en la actualidad sus emisiones son más bajas que la media. El aumento español quedará compensado con mayores reducciones en otros países europeos.

2.2.3. Monóxido de Carbono

El **monóxido de carbono**, cuya fórmula química es CO, es un gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados. Se produce cuando se queman materiales combustibles como gas, gasolina, keroseno, carbón, petróleo o madera en defecto de oxígeno produciendo una combustión incompleta. [16]

2.2.4. Dióxido de Azufre

Es un importante contaminante primario. Es un gas incoloro y no inflamable, de olor fuerte e irritante. Su vida media en la atmósfera es corta, de unos 2 a 4 días. Casi la mitad vuelve a depositarse en la superficie en estado húmedo o seco, y el resto se convierte en iones sulfato (SO₄²⁻). [17] Por este motivo, como se ve con detalle en la sección correspondiente, es un importante factor en la lluvia ácida.

En conjunto, más de la mitad del que llega a la atmósfera es emitido por actividades humanas, sobre todo por la combustión de carbón, petróleo y por la metalurgia. Otra fuente muy importante es la oxidación del H₂S. Y en la naturaleza, es emitido en la actividad volcánica. En algunas áreas industrializadas

hasta el 90% del emitido a la atmósfera procede de las actividades humanas, aunque en los últimos años está disminuyendo su emisión en muchos lugares gracias a las medidas adoptadas.

En España sus emisiones se concentran en Galicia y Aragón, al estar situadas en estas Comunidades importantes instalaciones productoras de electricidad que usan combustibles de baja calidad. En los últimos años se están produciendo importantes disminuciones en la emisión de este contaminante (de 1980 a 1990 su producción ha disminuido en un 33%) como consecuencia de la sustitución de los carbones españoles (de baja calidad) por combustibles de importación, más limpios. De todas formas, las cantidades producidas siguen siendo bastante grandes y, de hecho, es el contaminante primario emitido en mayor cantidad después del CO₂.

2.2.5. Trióxido de Azufre

Contaminante secundario que se forma cuando el SO₂ reacciona con el oxígeno en la atmósfera. Posteriormente este gas reacciona con el agua formando ácido sulfúrico con lo que contribuye de forma muy importante a la lluvia ácida y produce daños importantes en la salud, la reproducción de peces y anfibios, la corrosión de metales y la destrucción de monumentos y construcciones de piedra.

[13]

2.2.6. Óxidos de Azufre SO_x

Los **óxidos de azufre, SO_x**, derivan directamente del azufre contenido en el combustible utilizado. En la cámara de combustión, el azufre se oxida, formándose así principalmente dióxido de azufre SO₂ y en menor grado, trióxido de azufre SO₃. Los lubricantes alcalinos empleados para proteger la superficie de la camisa de la corrosión ácida convierten una pequeña proporción del SO_x producido por la combustión en sulfatos de calcio. Sin embargo ésta es una

relativamente insignificante proporción, y las emisiones de azufre de una máquina son esencialmente proporcionales a la cantidad de azufre contenido en el combustible y al consumo de éste por la máquina. [18]

Los SO_x solo pueden ser controlados eliminando el azufre del combustible, aunque también se pueden eliminar completa o parcialmente mediante limpieza de los gases de escape con agua. Pero este hecho acarrea el problema de la presencia de ácido sulfúrico en el agua, el cual debe ser neutralizado químicamente.

Con respecto a la reducción del contenido de azufre del combustible, ello conlleva un aumento del precio por lo que se deberá evaluar el uso de un combustible con bajo contenido en azufre frente a otro de alto contenido en azufre con la utilización de un sistema de limpieza.

A pesar de ello, por razones medioambientales, parece ser que la desulfuración previa del combustible en las refinerías será el mejor medio de reducir las emisiones de SO_x de los motores diésel marinos.

Los óxidos de azufre son la mayor fuente de lluvia ácida. Esto tiene graves efectos sobre las plantas, la vegetación, la respiración humana y las construcciones. Por otro lado, se tiene que saber que el efecto de la lluvia ácida sobre el mar es en la mayor parte de los casos, insignificante. Esto se debe a que el agua del mar es ligeramente alcalina, un litro de agua de mar por término medio es capaz de neutralizar en torno a los 300 mg de azufre. También se sabe que el SO_x solo puede ser transportado sobre distancias relativamente cortas que como mucho llegan a los 100 km. Esto explica que en países que lindan con aguas por donde hay un intenso tráfico marítimo como el canal de la Mancha o el estrecho de Malaca, la contribución de los buques a las emisiones de SO₂ esté por debajo del 5% del total de emisiones que tienen su fuente en la industria y transportes de tierra. [19]

No obstante, la limitación de las emisiones de azufre ha sido introducida en las regulaciones de la IMO, contenidas en el Anexo VI de MARPOL.

Existen varios métodos de medida de los SOx: infrarrojo (IR), ultravioleta (UV) o células electroquímicas (ECS); aunque se está cuestionando la precisión de todos los tipos de células. Por tanto, la norma ISO calcula el SO₂ de los gases de escape a partir del contenido de azufre del combustible.

3. ANEXO VI CONVENIO MARPOL - PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA OCASIONADA POR LOS BUQUES

3.1. ANTECEDENTES

Durante los trabajos que condujeron a la adopción del Convenio del MARPOL de 1973 se abordó la cuestión de controlar la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, en particular los gases nocivos que constituyen las emisiones de éstos. Sea como fuere, se decidió no hacerlo en ese momento. [20]

Ilustración 7: Convenio MARPOL



Fuente: www.imo.org/es/ourwork [20]

Al mismo tiempo, el tema de la contaminación atmosférica estaba siendo examinado en otros foros. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo en 1972, marca el inicio de la cooperación

internacional en la lucha contra la acidificación o lluvia ácida. Entre 1972 y 1977 varios estudios confirmaron la hipótesis de que los contaminantes atmosféricos pueden viajar varios miles de kilómetros antes de depositarse y provocar daños que afectan también a las cosechas y los bosques.

La mayor parte de la lluvia ácida es causada por la concentración en el aire del dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno. Las plantas motrices de carbón e hidrocarburos son las mayores fuentes de dióxido de azufre, mientras que el óxido de nitrógeno procede de las emisiones de los automóviles, camiones y buques.

Una reunión ministerial sobre la protección del medio ambiente celebrada en Ginebra en 1979 tuvo como consecuencia que 34 Gobiernos y la Comunidad Europea firmaran el Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia, es decir, el primer instrumento internacional jurídicamente vinculante que trató el problema de la contaminación atmosférica a un amplio nivel regional.

Más tarde, se firmaron sendos Protocolos de este Convenio sobre: la reducción de emisiones de azufre (1985); el control de las emisiones de óxidos de nitrógeno (1988); el control de las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles (1991) y una mayor reducción de las emisiones de azufre (1994).

Durante la década de 1980 la preocupación despertada por la contaminación atmosférica en cuestiones como el calentamiento de la Tierra y el agotamiento de la capa de ozono fueron en aumento, y en 1987 se firmó el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. El Protocolo de Montreal es un tratado internacional relativo al medio ambiente, elaborado bajo los auspicios de las Naciones Unidas, por el que las diversas naciones acuerdan disminuir el consumo y producción de sustancias que agotan la capa de ozono, entre las que figuran los CFC (clorofluorocarbonos) y los halones, con el fin de proteger la capa de ozono. En 1990 se adoptó en Londres un Protocolo que enmendaba el Protocolo original y fijaba el año 2000 como fecha límite para la eliminación gradual de los halones y los CFC que agotan la capa de ozono. En 1992 fue adoptado un segundo Protocolo en Copenhague, en el que se fijaron fechas para la

eliminación acelerada de las sustancias controladas, se prohibió el uso de sustancias de transición, y se fijaron fechas para la eliminación gradual de los HCFC (Hidroclorofluorocarbonos) y el bromuro de metilo (plaguicida gaseoso que agota la capa de ozono).

Desde la década de 1950 los CFC se han venido utilizando muy ampliamente como refrigerantes, propelentes de aerosoles, disolventes, agentes espumantes, y aislantes. En el transporte marítimo los CFC se utilizan para refrigerar el buque y la carga en los contenedores, aislar las bodegas de carga y los contenedores, en los sistemas de aire acondicionado de los camarotes de la tripulación y zonas ocupadas, así como para refrigerar los compartimientos de uso doméstico en que se almacenan alimentos.

Los halones que se fabrican a base de CFC son muy eficaces como extintores de incendios y se utilizan en los extintores portátiles y en los sistemas fijos.

3.2. ACUERDOS DE LA OMI CON RESPECTO A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

En la OMI, el CPMM (Comité de Protección del Medio Marino) estudió a mediados de la década de 1980 la calidad del fuel en relación a las prescripciones de descarga del Anexo I y abordó también el tema de la contaminación atmosférica. En 1988 el CPMM acordó incluir la cuestión de contaminación atmosférica en su programa de trabajo a raíz de la nota presentada por Noruega sobre la magnitud del problema. Además, la Segunda Conferencia Internacional para la Protección del Mar del Norte, celebrada en noviembre de 1987, emitió una declaración en la que los ministros de los Estados del Mar del Norte acordaron emprender acciones en el seno de los organismos competentes, como la OMI, "con objeto de mejorar las normas de calidad de los combustibles pesados y

apoyar activamente las tareas destinadas a reducir la contaminación marítima y atmosférica". [20]

En el siguiente periodo de sesiones del CPMM, celebrado en marzo de 1989, varios países presentaron ponencias sobre la calidad del fuel y la contaminación atmosférica, y se acordó estudiar los aspectos de la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, así como la calidad del fuel, como parte del programa de trabajo a largo plazo del Comité que se inició en marzo de 1990.

En 1990 Noruega presentó varias ponencias al CPMM en las que ofrecía una visión general de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, a saber:

- Las **emisiones de dióxido de azufre** de los buques se han estimado entre 4,5 y 6,5 millones de toneladas por año, o sea un 4% de las emisiones mundiales de azufre. Las emisiones en mar abierto se difunden y los efectos son moderados, pero contribuyen significativamente a los problemas ambientales a lo largo de ciertas rutas, entre las que figuran el Canal de la Mancha, el Mar de la China Meridional y el Estrecho de Malaca.
- Las **emisiones de óxido de nitrógeno** de los buques se han estimado en unos 5 millones de toneladas por año, o sea cerca del 7% del total mundial. Las emisiones de óxido de nitrógeno causan o agravan los problemas regionales, entre ellos el de la lluvia ácida, así como los problemas de salud en las zonas portuarias.
- Las **emisiones de CFC** de la flota mercante mundial se han estimado en 3000 - 6000 toneladas, o sea entre el 1% y el 3% anual de las emisiones mundiales.
- Las **emisiones de halones** de los buques se han estimado en 300-400 toneladas o sea un 10% del total mundial.

Las deliberaciones habidas en el CPMM y el proyecto elaborado por un Grupo de trabajo llevaron a adoptar en 1991 la resolución A.719 de la OMI sobre la *prevención de la contaminación del aire por los buques*.

Esta resolución pidió al CPMM que redactara un proyecto de nuevo Anexo al MARPOL 73/78 sobre la prevención de la contaminación atmosférica. El nuevo proyecto de Anexo fue elaborado durante los seis años siguientes, adoptándose en la Conferencia de septiembre de 1997 mediante un Protocolo del Convenio en el que se incluyó el nuevo Anexo. Esto permitió establecer en el Protocolo las condiciones específicas para su entrada en vigor.

3.3. EL PROTOCOLO DE 1997, INTRODUCCIÓN DE UN NUEVO ANEXO.

El Protocolo, con el nuevo Anexo VI del MARPOL 73/78, entraría en vigor 12 meses después de la fecha en que haya sido aceptado por 15 Estados cuyas flotas mercantes combinadas representen no menos de 50% del tonelaje bruto de la marina mercante mundial. Hasta octubre de 1998 dos países habían ratificado el Anexo VI. [21]

El 18 de mayo del 2004, Samoa depositó su ratificación como Estado número 15 (junto con Bahamas, Bangladesh, Barbados, Dinamarca, Alemania, Grecia, Liberia, Islas Marshall, Noruega, Panamá, Singapur, **España**, Suecia y Vanuatu). En esa fecha, el Anexo VI fue ratificado por el 54.57% del tonelaje de la flota mundial.

Por lo tanto, el Anexo VI entro en vigor el **19 de mayo de 2005**, y se aplica retroactivamente a los nuevos motores mayores de 130 kW instalados en buques construidos en o después del 1 de enero del año 2000, o en los casos en los que se realicen conversiones de envergadura después de esta fecha. La base de dicha

regulación es que el promedio de las emisiones de NO_x de los buques de nueva construcción sea un 30% menor a las emisiones en el año 1990.

3.3.1. DISPOSICIONES DEL ANEXO VI.

Con el Anexo VI "*reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques*" en vigor, se establecen límites para las emisiones de óxido de azufre y óxido de nitrógeno procedentes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono. [22]

El nuevo Anexo VI establece un límite máximo a escala mundial de 4,5% para el contenido de azufre del fuel y pide a la OMI que vigile el contenido medio de azufre a escala mundial del fuel una vez que el Protocolo está en vigor.

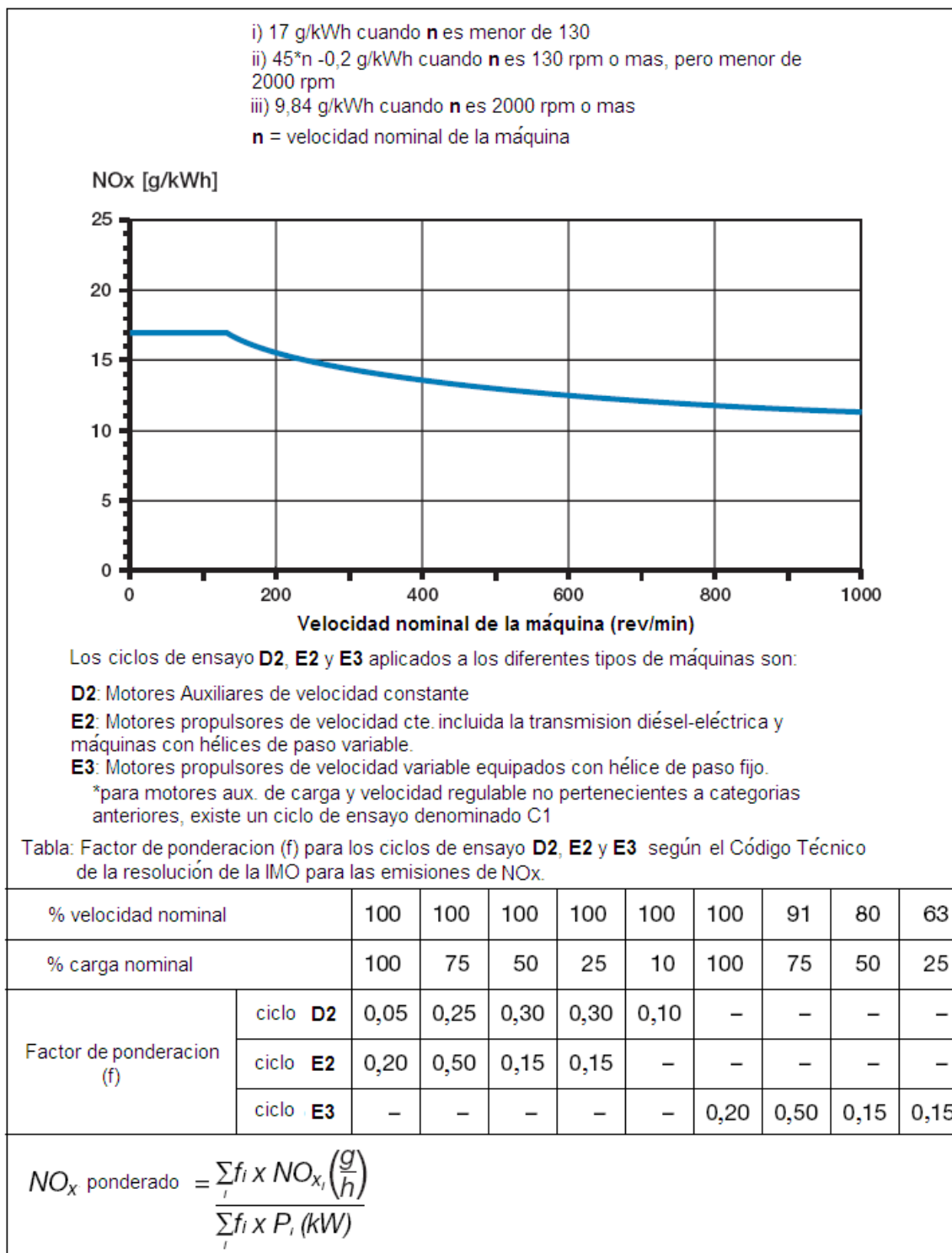
El Anexo VI contiene disposiciones que permiten designar ciertas zonas especiales, "*zonas de control de las emisiones de óxido de azufre*" ("*SO_x Emission Control Areas*") en las que el control de las emisiones es más estricto. En dichas zonas, el contenido de azufre del fuel utilizado a bordo de los buques no debe exceder del **1,0% desde julio de 2010**. En su defecto, los buques deben contar con un sistema de limpieza de los gases de escape o bien utilizar cualquier otro método técnico que limite las emisiones de SO_x a valores ≤ 6 g/kWh (como SO₂ en masa).

El área del mar Báltico ha sido designada como Zona de Control de las Emisiones de SO_x en el Protocolo de 1997. En marzo del 2000, se adoptó una propuesta de modificación del Anexo VI que incluye al mar del Norte como "Zona de control de las emisiones de SO_x".

El Anexo VI establece así mismo límites máximos de las emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x) en los motores diésel. Los límites de la emisión de NO_x se establecen para motores diésel en un rango de 9,8 a 17 g/kWh dependiendo de la

velocidad máxima de operación. En la tabla número 4 se pueden ver las especificaciones de los límites de emisión de NO_x.

Tabla 4: Límites de las emisiones de NO_x, y factor de ponderación para ciclos de ensayo.



Fuente: www.imo.org/nitrogen-oxides [23]

También podemos observar los diferentes factores de ponderación para los ciclos de ensayo con varios motores y sus respectivos porcentajes de carga. Entre esos ciclos de ensayo distinguimos varios tipos de máquina, a destacar;

- Ciclo D2: Para motores auxiliares de velocidad constante.
- Ciclo E2: Para motores propulsores de velocidad constante, incluida la transmisión diesel-eléctrica y máquinas con hélices de paso variable.
- Ciclo E3: Para motores propulsores de velocidad variable equipados con hélices de paso fijo (para motores auxiliares de carga y velocidad regulable no pertenecientes a categorías anteriores, existe un ciclo de ensayo denominado C1).

De esta manera, para cada tipo de motores podemos conocer el factor de ponderación a utilizar en la fórmula “límites de NO_x”, conociendo su porcentaje de velocidad y carga nominal.

3.3.2. CÓDIGO TÉCNICO.

El Código Técnico relativo a las emisiones de NO_x, de carácter obligatorio y que define el modo de lograrlo, fue adoptado por la Conferencia bajo la resolución 2.

Dicho código se aplica a todos los motores diésel de potencia superior a 130 kW, instalados o proyectados para ser instalados, a bordo de cualquier buque al que le sea aplicable el Anexo VI. En él se describen los procedimientos y las condiciones límite para las pruebas, supervisión y certificación de motores diésel en cumplimiento de los límites de las emisiones de NO_x. [20]

3.3.2.1. LOS ARTÍCULOS MÁS IMPORTANTES QUE TRATA DICHO CÓDIGO SON:

- Las mediciones y cálculos de las emisiones de NO_x tienen que ser llevadas de acuerdo al Código Técnico, el cual a este respecto es casi idéntico al ISO 8178. En concreto, **el valor real de NO_x tiene que ser menor al valor límite que se obtendría por medio de un cálculo utilizando la fórmula ponderada que viene en la tabla** (Límites de las emisiones de NO_x), la cual tiene en cuenta los valores de las emisiones en diferentes puntos de carga del rango de operación de la máquina. [24]

- Antes de la instalación a bordo, **todos los motores tienen que ser ajustados conociendo el límite que se le aplica de emisiones de NO_x** y deben ser suministrados con el Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica (EIAPP, “Engine International Air Pollution Prevention”). El Certificado EIAPP habilita al barco para que le sea expedido el Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica (IAPP, “International Air Pollution Prevention”) que le concede el país de bandera del buque. Para aquellos buques cuyos motores, por causa de su tamaño, construcción o plazo de entrega, no puedan ser certificados por el fabricante, las mediciones de los NO_x pueden ser llevadas a cabo a bordo del buque.

- Todos los motores deben ser suministrados con una **documentación técnica específica en el Código Técnico** que identifique los componentes y los ajustes que tienen influencia en las emisiones de NO_x, y confirme cuáles son las especificaciones correctas que aseguren el cumplimiento de las regulaciones. Los componentes y ajustes referidos son normalmente partes del sistema de inyección, accionamientos y reglaje de válvulas, culatas, pistones, vástagos, bielas y turbosoplantes. La documentación tiene que incluir ajustes, tolerancias y detalladas instrucciones para efectuar mediciones oficiales proporcionadas por el fabricante del motor.

- Para la certificación, se aplica el concepto de “**Familia de motores**” o “**Grupo de motores**”. El concepto de “Grupo de motores” se aplica a series de motores, los cuales por diseño tienen similares características de emisiones de gases de escape. El concepto de “Grupo de motores” puede aplicarse también a motores que aunque teniendo las mismas características de diseño, pueden tener ajustes y modificaciones de carácter individual. Estos grupos de motores están representados por un motor modelo y se establece que las pruebas de certificación solo son necesarias en estos motores modelo. Adicionalmente los motores pueden certificarse mediante la comprobación de documentos, componentes, ajustes, etc... los cuales tienen que corresponder con el motor modelo.

- Para la confirmación después de la instalación de un certificado de un motor, y para sucesivas revisiones a bordo, se pueden usar diferentes métodos que pueden ser elegidos por el armador, entre ellos la comprobación de componentes y parámetros, el muestreo de los valores de NO_x, o haciendo simples mediciones. Estos métodos son suficientes para deducir el correcto funcionamiento de un motor en lo relativo a las emisiones de NO_x, en referencia a la documentación técnica a cumplir del Código Técnico.

3.3.2.2. ÁMBITO DE APLICACIÓN.

En cuanto al ámbito de aplicación, se establece que todos los motores deben atender a las exigencias del Código Técnico exceptuando los siguientes tipos de motores:

- Motores diésel de emergencia.
- Motores instalados a bordo de botes salvavidas o equipos previstos para ser utilizados en casos de emergencia.
- Motores instalados en buques dedicados únicamente a realizar viajes dentro de las aguas sometidas a la soberanía del Estado cuyo pabellón están

autorizados a enarbolar, siempre que estén sometidos a otra medida de control de los NO_x establecida por la administración. [24]

3.4. NUEVAS ENMIENDAS SOBRE LOS LÍMITES DE EMISIONES.

Las emisiones de referencia de la IMO son referidas comúnmente con **Tier I, II y III**. La referencia Tier I estaba definida en la versión de 1997 del Anexo VI, mientras que las Tier II/III fueron introducidas en las Enmiendas adoptadas al Anexo VI en 2008. En octubre de 2008 se adoptan nuevas enmiendas al Anexo VI conocidas como Tier II/III que introducen:

1. Nuevos requisitos en la calidad del Fuel a partir de julio de 2010.
2. Nuevas referencias en las emisiones de NO_x de los nuevos motores.
3. Requisitos para los motores fabricados antes del año 2000.

Las nuevas enmiendas al Anexo VI fueron ratificadas por 53 países (Incluidos los Estados Unidos de América), representando al 81,88% del tonelaje mundial. Su aplicación fue a partir de julio de 2010. [25]

El límite **Tier I** se aplica a un motor diésel que se instala en un buque construido el 1 de enero de 2000 o posteriormente, y antes de 1 de enero de 2011, y representa el nivel 17 g/KW, como se estipula en el Anexo VI vigente. Para **Tier II**, los niveles de emisiones de NO_x para un motor diésel instalado en un buque construido el 1 de enero de 2011 o posteriormente, se reducirían a 14.4 g/kWh. Para **Tier III**, los niveles de emisiones de NO_x para un motor diésel instalado en un buque construido el 1 de enero de 2016 o posteriormente, se reducirían a 3.4 g/kWh, cuando el buque opere dentro de una zona de control de emisiones designada.

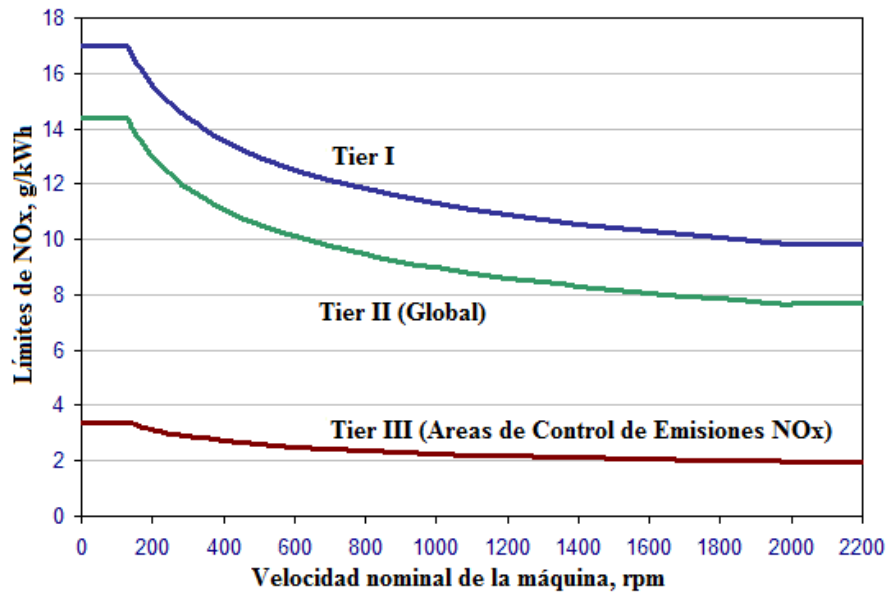
Tabla 5: Fechas de aplicación de los límites de emisiones

Tier	Fecha	Límites de los NO _x , g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2.000	n ≥ 2.000
Tier I	2000	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,8
Tier II	2011	14,4	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,7
Tier III	2016*	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	1,96

*En Zonas de Control de Emisiones de NO_x (Las referencias Tier II son aplicables fuera de las Zonas de Control de Emisiones).

Fuente: <http://www.dicapi.mil.pe/>. (Elaboración propia)

Gráfico 6: Límites de emisiones de NO_x en función de la velocidad nominal de la máquina



Fuente: <http://retedigital.com/>. [26]

De las referencias del Tier II se espera que se cumplan optimizando el proceso de combustión. Los parámetros examinados por los fabricantes de motores incluyen el avance a la inyección, la presión, la relación aire/combustible, el área de la tobera de inyección de combustible, la distribución de la válvula de escape y el volumen de compresión del cilindro.

De las referencias Tier III se espera que se cumplan mediante la aplicación de tecnologías de control de emisiones de NO_x tales como varias formas de inducción de agua en el proceso de combustión (con fuel en el aire de barrido o en el cilindro), recirculación de gases de escape o reducción catalítica selectiva.

Los motores construidos antes del año 2000 están bajo las enmiendas al Anexo VI de 2008 y por tanto las referencias Tier I se vuelven aplicables a todos los motores existentes instalados a bordo de buques construidos entre el 1 de Enero de 1990 y el 31 de Diciembre de 1999, con una cilindrada unitaria mayor o igual a 90 litros y una potencia entregada mayor o igual a 5.000 kW, sujeto a la posibilidad de poder introducir en ellos ciertas modificaciones.

3.5. ZONAS ECA (EMISSION CONTROL AREAS).

El Anexo VI define dos grupos de requisitos relativos a las emisiones y a la calidad del fuel, unos son requisitos globales y otro grupo ya son requisitos más rigurosos aplicables a los buques que navegan dentro de una **Zona de Control de Emisiones**. Las Zonas de Control de Emisiones pueden ser designadas para el control de las emisiones de SO_x , NO_x y **Partículas Materiales**, o para los tres tipos de emisiones procedentes de los buques, siempre sujeto a propuesta de una parte del Anexo VI. [28]

Además del Mar Báltico y el Mar del Norte que fueron designadas como Zonas de Control de Emisiones de SO_x, las futuras Zonas de Control de Emisiones podrían incluir zonas alrededor de puertos que puedan ser sensibles a la contaminación atmosférica.

En cuanto a las emisiones de NO_x las nuevas enmiendas adoptadas establecen nuevos límites, estos límites se aplican a los motores diésel en función de la velocidad máxima de operación (n, rpm) tal y como se muestra en la tabla 5 y se muestra gráficamente en el gráfico 6. Los límites recogidos en el Tier I/II son de aplicación global, mientras que los recogidos en el Tier III son de aplicación en Zonas de Control de Emisiones de NO_x.

Las Zonas ECA establecidas son las siguientes:

- Zona del mar Báltico – definida en el Anexo I del Convenio MARPOL (solamente para los SO_x);
- Zona del Mar del Norte –definida en el Anexo V del Convenio MARPOL (solamente para los SO_x);
- Zona de Norteamérica (que entró en vigor el 1 de agosto de 2012) – definida en el apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SO_x, NO_x y PM);
y
- Zona del mar Caribe de los Estados Unidos (que entró en vigor el 1 de enero de 2014) – definida en el Apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SO_x, NO_x y PM).

Ilustración 8: Designación zonas ECA



Fuente: <http://www.shipownersclub.com/> [27]

3.6. CONTENIDO DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE

Las regulaciones del Anexo VI incluyen la reducción del contenido de azufre en los combustibles como medida para el control de las emisiones de SO_x, e indirectamente el control sobre la emisión de partículas materiales. [29] El suministro de fuel con calidad especial bajo en azufre existe para navegar por las Zonas de Control de Emisiones de SO_x. Los límites del contenido en azufre de los combustibles y las fechas para su aplicación se pueden ver en la tabla 6 y se ilustran en el gráfico 7.

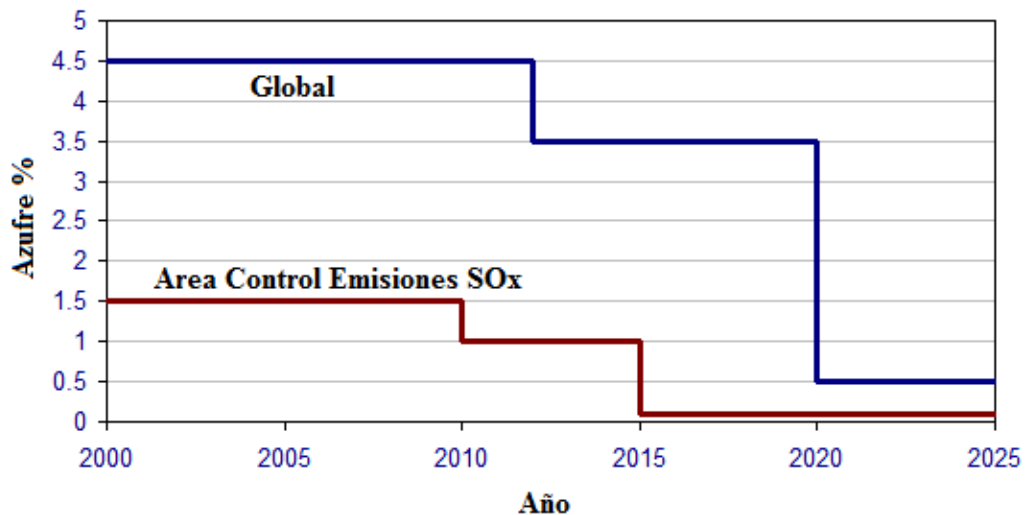
Tabla 6: Fechas de aplicación de los límites del contenido de azufre en el fuel.

Fecha	Límites de Azufre en el Fuel (% m/m)	
	Zona Control Emisiones SO _x	Global
2000	1,5 %	4,5%
Julio 2010	1,0%	
2012		3,5%
2015	0,1%	
2020*		

Fuente: Anexo VI Convenio MARPOL [22]

* La fecha alternativa es 2025, ya que está por decidir en una revisión prevista para el año 2018 después de realizar los balances establecidos en el Anexo VI.

Gráfico 7: Fechas de aplicación de los límites del contenido de azufre en el fuel.



Fuente: <http://www.imo.org/> [29]

Como destacamos en negrita en gráfico 7, la cifra que nos interesa es la correspondiente a la de 2015; siendo 0,1% masa/masa el porcentaje límite para navegar dentro de las zonas ECA.

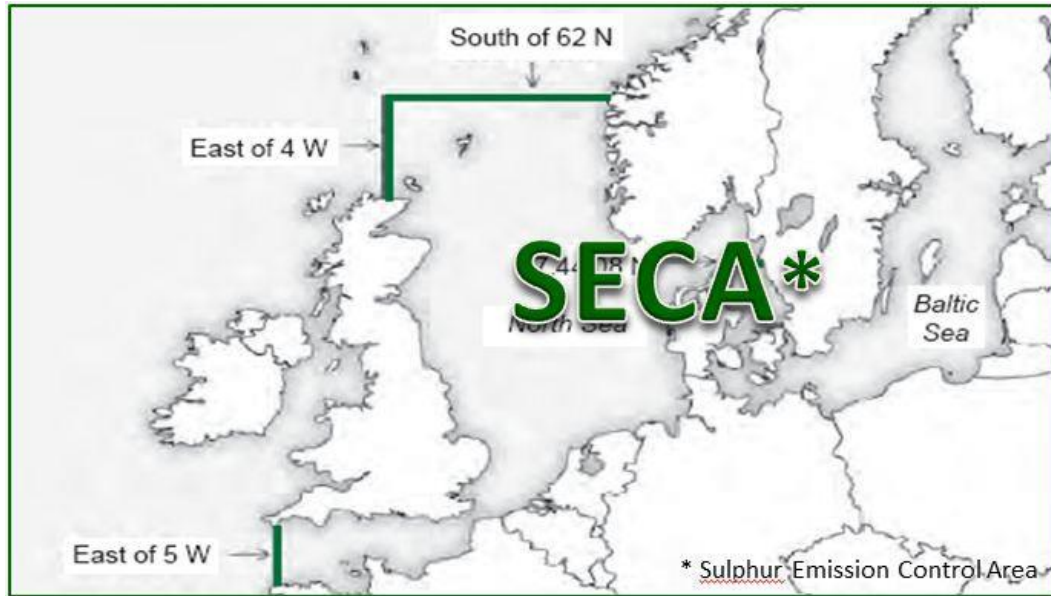
El uso de fuel pesado (HFO) está permitido dentro de la zona de control de emisiones siempre y cuando se cumplan los límites aplicables de contenido en azufre.

Otras medidas alternativas permitidas para reducir las emisiones de azufre pueden ser el uso de torres de lavado en lugar de usar el fuel con un contenido en azufre de 1,0% en Zonas de Control de Emisiones de SO_x, se puede usar un sistema de limpieza de los gases de escape o usar cualquier otro método tecnológico que limite las emisiones de SO_x a ≤ 6 g/kWh (como SO₂).

Cabe señalar que a partir del **1 de enero de 2010**, el máximo contenido permitido de azufre en los combustibles utilizados durante la estancia de los buques en puerto es del **0,1%**, según exigencia de la Directiva 2005/33 del Parlamento Europeo y del Consejo del 6 de julio de 2005, que modificó la Directiva 1999/32 y que fue transpuesta al ordenamiento español mediante el Real Decreto 1027/2006, de 15 de septiembre.

En la ilustración 9 se puede ver un mapa con los límites de la zona de control de emisiones de SO_x y los puertos de la Unión Europea en donde se aplica el máximo contenido del 0,1% de azufre en los combustibles utilizados en puerto.

Ilustración 9: Límites geográficos de aplicación de la zona de control de emisiones de SOx.



Fuente: <https://maritimecyprus.com/tag/seca/> [30]

El Anexo VI prohíbe las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono, lo que incluye a los halones y los clorofluorocarbonos (CFC_s). Se prohíben en todos los buques nuevas instalaciones que contengan sustancias que agoten la capa de ozono excepto las que contengan hidroclorofluorocarbonos (HCFC_s), las cuales estarán permitidas hasta el 1 de enero de 2020.

El Anexo VI prohíbe también la incineración a bordo de productos tales como los materiales de embalaje contaminados y los difenilos policlorados (PCB_s).

El cumplimiento de las disposiciones del Anexo VI se determinará por inspecciones periódicas. Tras pasar satisfactoriamente las inspecciones al buque, se le expedirá un Certificado Internacional de la Prevención de la Contaminación Atmosférica (“International Air Pollution Prevention Certificate”), el cual es válido para los siguientes 5 años. Bajo el Código Técnico relativo a las emisiones de NO_x, el operador del buque es el responsable de su cumplimiento.

3.7. OTRAS PROPUESTAS PARA MEJORAR LAS DISPOSICIONES DEL ANEXO VI.

Desde su entrada en vigor en 2005, la OMI está trabajando en la revisión y actualización del Anexo VI del Convenio MARPOL, que fue adoptado en 1997 y que algunos consideraron que debido al retraso en su entrada en vigor ya lo hizo obsoleto. [31]

Ilustración 10: Logotipo OMI



Fuente: <http://imo.org/> [31]

En el año 2007, el Secretario General de la OMI constituyó un “Grupo científico mixto de expertos gubernamentales y sectoriales”, al que encomendó realizar un estudio exhaustivo de evaluación sobre los efectos de las distintas opciones de combustible para reducir las emisiones de SO_x y partículas materiales, que se han propuesto en la revisión del Anexo VI y Código Técnico sobre los NO_x. En el informe sobre dicho estudio presentado en diciembre de 2007, este grupo había analizado:

- El número de buques de la flota mundial a los que se aplica el Anexo VI del MARPOL, desglosados según tonelaje bruto, edad, tipo y potencia.
- El volumen total de combustible consumido actualmente por el transporte marítimo internacional, con un desglose en combustibles destilados y residuales.
- Las tendencias previstas en el consumo de combustible y emisiones asociadas hasta 2020, fundamentadas en las reglas actuales del Anexo VI.
- Otras tendencias de los mercados mundiales de combustible y de la flota mundial hasta 2020.
- La incidencia y tendencia de las medidas ya adoptadas de manera voluntaria por el sector naviero para reducir las emisiones.
- Las repercusiones en la salud humana y el medio ambiente.

Las conclusiones generales en dicho estudio son que la opción más adecuada es reducir drásticamente a medio plazo el contenido de azufre en los combustibles en todo el mundo.

Una de las asociaciones marítimas más importantes del mundo, **BIMCO** (Baltic and Internacional Maritime Council), formó parte de ese Grupo de expertos designados por la OMI. Una de sus propuestas es el desarrollo del concepto de **micro-SECA** (Zonas de Control de las Emisiones de SO_x), zonas geográficas de pequeña extensión en las que se podría aplicar límites muy estrictos de contenido en azufre en el combustible, como por ejemplo el delta del río Perla en China, manteniendo la posibilidad de utilizar fuel con carácter general, con esto se evitaría el elevadísimo impacto que para el sector marítimo tendría la prohibición del uso de fuel como combustible marino, utilizando en su lugar únicamente destilados (gasoléo y diésel). [32]

Ilustración 11: Mar Báltico y puertos pertenecientes a una zona micro-SECA



Fuente: <http://www.marinelink.com/> [33]

La OMI solo ha adoptado y ratificado dos zonas SECA (Zonas de Control de las Emisiones de SO_x), el mar Báltico y el Mar del Norte/Canal de la Mancha. BIMCO propone aplicar el concepto de micro-SECA a los principales puertos o hasta una distancia determinada de la costa, estableciéndose estas zonas bajo el auspicio de la OMI y siguiendo los procedimientos para su designación previstos en el Apéndice III del Anexo VI de MARPOL, evitando así mismo la aparición de iniciativas locales o regionales no armonizadas. De esta forma algunos puertos y zonas costeras densamente pobladas, que en la actualidad no pueden cumplir los criterios de la OMI para obtener el carácter de zona SECA, se podrían beneficiar de una reducción de los SO_x generados por los buques.

BIMCO propone que el contenido permisible dentro de las zonas micro-SECA sea del 0,1% o 0,2% y que los puertos más grandes, incluso dentro de las dos zonas SECA existentes, puedan aplicar la condición de micro-SECA, aunque pocas serían las diferencias, porque desde 2010 se exige en los puertos de la UE el uso de combustibles con un límite máximo en el contenido de azufre del **0,1%**.

El objetivo general de estas medidas es proteger a las poblaciones y medio ambiente en las proximidades de los puertos y las costas, evitando a la vez ocasionar trastornos al comercio internacional.

BIMCO junto con otras organizaciones como ICS (International Chamber of Shipping) o ECSA (European Community Shipowners Associations) reconocen que es necesaria una reducción de las emisiones a la atmósfera procedente de los buques pero teniendo en cuenta que es una cuestión de gran complejidad, porque las medidas adoptadas pueden ser eficaces en un tipo de ruta o de buque, pero pueden no funcionar en otro tipo. [34]

Ilustración 12: Varias de las asociaciones en el debate de la contaminación en puertos.



Fuente: <http://menorca.info/> [35] (Elaboración propia)

En la propuesta de BIMCO se propone que a partir de 2011, los buques utilicen únicamente combustible destilado en: Zonas de Control de las Emisiones de SO_x (SECA), zonas portuarias, estuarios y a determinada distancia de la costa del puerto en el que vayan a hacer escala.

La reducción gradual propuesta del límite máximo del contenido de azufre a escala mundial es del:

- 3% en 2012
- 1,5% en 2016

Para las zonas SECA, portuarias y estuarios:

- El 1% en 2011
- El 0,5% en 2015

Esta propuesta está abierta a la utilización de mecanismos alternativos que se verán más adelante, como la reducción catalítica de los gases de escape, que reducirían las emisiones de azufre al igual que limitando el contenido de este en los combustibles, lo que sería una solución óptima para los buques que operan mayormente en zonas SECA.

El sector del refino y las cadenas de producción dispondrán de tiempo suficiente para adaptarse adecuadamente a las nuevas exigencias y a introducir nuevas técnicas más eficaces para producir combustibles residuales más limpios, con propiedades de combustión apropiadas y un contenido mínimo de partículas sólidas.

La utilización de destilados se debe centrar en las zonas en las que la medida tenga un resultado tangible inmediato y permitirse la utilización de fuel pesado allí donde su uso cause menos o ningún daño. A diferencia de los gases de efecto invernadero, los SOx son un problema localizado que afecta únicamente hasta cierta distancia de la fuente de emisión, que depende de factores como la altura de la chimenea, la velocidad y dirección del viento, y la humedad del aire, entre otros.

En opinión de BIMCO debido a la escasez de combustibles destilados con bajo contenido en azufre, sería un esfuerzo vano utilizarlos en alta mar como proponen algunas asociaciones, además que la desulfuración de los combustibles es un

proceso que consume mucha energía y genera CO₂ lo que podría tener una repercusión negativa en el equilibrio de CO₂ como gas de efecto invernadero.

Por otro lado, ECSA y la ICS tienen una postura conjunta respecto al debate sobre el cambio climático, en la que reconocen la necesidad de conseguir reducciones adicionales de las emisiones a la atmósfera por parte de los buques, en términos de emisiones por unidad de transporte, teniendo en cuenta las previsiones de notable crecimiento del comercio mundial y por tanto, la demanda del transporte marítimo, para lo cual consideran que se debe buscar el objetivo con un enfoque holístico para poder garantizar un comportamiento medioambiental óptimo en su conjunto.

Desde ECSA se recuerda que el transporte marítimo mueve el 90% del comercio mundial, que contribuye decisivamente a la calidad de vida y al desarrollo de los países, así como al abaratamiento de los bienes de consumo debido a la ampliación de los mercados, y teniendo en cuenta que el transporte marítimo es el que menos gases de efecto invernadero emite en relación a las toneladas transportadas, es por esto que el incentivo del transporte marítimo es una de las soluciones propiamente dichas a la reducción de las emisiones, sin tampoco olvidar el esfuerzo por aumentar la eficiencia energética de las plantas propulsoras, el desarrollo de las carenas y de las hélices, la optimización de la operación de la flota y el uso de combustibles y fuentes de energía alternativos, que tiene como fin el aumento del rendimiento del transporte y por tanto la reducción de las emisiones. Es por ello, según ECSA, que una reglamentación que pretendiese obtener una reducción marginal de las emisiones de CO₂ de los buques imponiéndoles asumir costes muy elevados, podría conducir a un transvase modal hacia otros modos de transporte menos sostenibles, con un resultado global contraproducente.

Por ello el transporte marítimo debería ser considerado como parte de la solución de la problemática del calentamiento global, en lugar de como parte del problema.

ECSA considera que cualquier norma relativa a este campo debe establecerse en el ámbito de la OMI, pero con la necesidad de que las normas sean equilibradas con el fin que unos buques pudieran perder competitividad con respecto a otros en la aplicación de las normas y que esto se tradujera en un estímulo a la transferencia a otros métodos de transporte, de esta forma y estableciendo el régimen normativo basado en objetivos, seguirán existiendo estímulos a la investigación y al desarrollo de soluciones técnicas nuevas y más eficaces para reducir las emisiones de CO₂.

Por otra parte, el régimen normativo tiene que establecer unos objetivos realistas debido a la tendencia al crecimiento de la flota mundial en los próximos años y a la incapacidad de la misma a conseguir una reducción a los niveles de emisiones del año 2005, objetivo que no es viable. La normativa tiene que concentrarse en conseguir reducciones en términos porcentuales y una mejora continuada, y asumir que unos objetivos globales absolutos de reducción no son alcanzables, dado el crecimiento del comercio mundial y a la ausencia de fuentes alternativas de energía suficientemente desarrolladas.

ECSA aboga por que en relación con cualquier regulación futura del transporte marítimo relacionada con el cambio climático se tengan en cuenta los siguientes principios:

- La normativa se debe acordar en el ámbito de la OMI y aplicarse de igual modo a los buques de todas las banderas para asegurar unas reglas del juego uniformes en el mercado.
- La normativa se debe orientar a conseguir una reducción de las emisiones en términos relativos (porcentajes) y a una mejora permanente de los buques, asumiendo que no es realista establecer techos máximos globales de emisión para el sector.
- La normativa debe estar dirigida a objetivos y asegurar la libre elección por los armadores de las soluciones tecnológicas para conseguir dichas

reducciones, para así promover la continuidad de la investigación e innovación en la búsqueda de soluciones más eficientes. [34]

4. MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE SO_x.

Las emisiones de SO_x dependen directamente del contenido de azufre del combustible utilizado y del consumo del mismo. Hay tecnologías para eliminar las emisiones de SO_x de los gases de escape, pero son equipos muy voluminosos y caros, y que plantean el problema de la eliminación de los residuos del lavado de gases.

4.1. MÉTODOS PRIMARIOS.

Debido a esto, la solución más práctica para reducir las emisiones de SO_x está en reducir el contenido de azufre en el fuel.

En la actualidad, el **Anexo VI de MARPOL 73/78** establece un límite de **1,5 %** de contenido en azufre en los combustibles marinos. [36] Con la excepción de las zonas de control de emisiones de SO_x (**SECA**, SO_x Emission Control Areas) donde el contenido máximo de azufre en el combustible no debe superar el **0.1%**. Los motores diésel pueden quemar combustibles bajos en azufre por debajo del 0.1% sin dificultades, siempre que se atienda al grado de alcalinidad del aceite lubricante de cilindros, el ratio de alimentación del mismo a los cilindros y la temperatura del agua de refrigeración de camisas.

Se debe reducir el índice de TBN o disminuir la alimentación de aceite de cilindros operando con combustibles de bajo contenido en azufre. La temperatura tiene que mantenerse en valores normales para no bajar el punto de rocío y hacer el motor insensible a las variaciones del contenido en azufre.

La introducción de combustibles bajos en azufre conlleva adaptaciones en la forma de tratar, almacenar y manejar los distintos tipos de combustible, así como disposiciones para almacenar y tratar un segundo tipo de aceite de lubricación de cilindros.

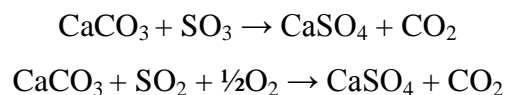
Aunque reducir las emisiones de SO_x es técnicamente viable y de hecho se hace en centrales termoeléctricas terrestres, esto todavía no es posible aplicarlo en buques debido a que las plantas de desulfuración son muy voluminosas y caras. Es por ello que se acepta ampliamente que en los buques es más fácil y más barato reducir el contenido de azufre en el fuel que reducir los óxidos de azufre en los gases de escape. De hecho la reducción del azufre en el fuel es la base de las regulaciones de la IMO.

4.2. OTROS MÉTODOS.

En este apartado veremos otro método con el que se puede reducir la emisión de SO_x, como es el lavado de los gases de escape.

El sistema de desulfuración, o DeSO_x, consiste en el lavado de los gases de escape, debido a que los óxidos de azufre no son constituyentes originarios del aire de combustión y son originados por el azufre contenido en el combustible no puede reducirse por medio de una catálisis.

El lavado se hace normalmente con una solución de carbonato cálcico en agua y otras soluciones alcalinas tales como carbonatos de sodio o sosa caustica. A modo de ejemplo, las reacciones químicas que tienen lugar cuando se usa carbonato cálcico en agua son:



En este caso la solución de carbonato cálcico se usa como agente de lavado reaccionando con el SO_2/SO_3 dando lugar a yeso como producto final. Todos los demás procesos de desulfuración dan lugar a un producto de desecho cuya eliminación es fuente de un nuevo problema. La eliminación del yeso como producto de desecho normalmente no plantea ningún problema, pero la contaminación del yeso con partículas y metales pesados del lavado de los gases de escape conduce a una coloración del yeso.

Se ha investigado el uso del agua de mar para lavar los gases de escape y solucionar el problema de la eliminación de los productos de desecho en las aplicaciones marinas.

Aunque los óxidos de azufre son neutralizados por el calcio, el cual está presente en el agua de mar, hay que averiguar si el vertido de SO_2 al mar sería aceptable. Por ello se concluye que el método más eficaz para disminuir las emisiones de SO_x es rebajar el contenido de azufre en el combustible.

Se propone también modificar los tiempos y el mapa de inyección de combustible, sistema conocido como “common rail”. El enfriamiento del aire de admisión también resulta útil, haciendo pasar el aire por un tubo antes de la entrada hacia el motor, la inyección de pequeñas cantidades de agua en el combustible y la recirculación de los gases de escape (EGR) son otros métodos considerados para el control de emisiones, aunque estos son más eficaces si se tratase más concretamente de NO_x . [37]

4.3. PROCEDIMIENTO DE CAMBIO DE COMBUSTIBLE PARA ENTRAR EN UNA ZONA SECA.

La regulación 14 de MARPOL Anexo VI establece que los buques han de entrar en la zona de Control de Emisiones con todo su sistema de combustible con un fuel con **contenido en azufre inferior al 0,1%**, con lo que debe hacer el cambio de combustible con suficiente antelación para garantizar que todo el combustible del circuito cumple con las exigencias de MARPOL. [38]

- Para los buques que operan de continuo con combustible de bajo contenido en azufre o aquellos con sistema de lavado de gases de escape el cambio no les afecta.
- Para los buques provistos de varios tanques de sedimentación y tanques de uso diario, el cambio de combustible no supone un tiempo excesivo puesto que solo tendría que mezclarse el combustible que hubiera en las tuberías del circuito de combustible.
- En el caso de disponer de 2 tanques de diario y un tanque de sedimentación, la solución más económica con vistas a reducir el tiempo del cambio de combustible, sería dotar al tanque de sedimentación de una tubería de aspiración, para poder achicarlo completamente y empezar a rellenarlo con combustible bajo en azufre.
- Pero para muchos barcos que solo disponen de un tanque de servicio diario o un tanque de sedimentación, el cambio de combustible conlleva una operación que requiere un cálculo del tiempo de dilución que puede ser suficientemente largo como para que suponga un gasto importante en los costos de combustible, debido al mayor precio del combustible con bajo contenido en

azufre. En este último caso conviene, para realizar los cálculos del tiempo de cambio, conocer entre otros los siguientes datos:

- El contenido de azufre del combustible alto en azufre, que cuanto mayor sea mayor será el tiempo de dilución y el contenido en azufre del combustible bajo en azufre que cuanto más se acerque al 0,1% mayor hará el tiempo de dilución.
- El consumo total de combustible del buque, que cuanto mayor sea más corto hará el tiempo de dilución de los combustibles.
- El volumen total del tanque de sedimentación y de las tuberías asociadas, cuanto mayor sea su contenido mayor será el tiempo de dilución. Idealmente el tanque de sedimentación debería ser drenado completamente, de ahí la conveniencia de dotarlo de una tubería de aspiración.
- El volumen del tanque de diario y tuberías asociadas, que al igual que el tanque de sedimentación, cuanto mayor sea mayor será el tiempo de dilución. Éste debería de drenarse a un mínimo de seguridad, como por ejemplo un 25%, reduciendo de esta manera también las posibilidades de incompatibilidades de los combustibles.
- Las purificadoras han de aumentar el caudal con el fin de llenar el tanque de diario, siendo conveniente evitar el rebose al tanque de sedimentación hasta que no pase un tiempo de dilución dentro del tanque diario, reduciendo el caudal hasta ajustarlo al consumo de los motores, con esto se evita meter parte del fuel mezclado en el tanque de diario con el combustible con bajo contenido en azufre, que se trasiega al tanque de sedimentación.

- Otro factor a tener en cuenta es la capacidad de las bombas de trasiego de combustible para achicar el tanque de sedimentación, y una vez achicado para volver a llenarlo, este tiempo también tiene influencia en el tiempo del cambio de combustibles.

Con todos estos datos se pueden elaborar unos diagramas con los que poder calcular el tiempo de antelación en el que hay que proceder al cambio de combustible para llegar a la zona de control de emisiones con el combustible según las regulaciones de MARPOL. Dichos diagramas permiten calcular el tiempo en función de los contenidos en azufre de ambos combustibles a mezclar. En la tabla 7 y el gráfico 8 se muestran a modo de ejemplo dos diagramas de cálculo de tiempo de cambio de combustible. [39]

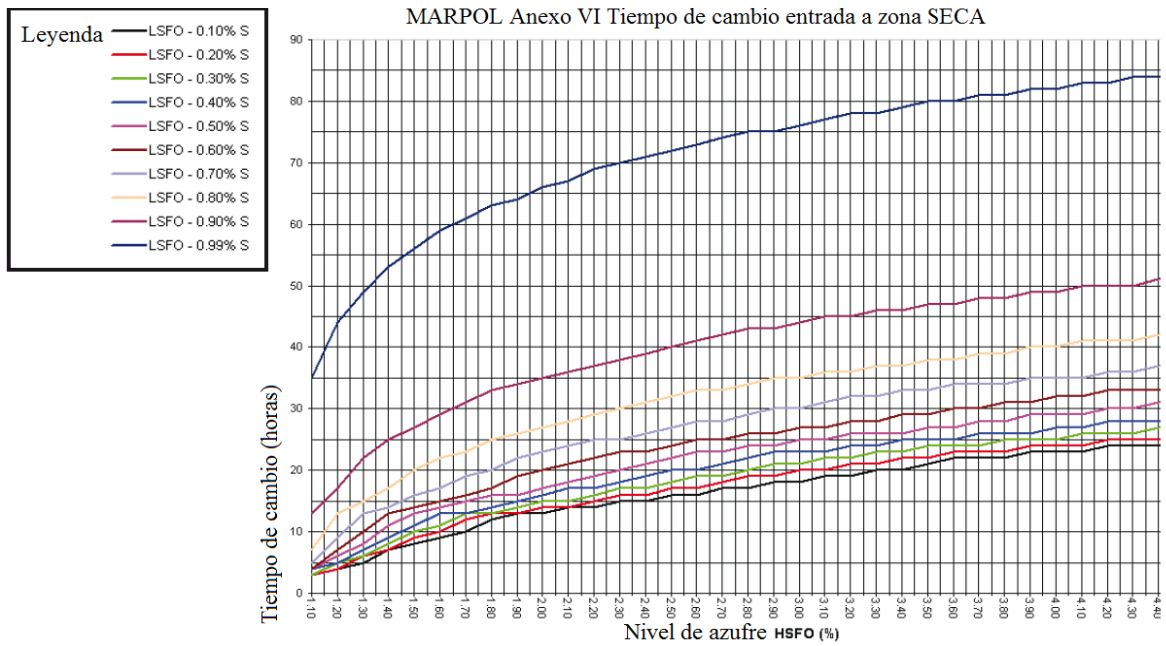
III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES

Tabla 7: Tiempos de cambio entre distintos tipos de fuel.

Tiempos de cambio para varias combinaciones de Azufre (hrs.)										
HSFO %	LSFO %									
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.99
1.10	3	3	3	4	4	4	5	7	13	36
1.20	4	4	5	5	6	7	9	13	17	44
1.30	5	6	6	7	8	10	13	15	22	49
1.40	7	7	8	9	11	13	14	17	25	53
1.50	8	9	10	11	13	14	16	20	27	56
1.60	9	10	11	13	14	15	17	22	29	59
1.70	10	12	13	13	15	16	19	23	31	61
1.80	12	13	13	14	16	17	20	25	33	63
1.90	13	13	14	15	16	19	22	26	34	64
2.00	13	14	15	16	17	20	23	27	35	66
2.10	14	14	15	17	18	21	24	28	36	67
2.20	14	15	16	17	19	22	25	29	37	69
2.30	15	16	17	18	20	23	25	30	38	70
2.40	15	16	17	19	21	23	26	31	39	71
2.50	16	17	18	20	22	24	27	32	40	72
2.60	16	17	19	20	23	25	28	33	41	73
2.70	17	18	19	21	23	25	28	33	42	74
2.80	17	19	20	22	24	26	29	34	43	75
2.90	18	19	21	23	24	26	30	35	43	75
3.00	18	20	21	23	25	27	30	35	44	76
3.10	19	20	22	23	25	27	31	36	45	77
3.20	19	21	22	24	26	28	32	36	45	78
3.30	20	21	23	24	26	28	32	37	46	78
3.40	20	22	23	25	26	29	33	37	46	79
3.50	21	22	24	25	27	29	33	38	47	80
3.60	22	23	24	25	27	30	34	38	47	80
3.70	22	23	24	26	28	30	34	39	48	81
3.80	22	23	25	26	28	31	34	39	48	81
3.90	23	24	25	26	29	31	35	40	49	82
4.00	23	24	25	27	29	32	35	40	49	82
4.10	23	24	26	27	29	32	35	41	50	83
4.20	24	25	26	28	30	33	36	41	50	83
4.30	24	25	26	28	30	33	36	41	50	84
4.40	24	25	27	28	31	33	37	42	51	84
4.50	24	25	27	29	31	34	37	42	51	85

Fuente: www.dnvgl.com/sulfur [39]

Gráfico 8: Diagrama de los tiempos de cambio entre los distintos tipos de fuel.



Fuente: www.dnvgl.com/sulfur [39]

En las imágenes anteriores se muestran los tiempos de cambio de combustible para distintas combinaciones de contenido en azufre. Y en el diagrama se puede ver como el nivel de azufre varía según el tipo de combustible a lo largo del tiempo, observando la leyenda podemos comparar unos tipos de combustible y otros.

4.4. ASPECTOS A TENER EN CUENTA.

Los cambios de combustible han de ser registrados en el cuaderno de máquinas, así como en el cuaderno de navegación, anotando: fecha, hora y posición del buque.

Los buques deberían de asegurarse de que el combustible con bajo contenido en azufre es compatible con el de alto contenido en azufre haciendo pruebas a los combustibles. Existe un alto riesgo de incompatibilidad haciendo mezclas entre combustibles de alta densidad con aquellos con baja densidad, mientras que la mezcla de dos combustibles de baja densidad disminuye el riesgo. El margen de mezcla en el cambio de combustibles debería de ser el más pequeño posible.

Otro aspecto a tener en cuenta es que un aceite lubricante con un índice TBN elevado en combinación con un combustible bajo en azufre, puede provocar depósitos en la camisa del cilindro. Se recomienda controlar el nivel de depósitos en la camisa de cilindro o, en su defecto, bajar el índice de TBN del aceite lubricante o bien disminuir el caudal de aceite lubricante.

IV. MATERIAL Y MÉTODOS

En este capítulo presentaremos y describiremos el buque al que se le ha aplicado la legislación estudiada en el capítulo “Revisión y Antecedentes”.

1. MATERIAL

Para el desarrollo del mismo hemos tomado como buque modelo el buque Galicia de la Flota Suardiaz, este es un barco de tipo Roll-on/Roll-off que transporta principalmente coches, remolques, contenedores frigoríficos, maquinaria pesada y carga rodada en general.

El Galicia posee bandera española y tiene como puerto de registro Santa Cruz de Tenerife con número IMO 9268409 y distintivo de llamada ECEC.

Está destinado a desarrollar una línea regular que parte desde Canarias, pasando por algunos puertos de la península como Barcelona, Valencia y Vigo, cruzando el Canal de La Mancha hasta Zeebrugge (Bélgica), Southampton, Tyne, Shernees (los tres en Inglaterra) y Casablanca (Marruecos). Y como puertos puntuales viaja a Mostaganem (Argelia), Endem (Alemania), y Birmingan y Flushing (Inglaterra).

Ilustración 13: Buque Galicia



Fuente: Trabajo de campo [40]

El Galicia es el buque más nuevo de la compañía pero no el más rápido, con una máquina propulsora compuesta por 2 motores diésel Wärtsilä de 4 tiempos con una potencia de 4140 kW cada uno y desarrollando 750 rpm. Debido a su navegación, desarrolla una velocidad media de entre 13 y 15 nudos, una velocidad desventajosa con respecto a los otros barcos de la flota que desarrollan líneas más cortas y con mayor demanda, empleando plantas propulsoras considerablemente mayores en la relación desplazamiento/potencia.

La tripulación del MV Galicia la compone un total de 17 tripulantes divididos en los tres departamentos que definimos en la tabla adjunta nº 8:

Tabla 8: Tripulación del MV Galicia

Departamento de Fonda	Departamento de Cubierta	Departamento de Máquinas
Camarero	Capitán	Jefe de Máquinas
Cocinero	Primer Oficial	Primer Oficial
	Segundo Oficial	Segundo Oficial
	Tercer Oficial	Calderetero
	Contramaestre	Engrasador
	Alumno de puente	Alumno de máquinas
	3 marineros	

Fuente: Trabajo de campo

Las guardias para el departamento de Cubierta son de 8 horas divididas en dos turnos de 4 horas compartidas entre los tres oficiales. En el departamento de Máquinas las guardias son de 24 horas, alternando los días entre el primer y el segundo oficial. Tanto el Jefe de Máquinas como el Capitán no realizan guardias en este barco.

A continuación, se adjunta la tabla correspondiente a las características generales del buque:

Tabla 9: Características generales del buque MV Galicia

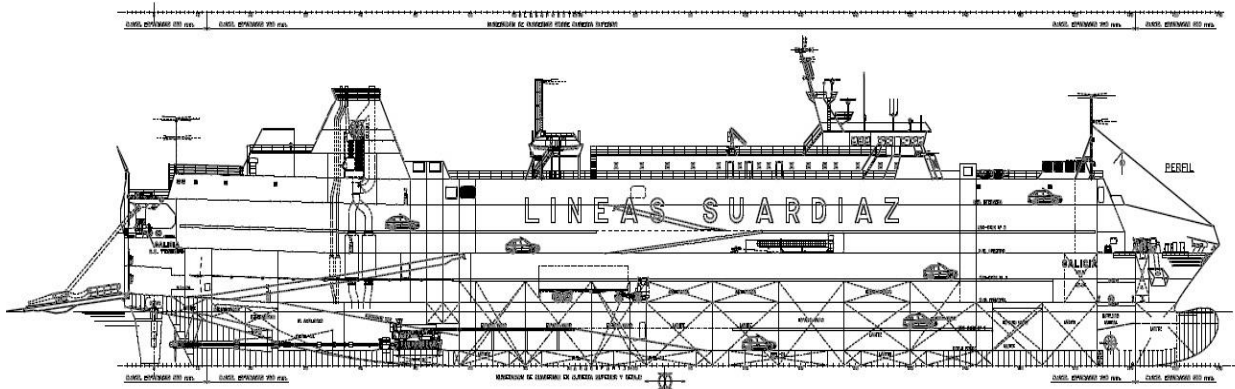
Eslora máxima, L	149,38 m
Eslora entre perpendiculares, Lpp	139,56 m
Manga de trazado, B	21,00 m
Puntal a la cubierta principal	7,00 m
Puntal a la cubierta superior	12,44 m
Calado de trazado, T	5,85 m
Arqueo Bruto	16.361 GT
Arqueo Neto	4.908 NT
Peso muerto	4.203 Tm
Potencia MMPP	2 x 4.140 kW

Nº de Hélices	2 x HPV
Nº de Ejes	2

Fuente: Hijos de J. Barreras S.A. [41]

A continuación expondremos de manera general la disposición de las cubiertas. En el plano que adjuntamos en el dibujo nº: se pueden apreciar en la vista lateral del buque las cubiertas, principal, intermedia, superior y de botes, además del bodeguín. Tanto el bodeguín como la cubierta principal y la intermedia disponen de cardecks móviles que subdividen dichas cubiertas para la estiba de vehículos ligeros.

Ilustración 14: Plano de la disposición de las cubiertas



Fuente: Hijos de J. Barrera S.A. [41]

Si sumamos el total de cardecks con el número de cubiertas fijas y suponiendo que cargamos sólo vehículos ligeros, resulta una capacidad para 1.409 coches. En el caso de preparar la carga para tráilers y remolques, nos resultaría un total de 50 tráilers y 956 vehículos ligeros.

IV. MATERIAL Y MÉTODOS

La estiba en los cardecks y cubiertas superiores se realiza mediante rampas intermedias situadas a babor o estribor de manera alterna, excepto la rampa de la cubierta intermedia que es central.

En la cubierta de botes encontramos la chimenea, los botes salvavidas y la acomodación de la tripulación y pasajeros. El buque está preparado para llevar un total de 12 pasajeros adicionales que pueden ser chóferes o responsables de cargas especiales. Encima de la acomodación se encuentra el puente y el entrepuente.

Ilustración 15: Cubierta de botes y chimenea



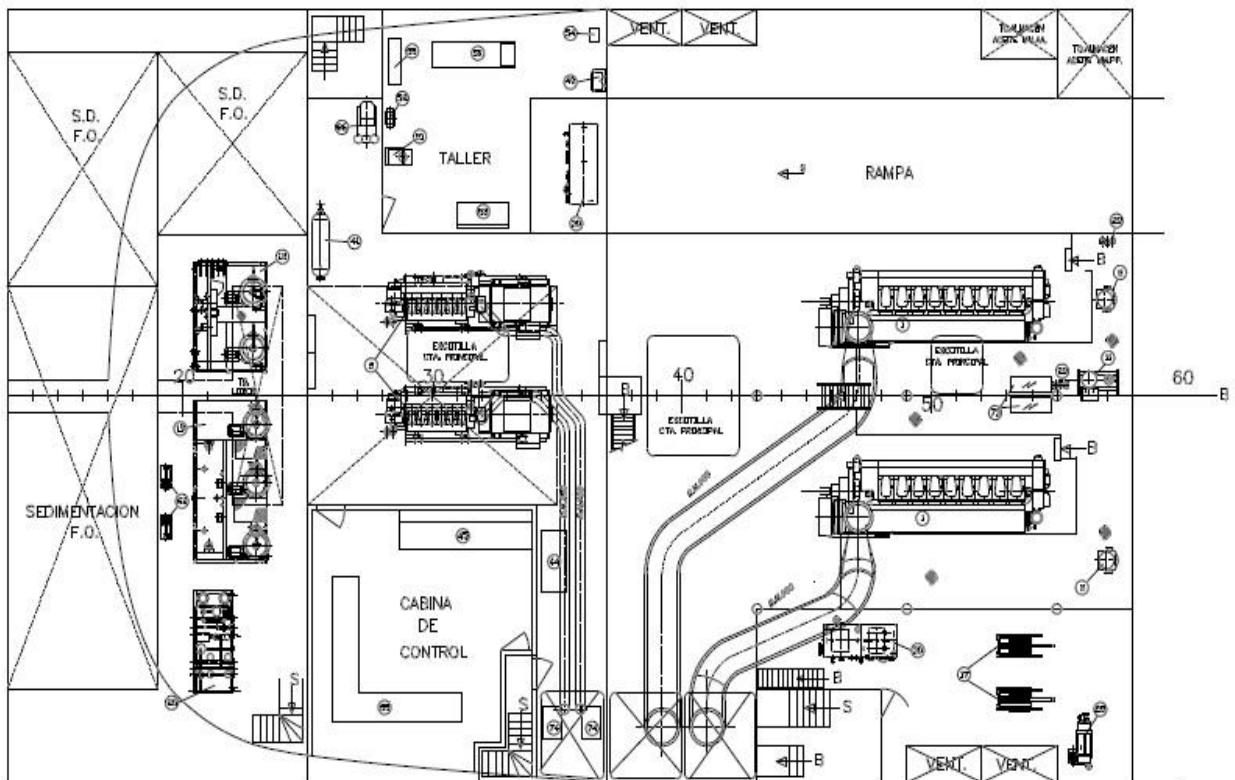
Fuente: Trabajo de campo

Una vez que hemos realizado una vista por las cubiertas o bodegas de carga, vamos a proceder a describir la sala de máquinas y sus componentes y sistemas.

En la imagen n°16: del plano que adjuntamos a continuación se representa el tecele alto, que comprende: la cabina de control, sala de motores auxiliares, taller, sala

de depuradoras y módulo de combustible, en la parte más a popa. Y en la parte a proa del tecele entramos en la sala de motores principales, donde nos encontramos las culatas, cisterna o tanque de filtros y observación de purgas, enfriadores centrales y generador de agua dulce, filtros dobles de combustible y precalentamiento, así como las bombas de refrigeración de agua dulce de alta temperatura.

Ilustración 16: Plano disposición de cámara de máquina. Tecele alto



Fuente: Hijos de J. Barrera S. A [41]

Después de haber realizado una descriptiva general de la sala de máquinas, mostraremos varios de los elementos y sistemas de cada apartado en particular. Tomando el tecele alto como inicio, vamos a comenzar desde la cabina de control, como se muestra en la ilustración nº17:

IV. MATERIAL Y MÉTODOS

Ilustración 17: Cabina de control de máquinas I



Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 18: Cabina de control de máquinas II



Fuente: Trabajo de campo

En la imagen n° 19: que adjuntamos a continuación se muestran los generadores auxiliares, que encontramos al salir de la cabina de control;

Ilustración 19: Generador auxiliar



Fuente: Trabajo de campo

Los generadores auxiliares son la serie 3508-B de la marca CATERPILLAR, posee dos motores de 4 tiempos con una potencia de 648 kW y un alternador con una potencia eléctrica de 810 kVA. [42]

La máquina de este barco cuenta con una sala de depuradoras compuesta por 2 depuradoras de aceite, 2 depuradoras de fuel y 1 de gasoil.

Ilustración 20: Depuradoras de combustible y aceite



Fuente: Trabajo de campo

En la imagen anterior nº 20: apreciamos las dos depuradoras de fuel y, al fondo la de gasoil. Se puede contemplar que la depuradora de fuel N°1 está parada por la presión que marcan los manómetros, en este caso es poco habitual que ambas depuradoras trabajen a la vez.

Las siguientes imágenes adjuntas corresponden a los enfriadores y a la cisterna o tanque de observación de purgas;

Ilustración 21: Cisterna



Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 22: Enfriadores de alta y baja temperatura.



Fuente: trabajo de campo.

Después de describir el tecla alto, vamos a proceder a representar el tecla bajo que es donde se encuentran los MMPP. En el plano que adjuntamos a continuación (imagen n°: 23), distinguimos; los propios motores principales, reductoras y alternadores seguidos por sus correspondientes chumaceras, separador de sentinas, electrocompresores y botellas de aire para los MMPP y otros servicios, las bombas de diferentes servicios como el lastre, contra incendios, achique de sentinas, y las bombas de trasiego de F.O. y G.O., así como también las centrales hidráulicas de las 2 hélices de paso variable (HPV, Kamewas).

IV. MATERIAL Y MÉTODOS

En la siguiente tabla anexa apreciamos las características de los 2 motores principales de abordó:

Tabla 10: Características motor principal

Fabricante	WÄRTSILÄ
Modelo	W9L32
RPM	750 rpm
Potencia Máxima	4.140 kW
N° de cilindros	9 en línea
D. cilindros	320 mm
Carrera	400 mm
Cilindrada por cilindro	32,17 l

Fuente: Trabajo de campo. [43]

En la siguiente tabla exponemos las características generales de las reductoras del motor;

Tabla 11: Características reductora MMPP

Fabricante	REINTJES
Modelo	LGF 6665 HR k31
Reducción	3,338:1
N° Reductor	65325

Fuente: Trabajo de campo [44]

En las siguientes imágenes adjuntas se muestra una vista general el motor principal de babor y la reductora de estribor;

Ilustración 24: Motor principal



Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 25: Reductora de motor principal.



Fuente: trabajo de campo

En el mismo tecele encontramos, como se dijo en anteriores párrafos, las centrales hidráulicas o sistemas de accionamiento de las hélices de paso variable.

Ilustración 26: Central hidráulica de HPV



Fuente: Trabajo de campo [45]

Las dos hélices de paso variable con las que cuenta este buque son de la serie C-1571 de la marca KAMEWAS GROUP con 4 palas. Además, cuenta con una hélice transversal de maniobra situada a proa de la misma marca tipo TT-1650K-CP, con una potencia máxima de 802 cv y 1.500 rpm de entrada. [45]

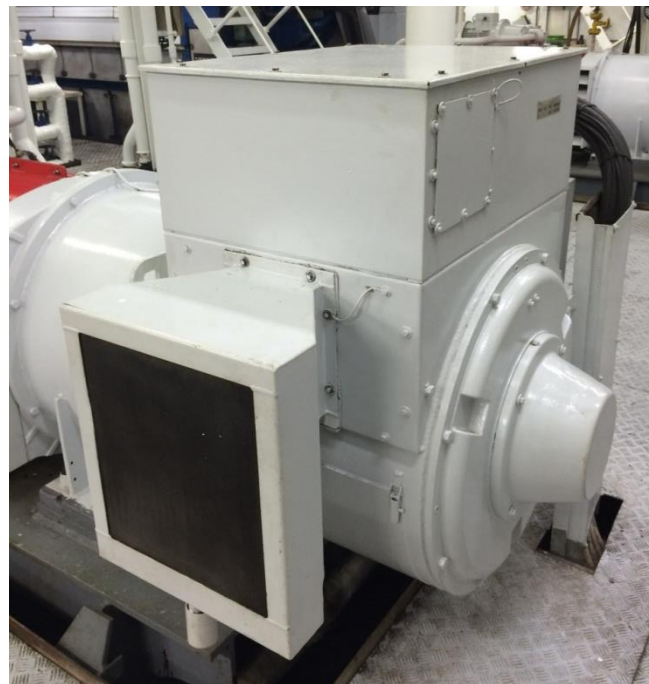
Las siguientes imágenes corresponden al resto de equipos que se han nombrado anteriormente;

Ilustración 27: Chumacera



Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 28: Alternador



Fuente: Trabajo de campo

IV. MATERIAL Y MÉTODOS

Ilustración 29: Bombas de trasiego de FO y GO



Fuente: trabajo de campo

Ilustración 30: Bombas de agua salada



Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 31: Bombas de agua dulce



Fuente: trabajo de campo

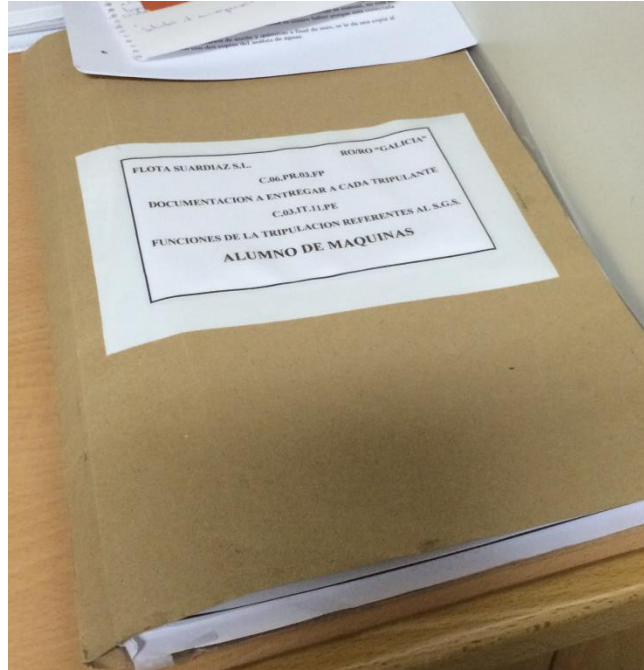
2. METODOLOGÍA

En el actual apartado, y una vez realizada una descripción del buque en el capítulo anterior, expondremos la metodología empleada para el presente trabajo.

Como alumno de máquinas durante un período de 5 meses en el buque RO/RO Galicia, mi principal labor es la de prestar el mayor interés posible, auxiliar a los oficiales en las tareas de la máquina en las que se me requiera y aprender todo lo que esté en mi mano. En mis prácticas de embarque realizo un total de 10 meses, navegando casi 5 de ellos en este buque que es el que nos atañe en el presente trabajo, desde Noviembre de 2014 hasta Marzo de 2015.

El primer día de embarque me entregan la documentación a entregar a cada tripulante “funciones de la tripulación referentes al Sistema de Gestión de la Seguridad – Alumno de máquinas”, correspondiente al puesto que voy a adquirir a bordo. Con el fin de conocer las medidas preventivas sobre los riesgos que se mencionan en ella. [46]

Ilustración 32: Documentación referente al Sistema de Gestión de la Seguridad



Fuente: Trabajo de campo [46]

Como mi puesto en la máquina implica, acompaño a todos los miembros de la misma en sus labores diarias para aprender de todos los rangos en cuanto pueda, pero principalmente y los primeros días acompaño únicamente al 2º oficial para aprender a realizar sus tareas de mantenimiento y revisión diarias. A medida que voy conociendo la máquina y todos sus sistemas me asignan labores referentes a la toma de datos diarios y semanales para coger mayor soltura con todos los equipos.

Entre las tareas diarias que me asignan realizo la toma del parte diario general de la máquina (en el que se acogen todas las temperaturas, rpm de los MMPP, presión de aire, potencia, frecuencia, amperaje y tensión del alternador, etc.), el control y relleno de aceite a varios de los equipos como bocinas, servo, depuradoras, etc., relleno de la cisterna, control de los disparos del módulo de combustible y filtros automáticos, observación de fugas, relleno de aceite a los MMPP,...

Ilustración 33: Indicadores cabina de control



Fuente: Trabajo de campo

A medida que voy cogiendo más conocimientos y rutinas dentro de la máquina, comienzo a desempeñar labores de apoyo en el desmontaje y reparación de equipos y sistemas, como por ejemplo; desmontaje-montaje para la posterior limpieza y cambio de juntas de depuradoras, cambio de inyectores y recuperación de toberas de los mismos, trabajos en instalaciones eléctricas, limpieza de filtros varios, cambio de bombas de inyección de combustible y mantenimiento de enfriadores. También de manera más autónoma sustituía al segundo oficial en labores como el arranque y chequeo de los botes salvavidas, arranque semanal del motor de emergencia, análisis de agua de calderas, MMPP, etc.,

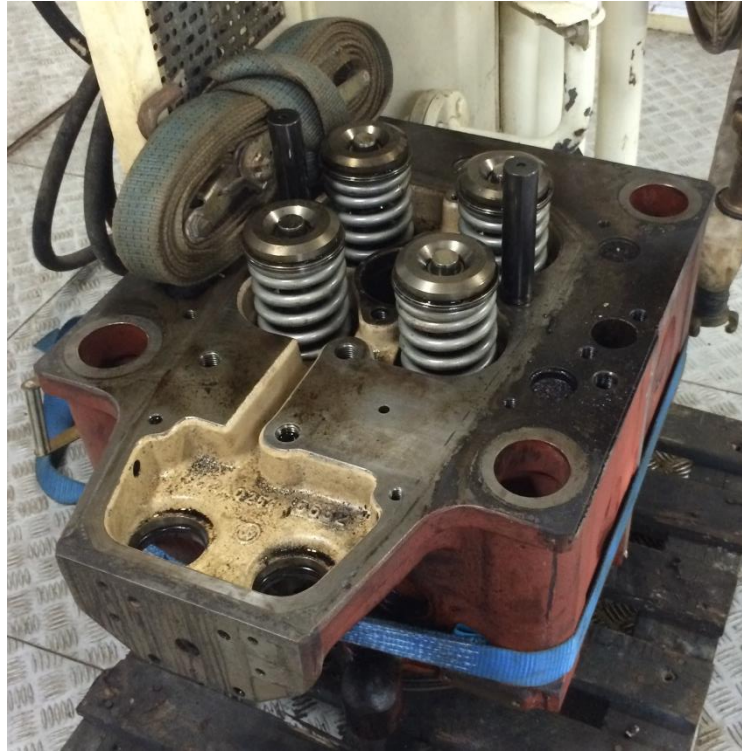
Ilustración 34: Bomba de inyección extraída



Fuente: Trabajo de campo

Cuando puntualmente se requería de una ayuda extra estaba presente en cambio de culatas de los motores principales y auxiliares, así como otras tareas de semejante calibre hasta llegar al punto de participar como uno más tomando parte en las mismas ya con procedimientos de trabajo aprendidos y desarrollados.

Ilustración 35: Culata desmontada



Fuente: Trabajo de campo

Tomaba también participación apoyando al oficial de guardia y al jefe de máquinas en las maniobras de entrada y salida de puerto, tomas de combustible y revisión de guardias.

V.RESULTADOS

En el presente capítulo expondremos los resultados obtenidos a partir del estudio basado en el trabajo de campo como alumno de máquinas en el buque Galicia durante un proceso de mejora para el cumplimiento de las reglas acogidas en el Anexo VI del Convenio Marpol.

Según la Regla 14 del Anexo VI del Convenio Marpol “Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”, y teniendo en cuenta la navegación del buque Galicia, éste deberá someterse a un procedimiento de adaptación mediante el cual se le permita ejercer la navegación en la zona norte de la línea descrita en el capítulo “Material y Métodos”. Una vez en el Canal de La Mancha, el buque deberá navegar con un combustible bajo en contenido de SO_x, o con Diesel Oil como combustible principal cumpliendo la legislación aplicable para este caso.

Dicha adaptación deberá ser realizada a comienzos de Enero de 2015 en el puerto de Santa Cruz de Tenerife, antes de realizar su primer viaje al Norte de Europa, entrando en el Canal de La Mancha con latitud 5° Oeste consumiendo un combustible con bajo contenido en azufre, puesto que desde el 1 de Enero del mismo año se hace vigente la ley de zona ECA. Y yo como alumno de máquinas durante ese mismo periodo, voy a reflejar en el presente capítulo los cambios sufridos en el departamento de máquinas, así como los procedimientos y aspectos que se han tenido en cuenta para dicha adaptación.

Posteriormente haremos un estudio del comportamiento de la máquina tras la reparación.

A priori, la adaptación consiste en adaptar los tanques de combustible comprometidos en el procedimiento de cambio para almacenar un nuevo combustible, así como la instalación de nuevas líneas de tuberías para los circuitos del mismo. Esto será llevado a cabo por un taller externo contratado exclusivamente para esta tarea, donde los oficiales y personal de máquinas no tendrán prácticamente

participación, salvo la de apoyar y asistir a dicho taller, además de la supervisión y firma del Jefe de Máquinas.

1. LEGISLACIÓN APLICABLE.

Para examinar la legislación que compromete la actividad del buque Galicia, el departamento técnico y de inspección evalúa el **Anexo VI Revisado del convenio Marpol** “*Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques*”, así como el **Código técnico sobre los NOx** 2008 (Edición 2009) y Directiva EU 2005/33/EC. Con dicha evaluación del Anexo y atendiendo a las exigencias del mismo, se revisan las prescripciones generales y prescripciones aplicables en las zonas de control de las emisiones de la Regla 14 del Anexo VI “*Óxidos de azufre (SOx) y materia particulada*”, así como también el correspondiente examen de la norma. Con la intención de crear un procedimiento de actuación lo más adecuado posible al establecido en la regulación 14 del Anexo y así trasladarlo al buque para prevenir a la tripulación de los cambios consecuentes y del nuevo procedimiento de cambio de combustible para entrar en las Zonas SECA. [47]

1.1. PRESCRIPCIONES GENERALES DE LA REGLA 14 “ÓXIDOS DE AZUFRE (SOX) Y MATERIA PARTICULADA.

1. El contenido de azufre de todo fueloil utilizado a bordo de los buques no excederá los siguientes límites: [47]

1. 4,5% masa/masa antes del 1 de enero 2012.
2. 3,5% masa/masa el 1 de enero 2012 y posteriormente; y

3. 0,5 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 (Resolución MEPC.82(43)).

1.2. PRESCRIPCIONES APLICABLES EN LAS ZONAS DE CONTROL.

1. A los efectos de la presente regla, las zonas de control de las emisiones incluirán:
 1. La zona del mar Báltico definida en la regla 1.11.2 del Anexo I, la zona del mar del Norte definida en el apartado 1) f) de la regla 5 del Anexo V;
 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.
 3. Para este caso no se tendrá en cuenta la zona de Norteamérica definida por las coordenadas que figuran en el apéndice VII del presente Anexo.

2. 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.

3. 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 apartado 4 de la presente regla.

4. 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 de registro prescrito por la Administración, el volumen de fueloil con bajo contenido en 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.

5. 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 apartado 3.2 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 apartado 4 de la misma. [47]

1.3. EXAMEN DE LA NORMA.

1. Antes del 2018 se llevará a cabo un examen de la norma especificada en el apartado 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: [47]

1. El estado de la oferta y la demanda mundial de fueloil para cumplir lo indicado en el apartado 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.

2. 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 se lleve a cabo el examen mencionado en el párrafo 8 de la presente regla. El grupo de expertos elaborará la información pertinente para que las Partes puedan decidir con conocimiento de causa.

3. 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 especifica en el apartado 1.3 de la presente regla. Si se decide que ello no es posible, la norma indicada en este apartado entrará en vigor el 1 de enero de 2025.

2. CONDICIONES DE VISCOSIDAD.

Los motores diésel de velocidad media de Wärtsilä están diseñados para operar con combustible pesado (combustible residual) con una viscosidad de 55 cSt a 100°C (aproximadamente 730 cSt a 50°C) y funcionará de forma satisfactoria con combustibles mezclados de menor viscosidad, así como con destilados. [48] Éste es un aspecto muy importante que hay que tener en cuenta cuando se seleccione un combustible en bajo contenido de azufre, ya que si la viscosidad del nuevo combustible no corresponde o no está dentro de los límites que requiere el fabricante, podría tener lugar un gripaje del pistón de la bomba de inyección de combustible o un gripaje de la aguja de la boquilla de combustible, entre otros problemas a destacar.

Para este motor los límites de viscosidad en la admisión en condiciones de funcionamiento son 2,0 cSt para Low Fuel Oil y 16-24 cSt para fuel pesado.

El fabricante advierte que deben evitarse, sin embargo, los combustibles mezclados de una viscosidad entre aproximadamente 4 y 7 cSt a 100°C (12 y 30 cSt a 50°C) que contengan una proporción de destilado del 30 al 60%, debido al riesgo de precipitación de los componentes pesados de la mezcla, con la consiguiente obstrucción de filtros y una gran cantidad de lodos en la separadora. [48]

3. TANQUES Y CIRCUITOS DE COMBUSTIBLE.

Por diseño, el buque cuenta con los circuitos de fuel y gasoil independientes uno del otro, así como con sus respectivos tanques de almacén y de servicios diarios.

Empezando por el fuel, encontramos que el buque cuenta con un tanque de sedimentación (30C), dos tanques de servicios diarios (29Br y 28Br), y los tanques de almacén tras el piano de válvulas que son: 13Br, 13Er, 9Br, 9Er, 4Br y 4Er. Cuyas capacidades vemos reflejadas en la siguiente tabla:

Tabla 12: Capacidades iniciales de los tanques de fuel

TANQUES	CAPACIDADES MÁXIMAS EN LITROS
TQ. DIARIO HSFO (29Br)	30.000 L.
TQ. DIARIO HSFO (28Br)	30.000 L.
TQ. SEDIMENTACION HSFO (30C)	65.000 L.
TQ. ALMACEN HSFO 13Br	80.000 L.
TQ. ALMACEN HFSO 13Er	80.000 L.
TQ. ALMACEN HSFO 9Br	70.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 9Er	70.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 4Br	95.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 4Er	95.000 L.

Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

Siguiendo con los tanques de gasoil, nos encontramos con los siguientes:

Tabla 13: Capacidades iniciales de los tanques de gasoil

TANQUES	CAPACIDADES MÁXIMAS EN LITROS
TQ. ALMACEN MGO (26C)	80.000 L.
TQ. DIARIO BR	5.000 L.
TQ. DIARIO ER	5.000 L.

Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

El buque dispone de seis tanques de almacén de fuel oil, cuya capacidad total es de 490 m³, que le proporcionan una autonomía de aproximadamente 21 días de navegación a una velocidad de crucero de 14 nudos, con un índice de carga del 65 %.

Del tanque de almacén que se encuentre en servicio, se realiza el trasiego de combustible al tanque de sedimentación, cuya capacidad es de 65 m³, mediante una bomba de tornillo de accionamiento eléctrico. Para el servicio de trasiego de diesel oil, se dispone de una bomba idéntica y que dispone de las válvulas necesarias, para que en caso de ser necesario poder ser utilizada como bomba de trasiego de fuel oil.

Ilustración 36: Bombas de trasiego de combustible



Fuente: Trabajo de campo

En el tanque de sedimentación, las impurezas sólidas y el agua se van decantando en la zona inferior del tanque y son eliminadas mediante una válvula de purga. La operación de purgado tanto del tanque de sedimentación como de los tanques de servicio diario se efectúa diariamente por el segundo oficial de máquinas, el cual se encarga también de las operaciones de trasiego.

El fuel alojado en el tanque de sedimentación es sometido a un proceso de purificación antes de ser enviado a los tanques de servicio diario. Para la purificación del combustible el buque dispone de dos purificadoras que pueden funcionar independientemente. Por norma general tan sólo una de ellas está en funcionamiento, permaneciendo la segunda en stand-by, intercambiándose la prioridad de funcionamiento mensualmente. Una de ellas posee un calentador cuyo fluido calefactor es vapor mientras que la otra posee un calentador mediante resistencias eléctricas. De esta forma se garantiza el proceso de purificación de combustible, incluso en condiciones en las que no esté operativo el servicio de vapor.

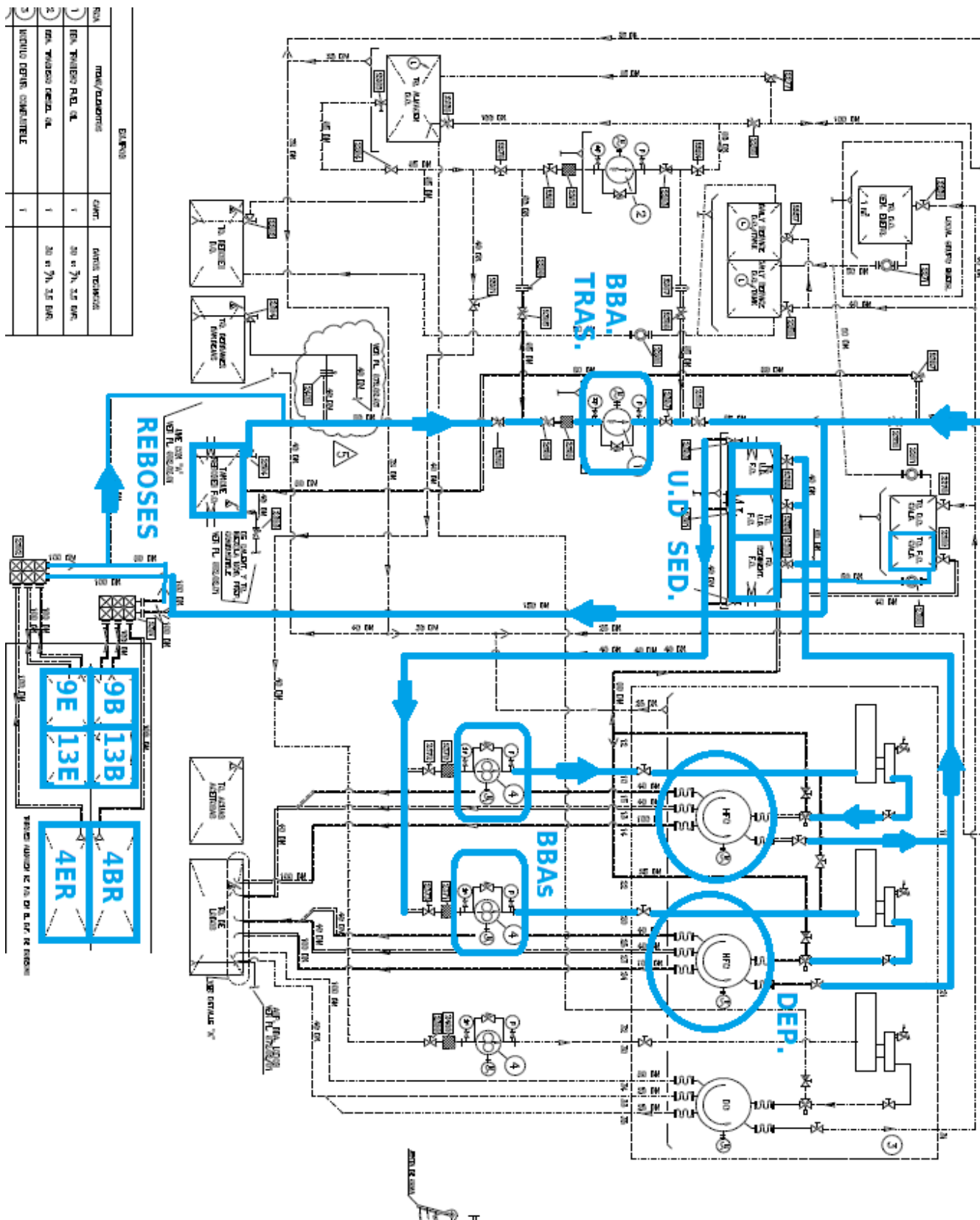
El combustible que se encuentra en el tanque de sedimentación es aspirado por la bomba de alimentación de la depuradora que se encuentre en servicio y es enviado hacia el calentador, en el cual adquiere la temperatura necesaria para que el proceso de purificación se efectúe de forma correcta. De no ser así, a la salida del calentador se encuentra dispuesta una válvula de tres vías de accionamiento neumática, la cual deriva el flujo de combustible de nuevo hacia el tanque de sedimentación. Por el contrario, si la temperatura es la adecuada, el fuel oil entra en la purificadora donde es tratado y una vez libre de agua e impurezas sólidas es enviado a los tanques de servicio diario. Éstos tienen una capacidad de 30 m³ cada uno, permaneciendo uno en servicio y el otro en reserva.

El proceso de purificación se efectúa de forma continua. En consecuencia a ello, cabe la posibilidad, sobre todo durante las estancias en puerto al estar los motores parados, que el tanque de servicio diario se encuentre al límite de su capacidad y rebose. Los reboses de los tanques de servicio diario están conectados con el tanque de

sedimentación. Los reboses tanto de los tanques de almacén como del de sedimentación se almacenan en un tanque de reboses cuya capacidad es de 10 m³.

A continuación se muestra un plano donde se ha representado el servicio de trasiego y purificación de fuel en color azul;

Ilustración 37: Plano de servicio de trasiego y purificación de combustible



Fuente: Trabajo de campo [41]

(Elaboración propia)

El sistema de alimentación de combustible toma el combustible de los tanques de servicio diario. No obstante, antes de entrar en el módulo de alimentación de combustible, al fuel oil se le adiciona un aditivo químico por medio de una bomba dosificadora. El aditivo adicionado es FUELCARE, que también pertenece a la marca UNITOR. Este aditivo le otorga al combustible una mayor homogeneidad, evitando su estratificación y dispersando los lodos. Facilitando de esta forma el proceso de pulverización en el interior de la cámara de combustión.

Estos motores que funcionan con aceite pesado necesitan algunos aparatos auxiliares como: tanque de mezcla, calentador, viscosímetro, etc, que conforman el módulo de combustible y que aparece representado en la siguiente imagen n° 38.

Ilustración 38: Módulo de combustible

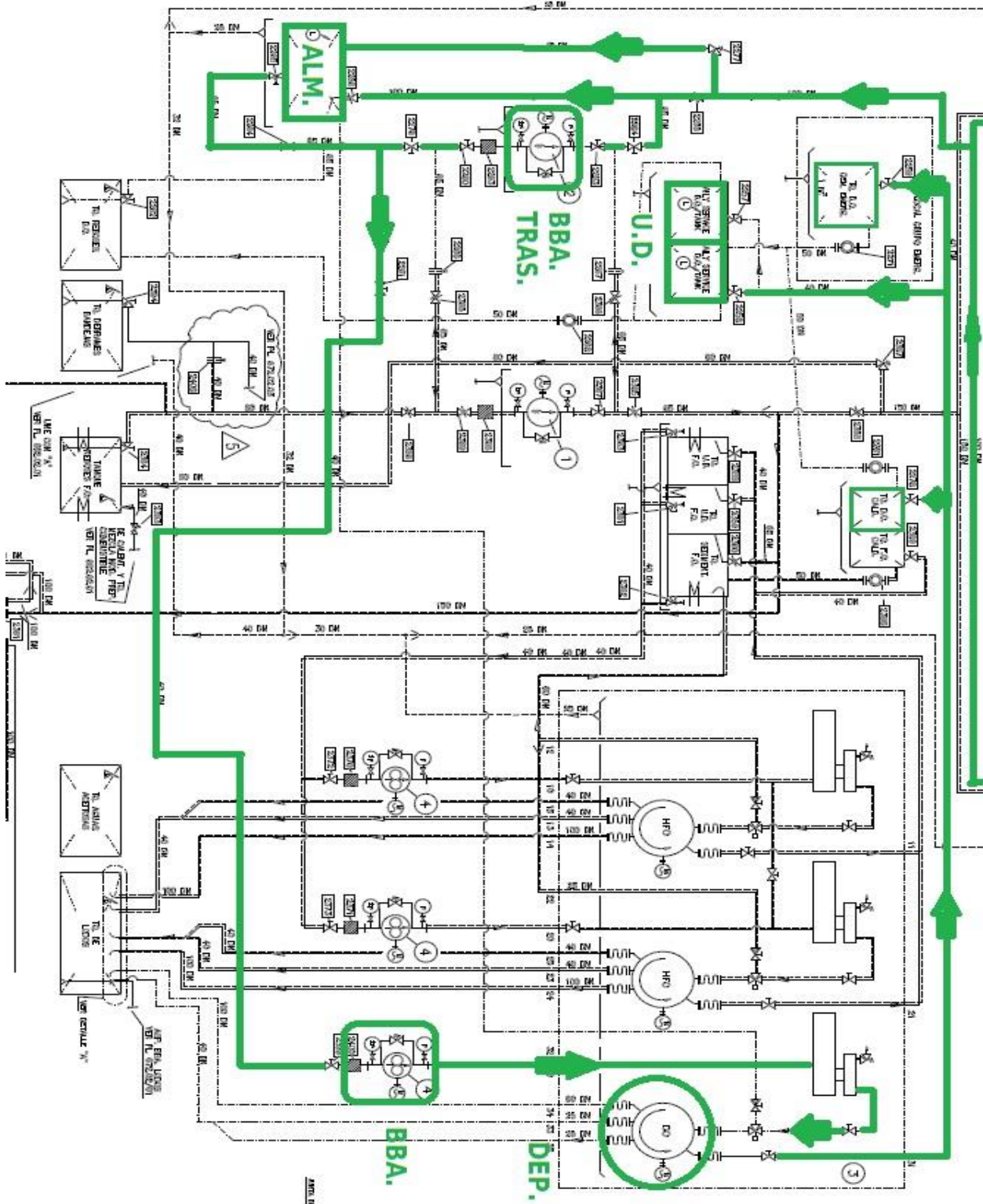


Fuente: Trabajo de campo

Una vez estudiado el circuito de fuel, vamos a proceder a explicar el circuito de gasoil. Para ello vamos a usar de apoyo el mismo plano de servicio de trasiego y purificación de combustible (ilustración n° 37), pero centrándonos en el circuito de GO;

Partiendo desde las líneas superiores, que al igual que para el circuito de FO son las correspondientes a la toma de consumo, se llena el tanque de almacén de gasoil (26C). De este tanque de almacén la bomba de gasoil aspira haciendo pasar el combustible por la depuradora de gasoil, para poder llenar o bien los tanques de uso diario de los generadores auxiliares, o bien para llenar la caldera con gasoil, incluso dispone de una línea para abastecer al tanque de almacén del motor de emergencia en caso de que fuera necesario.

Ilustración 39: Plano de servicio de trasiego y purificación de gasoil



Fuente: Hijos de J. Barreras [41]

(Elaboración propia)

El llenado del tanque de la caldera y de los tanques de servicio de los generadores auxiliares los realiza el segundo oficial o el oficial que esté de guardia si fuese necesario. En este barco, habitualmente se suele llenar primero la caldera y luego los tanques de servicio de los auxiliares. El motivo de que se suele proceder en ese orden radica en que la caldera, al estar en lo más alto del barco, acumula combustible en la línea de aspiración del tanque. De esta manera al llenar los otros tanques la línea quedaría vacía, con el único inconveniente de que al realizar el cambio de tanques hay que prestar especial atención a la presión de descarga que alcanza la depuradora, puesto que el vaciado de la línea genera un aumento de presión.

Si se diera el caso de llenar demasiado el tanque de almacén 26C o los tanques de servicio diario de los generadores auxiliares, éstos tienen preparadas unas líneas que mandan el combustible sobrante directamente al tanque de reboses de GO.

4. EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS A TOMAR.

Tras un examen desarrollado por el departamento de inspección de la compañía y, atendiendo a los consejos y advertencias del fabricante, se ha optado por descartar los métodos secundarios de reducción de azufre en el combustible, como el lavado de gases de escape mediante depuradoras o el uso de GNL como combustible, y se ha concluido en usar como combustible con bajo contenido de azufre el MGO.

El MGO, o Marine Gas Oil, es un combustible obtenido a partir de la destilación del crudo, diseñado para ser usado en motores diésel dentro de aplicaciones móviles, fijas o portátiles, cuyo contenido en azufre es de 10 mg/kg. Siendo este combustible apropiado para cumplir con el límite establecido en la normativa referente a las zonas SECA vistas anteriormente y teniendo en cuenta los costes de la utilización de éste, cuyo precio es un 55% superior al del fuel oil, se resume como la mejor alternativa para desarrollar la actividad en el Norte de Europa cumpliendo con la legislación aplicable para este caso.

Obedeciendo a las exigencias del Marpol de cumplir con la legislación en el primer viaje al Norte de Europa, entrando ya en el Canal de La Mancha emitiendo por debajo del 0,1% de azufre, que será a mediados de Enero de 2015 (según la ruta del buque), se anticipa una parada para recibir a un taller externo y proceder a la adaptación del buque durante la primera semana de Enero.

4.1. CAMBIOS A PROCEDER.

Durante la semana de reparación, un taller externo a la compañía se encargará de la limpieza del tanque de servicio diario de HSFO 28Br y del tanque de almacén 13Er, cuyas capacidades son 30 m^3 y 80 m^3 respectivamente, para convertir estos tanques de fuel en tanques de almacén y uso diario de MGO. Así como también se

modificarán las líneas de llenado, trasiego y servicio de alimentación de fuel y gasoil para el uso del nuevo combustible. Además, se instalará un nuevo enfriador para el gasoil que permitirá controlar la temperatura y, así, la viscosidad del combustible con el fin de evitar los problemas que conllevaría alimentar los motores con unos límites fuera de los establecidos por el fabricante, que en este caso es Wärtsilä.

La limpieza del tanque de servicio diario 28Br y la limpieza del tanque de almacén 13Er procedieron de la siguiente manera;

- Primero, una vez vacío completamente el tanque de fuel, un hombre de la empresa contratada entró a través de un “pasa-hombres” con una pistola conectada a una bomba de gasoil con la que disparaba a gran presión el combustible contra los mamparos.
- Con la ayuda de bombas neumáticas, se bombeaban los residuos del fondo del tanque a unas garrafas que se iban extrayendo del barco según se llenaban.
- Mediante el uso de rasquetas, espátulas y una gran cantidad de trapos, se terminaban de limpiar las zonas más complicadas del tanque.
- Y por último, se disparaba los mamparos de nuevo con gasoil para eliminar los posibles tramos donde hubiesen restos de fuel pesado.

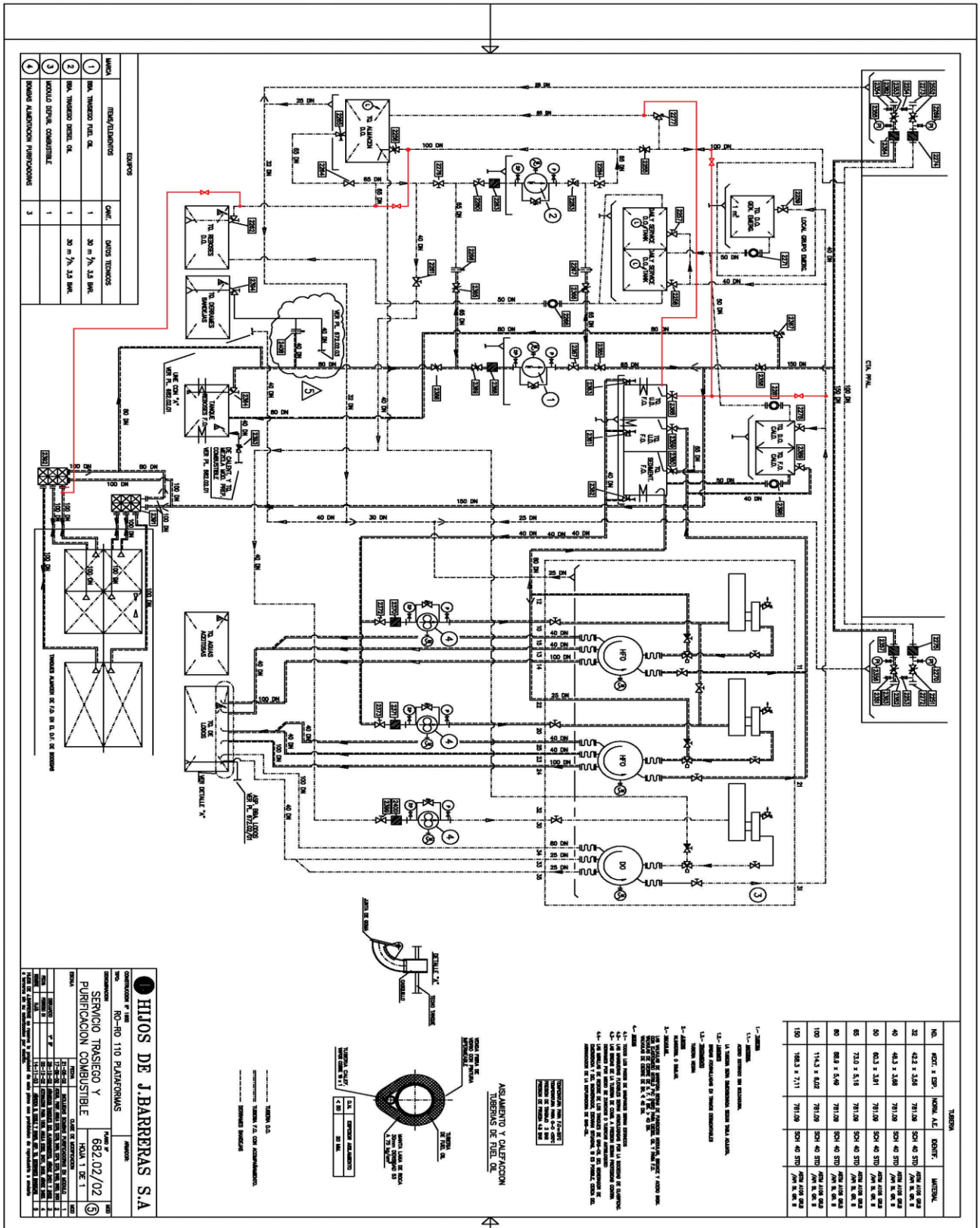
La ventilación de los tanques duró tanto como los días restantes de reparación, que fueron dos días más.

Habiendo un nuevo tanque de almacén y un nuevo tanque de servicio diario para el gasoil, el circuito de alimentación y depuración del combustible tiene que variar consecuentemente.

Como se puede ver en el plano de la imagen adjunta nº 40, se comienza pinchando una tubería en la línea del tanque de reboses de GO hacia el tanque de almacén 13Er, con una válvula que quedará normalmente abierta para el consumo de combustible. Para este tramo se han usado 1,5 m de tubería de 2,5”, 1 T de 2,5” y 4 codos a 90°. También para el llenado del tanque 13Er en los consumos de combustible, se ha

pinchado desde la toma de consumo (con una previa válvula de seguridad) hasta el tramo donde fue pinchada la línea anterior, usando 1.8 m de tubería de 2", 4 codos a 90° de 2" y dos bridas.

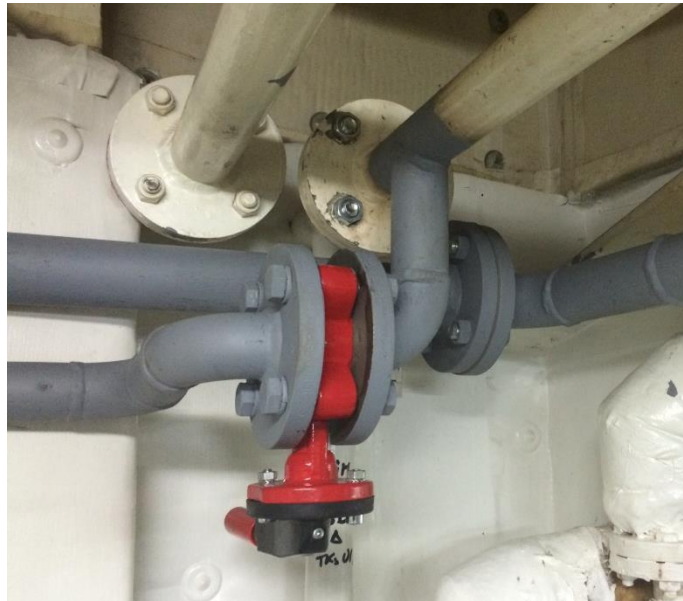
Ilustración 40: Plano modificado del sistema de combustible



Fuente: Hijos de J. Barreras [41]

(Elaboración propia)

Ilustración 41: Pinchazo en la toma de consumo hacia 13Er con válvula de seguridad

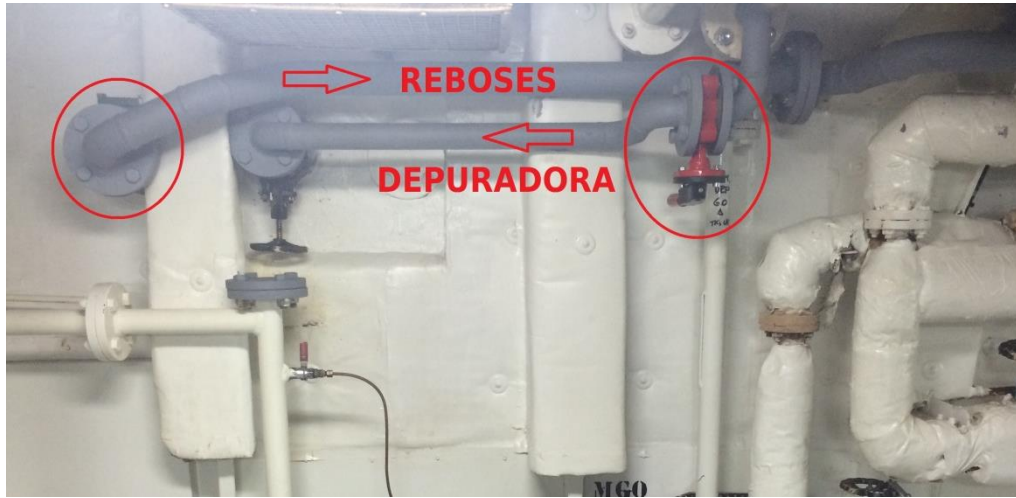


Fuente: Trabajo de campo

Continuando con la línea de descarga de la depuradora de gasoil hasta el tanque de uso diario 28Br, se instala una válvula en esta línea empleando 1 metro de tubería de 1,5", 2 bridas de 1,5", 6 codos de 90° de 1,5" y 1 brida ciega de 1,5". De esta forma, la bomba de la depuradora aspirará desde el tanque de almacén de GO 26C impulsándolo a través de la depuradora hacia el tanque de uso diario sin dificultad.

Para el caso de que el tanque de servicio diario rebose, se instala una línea de tubería que lleva el combustible sobrante directamente hasta el tanque de almacén 26C, empleando 4 m de tubería de 2", 4 bridas de 2", 1 brida ciega de 2" y 4 codos a 90° de 2".

Ilustración 42: Pinchazo en la línea de la depuradora GO y salida hacia tk de reboses



Fuente: Trabajo de campo

Además, se prepara una línea de llenado del tanque de uso diario a través de la bomba de trasiego de gasoil desde el tanque 13Er. Para este tramo han hecho falta 1,2 m de tubería de 1,5” y 2 bridas de 1,5”.

En las imágenes adjuntadas a continuación se representa el pinchazo en la tubería de aspiración del tanque 13Er y el pinchazo en la línea de llenado del 26C y el tanque de reboses con la bomba de trasiego, así como la válvula para seleccionar aspirar combustible desde el 13Er;

Ilustración 43: Pinchazo en la aspiración del tanque 13Er



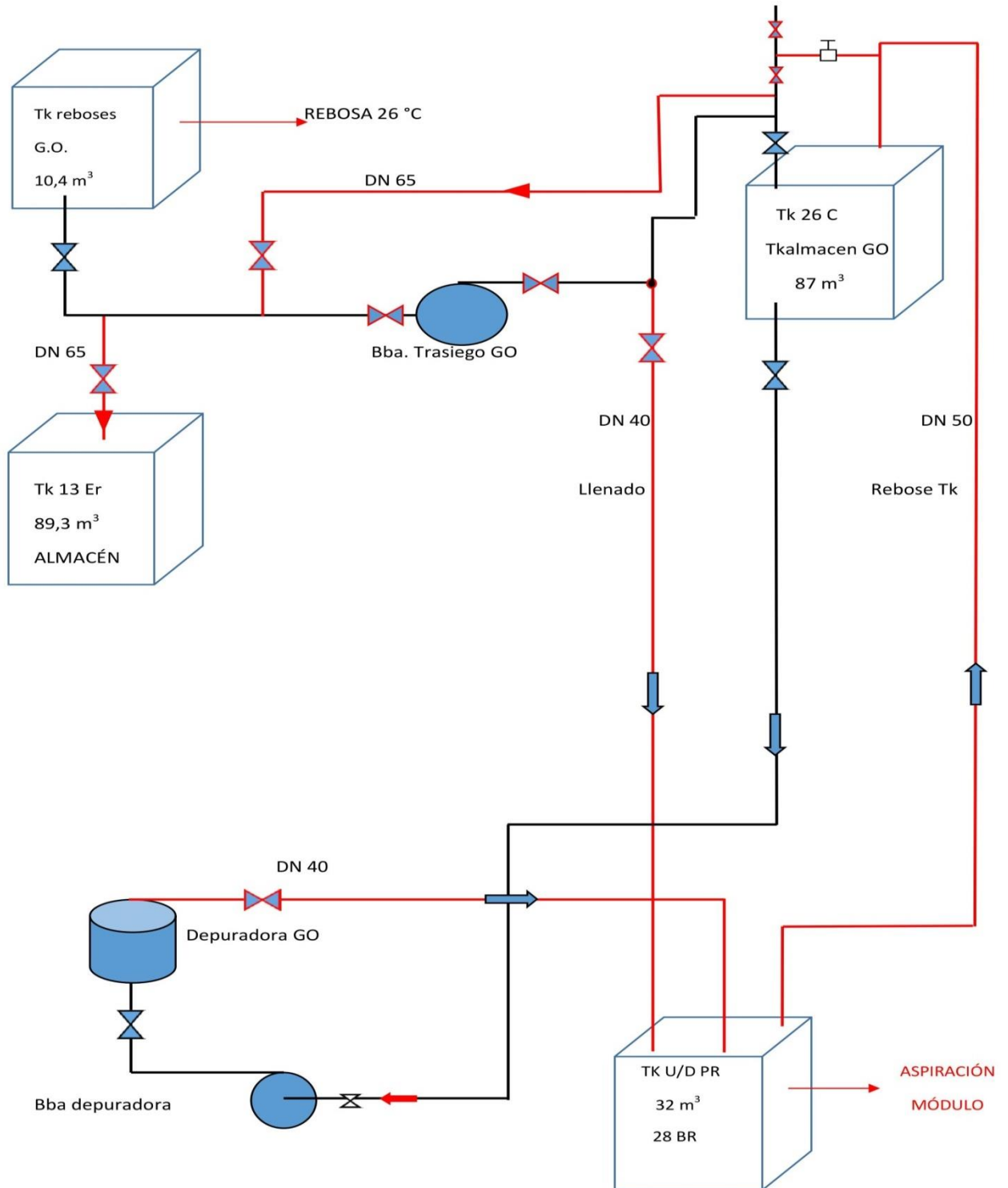
Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 44: Pinchazo en la línea de trasiego con el tanque 26C y reboses



Fuente: Trabajo de campo

Ilustración 45: Plano representativo de nuevas líneas y elementos en el sistema de combustible



Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

Como se introduce anteriormente, se instala un intercambiador de temperatura en la línea de retorno del combustible. [49] Para la instalación del enfriador es necesario pinchar una tubería de agua salada con un tramo de tubo hasta la entrada del enfriador, así como también se ha de conectar la salida de agua salada a una descarga perteneciente a otro sistema. La línea de retorno de combustible se ha cortado en el tramo donde irá el enfriador, de esta manera se conecta una derivación al intercambiador de temperatura con válvulas que permitirán dejar pasar o no, a través de un bypass, el combustible al intercambiador. Con unas válvulas en la línea de agua salada, será posible regular abriendo más o menos la cantidad de agua salada que pasará por dentro del enfriador consiguiendo controlar la temperatura final del gasoil, así como su viscosidad. Para esta instalación han sido necesarios los siguientes materiales:

Ilustración 46: Nuevo enfriador de gasoil



Fuente: Trabajo de campo

En la línea de retorno de combustible hacia el enfriador:

- 1,5 metros de tubería de 2"
- 6 codos de 2"
- 2 T de 2"
- 12 bridas de 2"
- 4 bridas roscadas interior de 2" para salidas y entradas del enfriador

En la línea de agua salada al enfriador:

- 40 metros de tubería de 2,5"
- 3 pasamamparos para tubería de 2,5"
- 2 reducciones de 2,5" a 2"
- 8 bridas de 2,5"
- 2 bridas de 2"
- 10 abarcones para tubería de 2,5"
- 8 codos de 90° de 2,5"

Ilustración 47: Imagen virtual del enfriador instalado



Fuente: <https://www.wartsila.com> [49]

En el plano que se muestra a continuación en la ilustración 49, representamos las líneas que van desde el módulo de combustible hasta los MMPP, donde interviene como vimos antes nuestro nuevo enfriador de GO. En rojo podemos ver las nuevas válvulas y los tramos de tubería que se le han añadido al circuito.

Podemos ver que el módulo aspira directamente del tanque de uso diario 28Br, haciendo pasar el combustible primero por los filtros y las bombas feeder, a continuación pasa al tanque de mezcla después de haber pasado por el filtro automático. Seguidamente nos encontramos con las bombas booster para aumentar la presión y pasar por los calentadores y el viscosímetro antes de llegar a los motores principales a una temperatura de 40°C. Al retorno de los principales el combustible ha alcanzado una temperatura de unos 80°C, por lo que se hace necesario el uso del enfriador instalado, que se pretenderá retornar la temperatura a los 40°C iniciales para mezclarse de nuevo en el tanque de mezclas y repetir el circuito.

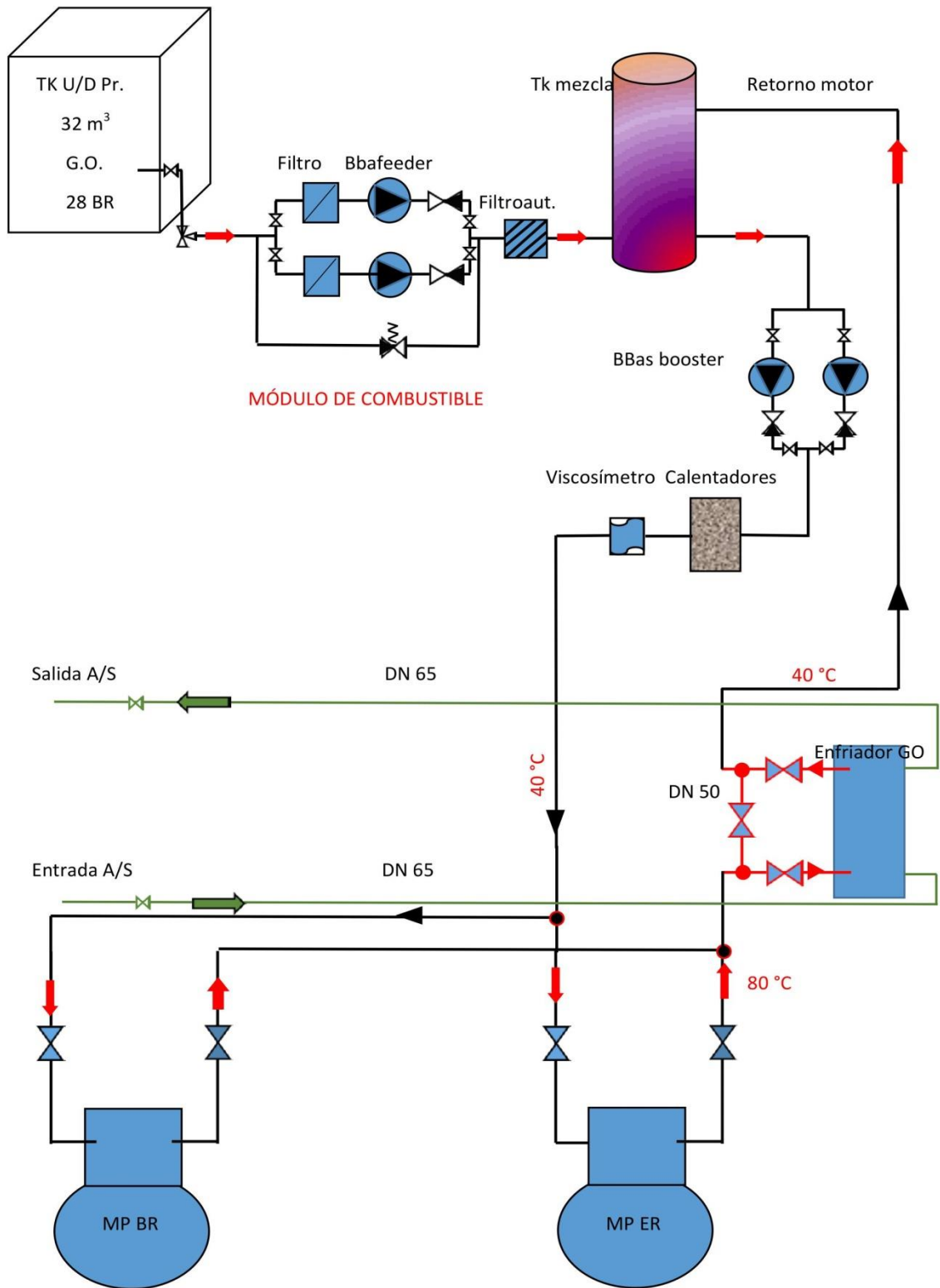
Ilustración 48: Bombas Feeder y Booster del módulo



Fuente: Trabajo de campo

Toda la tubería, codos, reducciones, etc., es de acero negro Schedule 40.

Ilustración 49: Plano representativo de líneas desde el módulo hasta los MMPP



Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

5. TANQUES COMPROMETIDOS EN LA OPERATIVA.

Las capacidades de los diferentes tanques implicados en la operativa tras la reparación, resultarían de la siguiente manera:

Capacidades reales de los tanques de fuel:

Tabla 14: Capacidades de los tanques de fuel después de la adaptación

TANQUES	CAPACIDADES MÁX. EN LITROS
TQ. DIARIO HSFO (29Br)	30.000 L.
TQ SEDIMENTACION HSFO (30C)	65.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 13Br	80.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 9Er	70.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 9Br	70.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 4Br	95.000 L.
TQ ALMACEN HSFO 4Er	95.000 L.
TOTAL:	505.000 L.

Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

Capacidades reales de los tanques de MGO:

Tabla 15: Capacidades de los tanques de gasoil después de la adaptación

TANQUES	CAPACIDADES MÁX. EN LITROS
TQ. DIARIO MGO (28Br)	30.000 L.
TQ ALMACEN MGO (26C)	80.000 L.
TQ ALMACEN MGO 13Er	80.000 L.
TOTAL:	190.000 L.

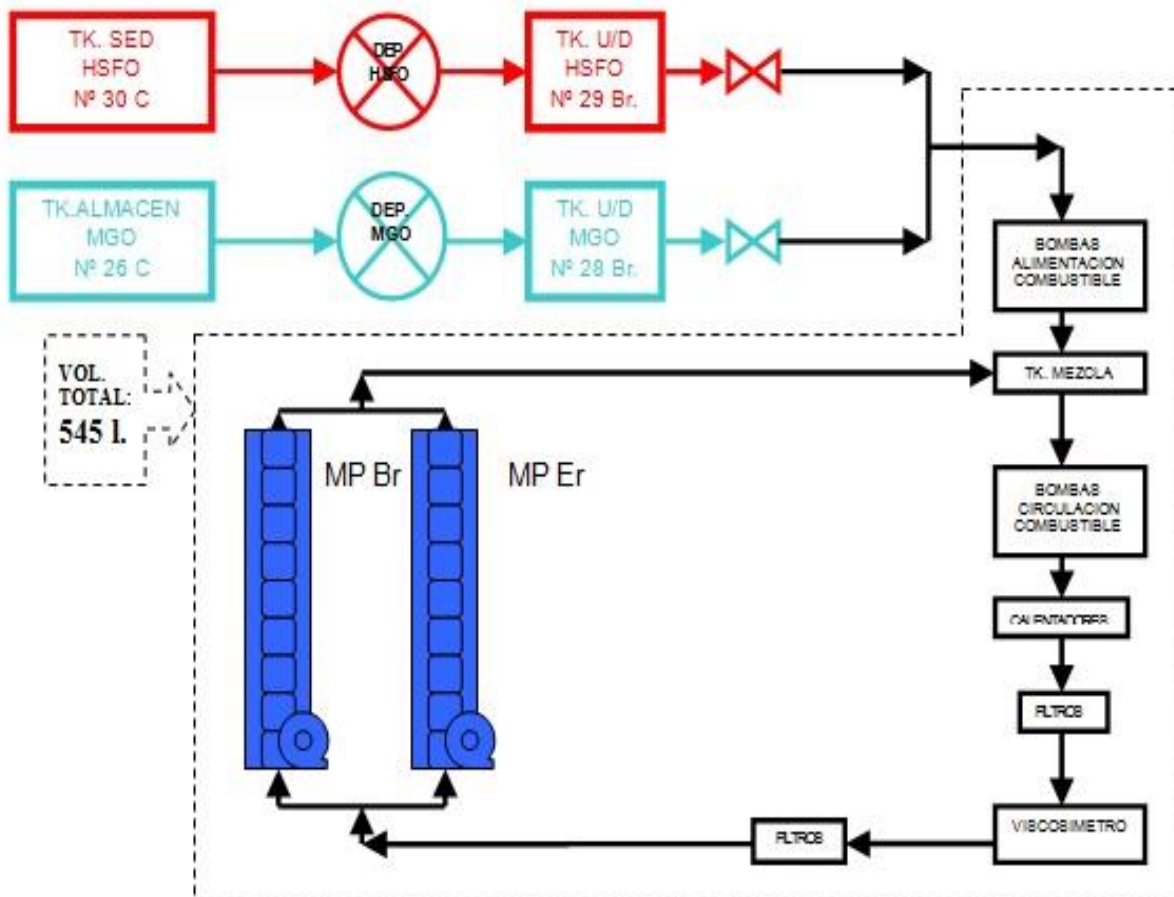
Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

6. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE FUEL EN EL SISTEMA.

Teniendo en cuenta el siguiente circuito de combustible y las capacidades de las líneas que componen el circuito de alimentación y retorno, así como todos sus elementos, podremos estimar el volumen total de combustible que compromete al sistema.

Ilustración 50: Circuito de combustible



Fuente: Trabajo de campo

A continuación explicaremos detalladamente cómo hemos llegado al cálculo del volumen total de combustible en el sistema.

Para ello hemos usado la fórmula para el cálculo del volumen:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde;

- π equivale a 3,14;
- r , corresponde al radio de la tubería, el cual lo hallaremos usando el diámetro nominal dividido entre 2;
- h , corresponde a la altura, que en este caso consideraremos la longitud del tramo de tubería que queremos conocer.

Cabe destacar que el valor de la longitud y el diámetro la hemos tomado en milímetros, lo que implica que hay que hacer una conversión de unidades para obtener decímetros cúbicos a partir de los milímetros cúbicos que nos da el resultado de la ecuación. Y como ya sabemos, 1 decímetro cúbico equivale a 1 litro.

Por un lado, hemos calculado el volumen de cada tramo de tuberías tal y como se muestra en la tabla nº 16, y por otro lado hemos considerado el volumen total que pueda existir en otros componentes del sistema de combustible.

Tabla 16: Tuberías que conforman el sistema de combustible

Descripción de las tuberías	Longitud Tubería (milímetros)	Diámetro nominal (milímetros)	Volumen (litros)
Tks. S/D al módulo combustible	12600	50	24.7

V. RESULTADOS

Módulo de combustible	23300	25	11.43
Modulo a los MM.PP conjuntas	58000	40	72.9
A cada Motor por separado	68000	25	33.4
En MM.PP	17600	80	88.5

Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

Tabla 17: Otros componentes del sistema de combustible

Descripción del equipo	Volumen (lts)
Filtro automático	9.6
Filtros dobles de combustible	34
Calentador de vapor	35
Calentador eléctrico	160
Tanque de desaireación	65
Bombas de alim. y circulación con filtros	10

Fuente: Trabajo de campo

(Elaboración propia)

Si sumamos todos los volúmenes de todos los tramos de tubería junto a los otros componentes del sistema, nos resulta un volumen total de combustible de **545 litros**.

Tomando como ejemplo el primer tramo que representamos en la tabla n° 16 procederemos a explicar cómo hemos considerado dicho tramo; desde el tanque de servicio diario hasta el módulo de combustible hay una serie de tuberías por las que

circula el combustible. Para conocer la longitud de los tramos de tubería se ha utilizado un plano como referencia y se han medido dichas tuberías.

En el caso de otros componentes del sistema como las bombas de alimentación y circulación de combustible, se ha consultado el manual del fabricante de estos elementos donde figura el volumen total que compromete a dichos componentes.

7. CONSUMOS DE LOS MOTORES PRINCIPALES.

Para la elaboración de los cálculos de dilución se tendrán en cuenta los consumos por hora de los motores principales, dependiendo de la carga de los mismos y del

V. RESULTADOS

número de motores que se estén empleando en cada momento de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 18: Consumos con uno y dos motores

<i>Régimen de carga</i>	<i>Velocidad (nudos)</i>	<i>Consumo (m3/día)</i>	<i>Consumo (lts/h)</i>	<i>Nº de motores</i>	<i>Litros/Milla</i>
65%	15	26,4	1125	2	75,00
70%	15,3	27	1150		75,16
75%	15,5	27,6	1170		75,48
80%	15,7	28,3	1190		75,80
85%	16	28,8	1216		76,00
90%	16,2	30	1250		77,16
<i>Régimen de carga</i>	<i>Velocidad (nudos)</i>	<i>Consumo (m3/día)</i>	<i>Consumo (lts/h)</i>	<i>Nº de motores</i>	<i>Litros/Milla</i>
65%	9,3	11,3	510	1	54,84
70%	9,8	13,2	565		57,65
75%	10,1	14,4	625		61,88
80%	10,5	15,9	670		63,81
85%	10,8	16,1	690		63,89
90%	11,1	17	715		64,41

Fuente: Trabajo de campo (Elaboración propia)

A continuación analizaremos los consumos de combustible según los regímenes de carga más usuales con uno y dos motores.

Habitualmente en este barco se navega a un régimen de carga del 75% con 2 motores, lo que supone un consumo diario de 27,6 metros cúbicos al día, o bien 1.170 litros a la hora, desarrollando una velocidad de entre 15,3 y 15,5 nudos.

Con 1 sólo motor el régimen más común es el 80%, ya que a este se desarrolla una velocidad de entre 10 y 11 nudos dependiendo de la carga del barco, velocidad suficiente para respetar la línea y consumir prácticamente la mitad que con dos motores.

8. CAMBIO DE UN COMBUSTIBLE A OTRO.

En el siguiente apartado vamos a explicar cómo proceder al cambio de un combustible a otro.

Como vimos en apartados anteriores, el buque Galicia cuenta con un tanque de sedimentación de alto contenido de azufre (tanque nº 30C), un tanque de MGO que hace a modo de sedimentación del gasoil (tanque nº 26C) y dos tanques de servicio diario. Uno de los tanques de servicio diario (tanque nº 29Br) está permanentemente con HSFO, mientras que el otro tanque de servicio diario (tanque nº 28Br) está permanentemente lleno de MGO.

Los circuitos de HSFO y MGO se encuentran completamente separados, únicamente comparten las tuberías que hay aguas abajo de las respectivas válvulas de aspiración de combustible de los tanques de servicio diario de HSFO 29 Br y el tanque de uso diario de MGO 28 Br. [41] Esto comprende la tubería que va desde dichas válvulas al módulo de combustible, todas las tuberías que comprometen al módulo de combustible, filtros, tanque de desaireación, calentadores de combustible y las tuberías de dicho módulo a los motores principales, siendo estas últimas las de alimentación a los motores principales y las tuberías de retorno al módulo de combustible, concretamente al tanque de desaireación, constituyendo hasta este punto un bucle cerrado donde el combustible que no es consumido por los motores recircula, siendo la única alimentación del combustible al tanque de desaireación la que procede única y exclusivamente de los tanques de servicio diario mencionados anteriormente.

El cambio de un combustible a otro se realiza simplemente cambiando la válvula de aspiración de los tanques de servicio diario, es decir, abriendo la válvula de aspiración del tanque de diario MGO nº 28 Br y cerrando la válvula de aspiración del tanque de servicio diario de HSFO nº 29 Br si el cambio es para entrar a la zona ECA, siendo la operación contraria para salir de la misma. Se dispone de una válvula

intermedia entre ambas válvulas de aspiración que, a modo de seguridad, asegura que no sea posible ningún tipo de mezcla de combustibles.

Ilustración 51: Válvula de aspiración tanque 28Br



Fuente: Trabajo de campo

Debido a que el cambio es a partir de la aspiración de los tanques de servicio diario, el volumen de combustible que se mezcla es el volumen comprendido por las tuberías aguas abajo de dichas aspiraciones y que en el apartado anterior se detallaron con sus respectivos volúmenes. Conocida la cantidad de mezcla de combustible que hay que diluir antes de llegar a la zona ECA y por medio del programa de cálculo de tiempo de dilución del combustible, podemos conocer el tiempo necesario para que se produzca dicha dilución y, por tanto, el tiempo necesario antes de llegar a la zona ECA en el cual debemos proceder al cambio de tanque de uso diario, para llegar a ella con el combustible cumpliendo la normativa.

9. CALCULADORAS DE TIEMPO DE CAMBIO Y DILUCIÓN DE COMBUSTIBLE.

Estas herramientas proporcionan una estimación del tiempo requerido para diluir y eliminar todo el HSFO para así cumplir con el límite de 0,1% masa/masa exigido para entrar en una Zona de Control de Emisiones de Azufre.

Es aplicable para un sistema de combustibles muy específico, el cual combina dos servicios con diferente contenido (%) con un volumen específico y dos tanques de servicio. Para la estimación del cálculo se asume que es una mezcla de combustibles ideal, así como un cambio directo y continuado de combustible con alto contenido en azufre a MGO, o viceversa.

El cálculo se basa en el peor caso de una mezcla completa de ambos combustibles durante la etapa de dilución. Es necesario garantizar y especificar la cantidad de combustible listo para su uso en los circuitos durante cualquier procedimiento de cambio.

Para el cálculo se necesita introducir la cantidad de HSFO en el sistema, el dato del consumo de los motores (según sea con 1 o con 2 motores), el contenido de azufre del HSFO y el contenido de azufre del nuevo combustible. Con estos datos, la calculadora nos proporcionará:

- Tiempo optimizado de cambio de combustible.
- Combustible requerido y los costes adicionales que supone.
- Máxima disminución de la temperatura durante el tiempo de cambio.
- Máximo consumo de combustible permitido para cumplir con el requerimiento de 2°C/min (dato que se podría modificar en la calculadora).

En la imagen adjunta observamos una captura a la herramienta **DNVGL Calculator** de la sociedad DNV, sin datos añadidos, donde podemos ver los parámetros que en ella se introducen así como los resultados que genera. [50]

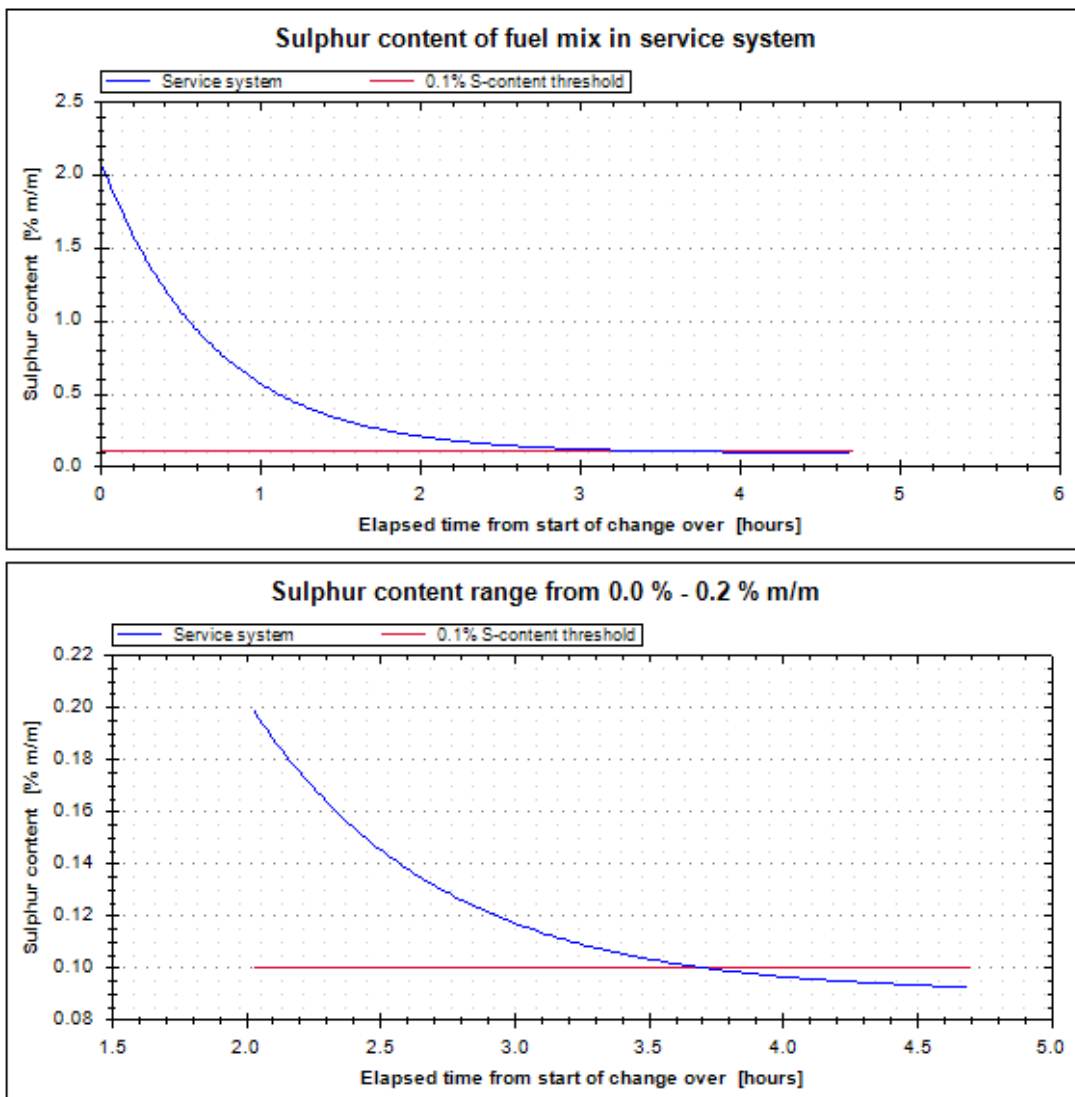
Ilustración 52: Captura de la calculadora DNVGL.

Fuel consumption rate	
Consumption M/E + A/E	<input type="text"/> tons / h
Outlet to service or drain tank (usually closed)	
Return flow from service system to service tank	<input type="text" value="0"/> tons / h
HSFO	
Sulphur content (service tank)	<input type="text"/> % m/m
Price HFO	<input type="text"/> \$/ton
Temperature in service tank	<input type="text"/> °C
Time span from switching off HSFO heater to begin of change over	<input type="text" value="0"/> min
LSFO	
Sulphur content (service tank)	<input type="text"/> % m/m
Price MGO	<input type="text"/> \$/ton
Temperature of MGO in service tank	<input type="text"/> °C
Results	
Optimized lead time	<input type="text"/> hh:mm
Low sulphur MGO needed	<input type="text"/> tons
Additional fuel costs due to change over	<input type="text"/> \$
Maximum temperature decrease	<input type="text"/> °C/min
Max. allowable fuel consumption + return flow to fulfill 2°C/min. requirement	<input type="text"/> tons/h

Fuente: DNVGL Calculator [50]

En la ilustración n° 53 se representan gráficas extraídas de la calculadora DNVGL en las que se muestra el contenido de azufre de la mezcla en el sistema y el rango de contenido de azufre comprendido entre 0,0 % y 0,2% masa/masa. En el eje horizontal define el tiempo transcurrido desde el inicio del cambio.

Ilustración 53: Gráficas de contenido de azufre en la mezcla



Fuente: DNVGL Calculator [50]

Existen otras calculadoras de tiempo de cambio además de DNVGL Calculator, como por ejemplo **FOBAS Change-Over Calculator** ó **Drew Marine LSFO Calculator**.

La calculadora FOBAS usa prácticamente la misma metodología que la que hemos visto anteriormente, en la imagen adjuntada a continuación se puede apreciar que los valores a introducir son: cantidad de combustible en los tanques, contenido de azufre y precio de ambos combustibles. [51]

Ilustración 54: Captura de la herramienta FOBAS

FOBAS Change-Over Calculator
Version 3.1

HSFO - High sulphur fuel oil
LSFO - Low sulphur fuel oil

At start of change over:

HSFO in the settling tank	0,00	t
HSFO in the service tank	0,00	t
HSFO in the service system (inc.mixing tank)	0,55	t
Rate of fuel consumption (engines)	1,15	t/hr

HSFO

Sulphur content	2,10	% m/m
Price	0,00	\$/t

LSFO

Sulphur content	0,09	% m/m
Price	0,00	\$/t

Required sulphur content at engine Inlet
Please select from drop down options or directly enter required value

0,10	% m/m
------	-------

Change over time to achieve required fuel oil sulphur value at engine inlet

7,65	hr
0,00	\$

Note:
Minimum value for settling tank: 1 tonne
Minimum value for service tank: 1 tonne
Minimum value for service system (incl. mixing tank): 1 tonne
Maximum calculated change over time: 200 hrs
Change over time given in increments of 0.15 hrs

Fuente: FOBAS Change-Over Calculator [51]

V. RESULTADOS

Para el desarrollo de los cálculos de tiempo de dilución de combustibles la empresa ha utilizado como herramienta la calculadora **Drew Marine**, en la que es necesario introducir el volumen total de combustible inicial (como se ha visto ya en el apartado “Cálculo del volumen de fuel en el sistema”) y el porcentaje de azufre en el combustible masa/masa. [52]

Procediendo a realizar el cálculo de tiempo de dilución del combustible para el buque Ro/Ro Galicia, introducimos la capacidad de fuel en el sistema que como vimos anteriormente, son 545 litros. Reflejamos también el consumo de combustible por los motores (en este caso vamos a realizar el cálculo con 2 motores) a un régimen de carga ideal de aproximadamente el 70% = 1,15 t/ht. Y añadimos, por último, el contenido en azufre de los combustibles que es 2,10 y 0,09% m/m, respectivamente, estos datos los vemos subrayados en la tabla adjunta en color naranja. La opción de deducir los costes la vamos a despreciar porque no resulta necesario ni relevante para el ejemplo, ni para el caso práctico del buque.

Con los datos determinados anteriormente introducidos, la calculadora genera una serie de resultados desarrollando una fórmula ya integrada en la herramienta, y posteriormente se obtiene el siguiente tiempo de cambio:

Tabla 19: Representativa del tiempo de dilución de combustible según Drew Marine

Change Over Time	Change Over Progress				
Time [min]	% HSFO	HSFO Qty	% MGO	MGO Qty	S [%m/m]
0,0	100,00	545,00	0,00	0,00	2,10
2,5	91,21	497,08	8,79	47,92	1,92
5,0	83,19	453,38	16,81	91,62	1,76
7,5	75,88	413,52	24,12	131,48	1,62
10,0	69,20	377,16	30,80	167,84	1,48
12,5	63,12	344,00	36,88	201,00	1,36
15,0	57,57	313,76	42,43	231,24	1,25
17,5	52,51	286,17	47,49	258,83	1,15
20,0	47,89	261,01	52,11	283,99	1,05

EMISIONES DE AZUFRE EN ZONAS SECAS – PROCEDIMIENTO DE CAMBIO PARA BUQUES RO/RO

22,5	43,68	238,06	56,32	306,94	0,97
25,0	39,84	217,13	60,16	327,87	0,89
27,5	36,34	198,04	63,66	346,96	0,82
30,0	33,14	180,63	66,86	364,37	0,76
32,5	30,23	164,75	69,77	380,25	0,70
35,0	27,57	150,27	72,43	394,73	0,64
37,5	25,15	137,06	74,85	407,94	0,60
40,0	22,94	125,01	77,06	419,99	0,55
42,5	20,92	114,02	79,08	430,98	0,51
45,0	19,08	104,00	80,92	441,00	0,47
47,5	17,41	94,86	82,59	450,14	0,44
50,0	15,88	86,52	84,12	458,48	0,41
52,5	14,48	78,91	85,52	466,09	0,38
55,0	13,21	71,97	86,79	473,03	0,36
57,5	12,04	65,64	87,96	479,36	0,33
60,0	10,99	59,87	89,01	485,13	0,31
62,5	10,02	54,61	89,98	490,39	0,29
65,0	9,14	49,81	90,86	495,19	0,27
67,5	8,34	45,43	91,66	499,57	0,26
70,0	7,60	41,44	92,40	503,56	0,24
72,5	6,94	37,80	93,06	507,20	0,23
75,0	6,33	34,48	93,67	510,52	0,22
77,5	5,77	31,45	94,23	513,55	0,21
80,0	5,26	28,68	94,74	516,32	0,20
82,5	4,80	26,16	95,20	518,84	0,19
85,0	4,38	23,86	95,62	521,14	0,18
87,5	3,99	21,76	96,01	523,24	0,17
90,0	3,64	19,85	96,36	525,15	0,16
92,5	3,32	18,10	96,68	526,90	0,16
95,0	3,03	16,51	96,97	528,49	0,15
97,5	2,76	15,06	97,24	529,94	0,15
100,0	2,52	13,74	97,48	531,26	0,14
102,5	2,30	12,53	97,70	532,47	0,14
105,0	2,10	11,43	97,90	533,57	0,13
107,5	1,91	10,43	98,09	534,57	0,13
110,0	1,74	9,51	98,26	535,49	0,12
112,5	1,59	8,67	98,41	536,33	0,12
115,0	1,45	7,91	98,55	537,09	0,12
117,5	1,32	7,21	98,68	537,79	0,12
120,0	1,21	6,58	98,79	538,42	0,11
122,5	1,10	6,00	98,90	539,00	0,11

V. RESULTADOS

125,0	1,00	5,47	99,00	539,53	0,11
127,5	0,92	4,99	99,08	540,01	0,11
130,0	0,83	4,55	99,17	540,45	0,11
132,5	0,76	4,15	99,24	540,85	0,11
135,0	0,70	3,79	99,30	541,21	0,10
137,5	0,63	3,46	99,37	541,54	0,10
140,0	0,58	3,16	99,42	541,84	0,10
142,5	0,53	2,88	99,47	542,12	0,10
145,0	0,48	2,63	99,52	542,37	0,10
147,5	0,44	2,40	99,56	542,60	0,10
150,0	0,40	2,19	99,60	542,81	0,10
152,5	0,37	2,00	99,63	543,00	0,10
155,0	0,33	1,82	99,67	543,18	0,10
157,5	0,30	1,66	99,70	543,34	0,10
160,0	0,28	1,51	99,72	543,49	0,10
162,5	0,25	1,38	99,75	543,62	0,10
165,0	0,23	1,26	99,77	543,74	0,09
Change Over Time [hrs]	2 hrs	45 min			

Fuente: Drew Marine LSFO Calculator [52] (Elaboración propia)

10. PROCEDIMIENTO DE CAMBIO DE COMBUSTIBLE

10.1. CONSIDERACIONES GENERALES

- Según los cálculos estimados en capítulos anteriores, la capacidad total del sistema de combustible desde las válvulas de aspiración de los tanques de diario 29 Br HSFO y 28 Br MGO es de unos 0,545 m³.
- El tiempo de dilución según el programa de dilución para esa capacidad, con dos motores, con un consumo aproximado de 1150 l/h y para el contenido de azufre de los combustibles normalmente suministrados (2,1% en HSFO y 0,09% en MGO) es de 2 horas y 45 min. Y con un motor el tiempo se eleva a 5 horas y 25 min.
- Según estudios técnicos, el gradiente adecuado de disminución de la temperatura del combustible para el cambio es de 2 °C/min, es por tanto que el tiempo desde una temperatura mínima del HSFO de 120 °C hasta unos 50 °C del MGO ha de ser de 35 min como mínimo. Es muy importante evitar el descenso rápido de las temperaturas para el cambio de combustible, para evitar el “*thermal shock*” en el equipo de inyección.
- Debe evitarse tener el HSFO a baja temperatura durante un largo período de tiempo debido a que una alta viscosidad del fuel resultaría perjudicial para el equipo de inyección.
- No es aconsejable bajar la carga de los motores para hacer el cambio ya que disminuiríamos el consumo y, debido a que durante la dilución entre combustibles estos pueden presentar incompatibilidades, puede producirse

precipitación de los asfaltenos del HSFO y bloquearnos los filtros, poniéndonos en serios apuros. El tiempo de dilución ha de ser el justo y necesario, ni rápido que pueda provocarnos un thermal shock, ni excesivamente lento para que dé tiempo a la precipitación de los asfaltenos.

- La temperatura del tanque 28 Br MGO con el vapor alimentando al tanque 29 Br HSFO se mantiene entre 40 - 50 °C.
- La viscosidad para M.G.O mínima recomendada por Wärtsilä es de 2 cst, por lo tanto se evitará en la medida de lo posible llegar a ella. El MGO suministrado tiene una viscosidad de 3,25 cst a 40 °C.

10.2. OPERACIONES PREVIAS

Antes de proceder al cambio de combustible, es aconsejable tener los niveles de los tanques de la siguiente manera:

1. Tanque de G.O de la caldera lleno al 95%.
2. Tanques de G.O de los MM.AA llenos al 85%.
3. Tanque almacén de G.O lleno al 90%.
4. Tanque de diario de G.O lleno a rebosar.

10.3. CÓMO PROCEDER AL CAMBIO PASO A PASO

1. Unas horas antes de iniciar el cambio ponemos el HSFO a una viscosidad lo más alta posible que este dentro de las recomendaciones del fabricante, para el FO

suministrado normalmente unos 122 °C y unos 23 o 24 cSt, para que el sistema este a la menor temperatura posible antes de realizar el cambio.

2. Al comienzo del cambio el enfriador de GO lo mantendremos cerrado, abriendo el by-pass y dejando circular el combustible sin intercambio de temperatura.
3. Vamos bajando la temperatura del FO según recomendaciones técnicas a un ritmo de 2°C/min como máximo, controlando el proceso con el regulador de temperatura para hacerlo de forma más precisa, hasta que llegemos a unos 100 °C, momento en el cual cerramos la válvula general de vapor al módulo de combustible, y a continuación esperamos a que la temperatura del combustible a los motores este en unos 90 °C. En el caso de que el controlador sea excesivamente lento en reaccionar y para no dilatar demasiado el proceso, cosa también perjudicial por el exceso de viscosidad del HSFO al bajar la T^a, se puede cerrar el vapor al módulo cuando consideremos conveniente y manejar de este modo el descenso térmico del HSFO.
4. Quitar corriente a la válvula reguladora de vapor al calentador del módulo, para evitar trabajar al final de carrera de dicha válvula, que tenderá a cerrar completamente.
5. Abrimos la válvula alimentadora del tanque diario de GO y tan pronto como se pueda se cierra la válvula del tanque de HSFO, comprobando que la presión del combustible en las bombas alimentadoras de combustible es la correcta.
6. Se asegura el cierre del tanque diario de HSFO cerrando la válvula incomunicadora dispuesta para tal efecto.
7. A partir de aquí se controla por un lado la viscosidad del combustible, al principio alta al bajar la temperatura con el cierre del suministro de vapor, pero luego al mezclarse con MGO esta tenderá a bajar. Por otro lado debemos de controlar la temperatura de la mezcla de combustible que deberá ir bajando al ir

alimentando el MGO a 40 °C aunque es muy probable que el combustible no baje de 70 °C. Controlamos el tiempo que tarda en llegar a esta temperatura para comprobar que no se haga más rápido de los 2°C/min ni tampoco excesivamente lento, aunque en este paso poco podemos hacer es preferible esperar a que baje la temperatura lentamente aun manteniéndose alta a refrigerar rápidamente el combustible y provocar un choque térmico.

8. Cuando la temperatura del combustible este en unos 70 °C (es probable que no baje más debido al calor del combustible retornado) y la viscosidad por la dilución del combustible ya esté en un valor por debajo de 8 Cst. ya prácticamente la mezcla del combustible sea mayoritariamente MGO Para evitar que peligrosamente baje la viscosidad en este punto procedemos a controlar la temperatura del combustible de retorno con el enfriador de GO, abrimos las válvulas del enfriador al paso del GO, se cierra el bypass del enfriador, se controla que el combustible de retorno se mantenga en principio en 60°C, y así garantizar una viscosidad en el módulo de combustible que evite que este llegue a 3 Cst. Pero antes de abrir la entrada al paso del GO abriremos las válvulas de entrada y salida de agua salada, abriendo más o menos la entrada de agua salada se puede regular la temperatura en función de la cantidad de agua salada que entra al enfriador, luego será cuando se vaya abriendo el paso de GO.
9. Controlar la temperatura del proceso para que el combustible queme a 50 °C, atendiendo siempre a la viscosidad adecuada, no recomendable quemar a menos de 40 °C.
10. Ponemos la depuradora de GO en funcionamiento alimentando al tanque de diario de GO.
11. Cambiamos el filtro automático al manual del módulo de combustible, para evitar con los disparos de autolimpieza que se llene el tanque de reboses de FO con MGO.

12. Abrimos ambos calentadores para eliminar restos de HSFO.
13. Abrimos ambos filtros dúplex para eliminar restos de HSFO.
14. En este buque, hay que valorar poner las bombas N°2 del módulo ya que levantan menos presión, y así poder evitar posibles pérdidas de combustible.
15. Pasado un tiempo se deja un filtro dúplex y un paso a través del calentador de vapor.

10.4. ACCIONES EN PUERTO CON GASOIL

1. La calefacción de los motores se deben de mantener a 50°C para evitar posibles problemas en el arranque.
2. Es necesario realizar un exhaustivo chequeo de los cierres mecánicos de las bombas del módulo de combustible, casquillos de colectores de combustible de los motores principales, bombas de inyección y demás tuberías de combustible, es probable que se debe realizar una sustitución de juntas donde se produzcan pérdidas de combustible muy considerables.

11. PRIMER CAMBIO

En este apartado procederemos a reflejar cómo transcurrió el primer cambio de combustible de FO a MGO para entrar en una zona SECA, siguiendo el procedimiento visto en este mismo capítulo y considerando todas las notas detalladas por el fabricante, así como las del departamento de inspección de la compañía, plasmaremos en este apartado el proceso completo que se llevó a cabo para realizar dicho cambio de combustible.

El Capitán comunica al departamento de máquinas a través del Jefe de Máquinas que aproximadamente en 5 horas y 30 minutos nos aproximaremos a las coordenadas $48^{\circ} 20,4'N$ y $005^{\circ} 54,8'W$, coordenadas que se corresponden (como vimos en capítulos anteriores) con la entrada a la zona SECA entrando por el Canal de La Mancha con destino a Zeebrugge, donde nos disponemos a descargar 110 vehículos y 17 vehículos de maquinaria pesada, para cargar 320 coches hasta Inglaterra.

Recibido el comunicado, lo primero que el Jefe ordena es comprobar los niveles de GO que tienen la caldera y los generadores auxiliares para proceder a llenar hasta rebosar el tanque de diario de GO, tarea que se me ha encomendado a mí. Mientras tanto, tanto los oficiales como el jefe de máquinas repasan el procedimiento y se distribuyen los puntos a realizar.

Teniendo en cuenta que el cambio de combustible con dos motores se realiza en torno a 2 horas y 45 minutos, se ha alertado con varias horas de antelación para preparar, entre otras cosas, el nivel del tanque de servicio diario de gasoil y la viscosidad del FO, que ronda sobre los 24 cSt a una temperatura de $125^{\circ}C$. Siguiendo las indicaciones del procedimiento procedemos a bajar la temperatura del fuel, en este caso el Jefe ordena al segundo oficial que baje la temperatura manualmente con la válvula reguladora provista para ello. Considerando que desciende a $2^{\circ}C/min$, se consigue tener la temperatura a $95^{\circ}C$ tras unos 15 minutos, momento en el cual el segundo oficial cierra la válvula general de vapor y purga el vapor que pueda quedar en la línea con la manguera de vapor con la que habitualmente limpiamos los filtros.

Es necesario quitar un cable de corriente a la válvula de vapor para que ésta no esté dando señal de cerrar trabajando al final de carrera, labor que hace el primer oficial. Acto seguido, el primero oficial procede a abrir la válvula del tanque del servicio diario de GO 28Br y a cerrar la válvula del tanque de FO.

Pasan aproximadamente 13 minutos hasta que la temperatura la tenemos en 70°C por estar alimentando con GO y, a partir de este momento, se comienza a refrigerar el GO de retorno. Para ello abrimos en banda la descarga del nuevo enfriador de GO y poco a poco se abre la entrada al mismo.

Al hacerlo nos encontramos con algo de aire en el enfriador, por lo que purgamos el tanque de mezcla con una válvula manual dispuesta en la parte superior para tal fin, que es el único lugar donde podemos extraer el aire proveniente del enfriador.

Mirando el ordenador del control, vemos que tarda aproximadamente 17 minutos en llegar la temperatura hasta los 50°C. A partir de aquí se queda el Jefe de Máquinas (y el segundo en su ausencia) controlando dicha temperatura para que, en el caso de que haya que regularla porque se acerque peligrosamente a 40°C, se regule la temperatura con la entrada al enfriador. El Jefe recalca varias veces que en el caso de que no sea suficiente regular con la entrada y hubiese que abrir el enfriador en banda, se cierre el by-pass para obligar a todo el GO a pasar por el enfriador, aunque en esta ocasión no ha sido necesario por la baja temperatura de agua de mar que teníamos.

Para eliminar todos los restos de fuel que puedan haber, el primer oficial abre los dos filtros dúplex y los calentadores, aunque posteriormente se regulan y se vuelve a dejar un filtro.

A continuación el segundo oficial y yo procedemos a limpiar todos los filtros del módulo de combustible para eliminar la mezcla HSFO-GO que pueda dejar grandes partículas en ellos y obstruirlos posteriormente. No obstante es conveniente hacerlo aunque las bombas marquen buena presión porque más tarde sí que sería necesario limpiarlos.

Ilustración 55: Filtros bombas feeder y booster para limpiar



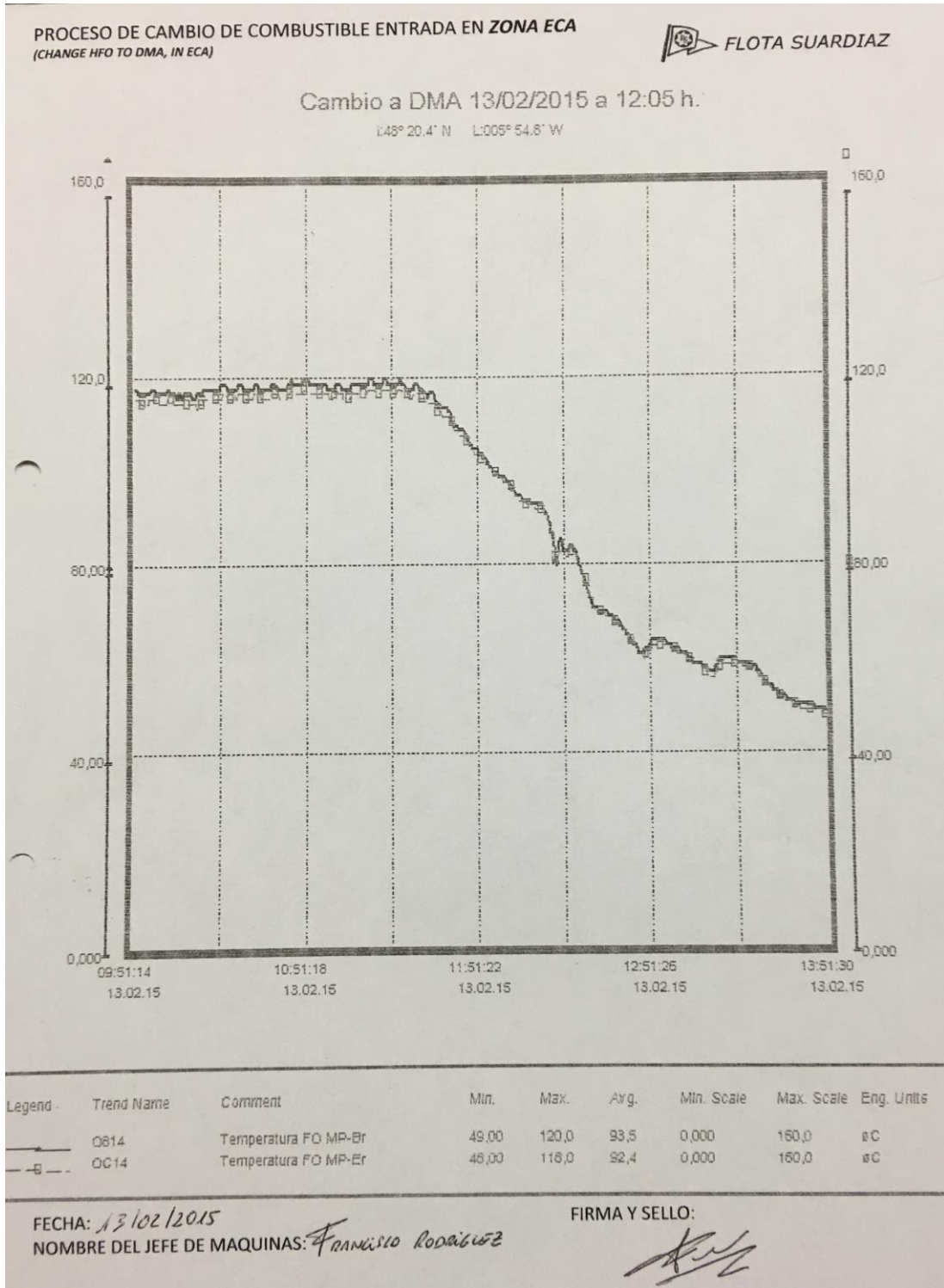
Fuente: Trabajo de campo

Una vez que las temperaturas y las presiones de combustible están estabilizadas, el Jefe imprime una gráfica donde se relaciona la temperatura del combustible con el tiempo real, de cara a guardar dicho impreso y presentarlo ante posibles inspecciones/autoridades del Port State Control y también como justificación del cambio para el propio departamento de inspección de la empresa.

Con la gráfica adjunta en la ilustración n° 55, se demuestra que es imposible haber estado consumiendo un fuel con alto contenido de azufre a 45°C y 5 Bar de presión en el momento de entrada de la zona SECA.

En la gráfica se aprecia cómo en el transcurso de aproximadamente 2 horas y 45 minutos la temperatura desciende hasta los 45-50°C requeridos por el combustible.

Ilustración 56: Gráfica T(°C)/t en el momento de entrada a la zona SECA



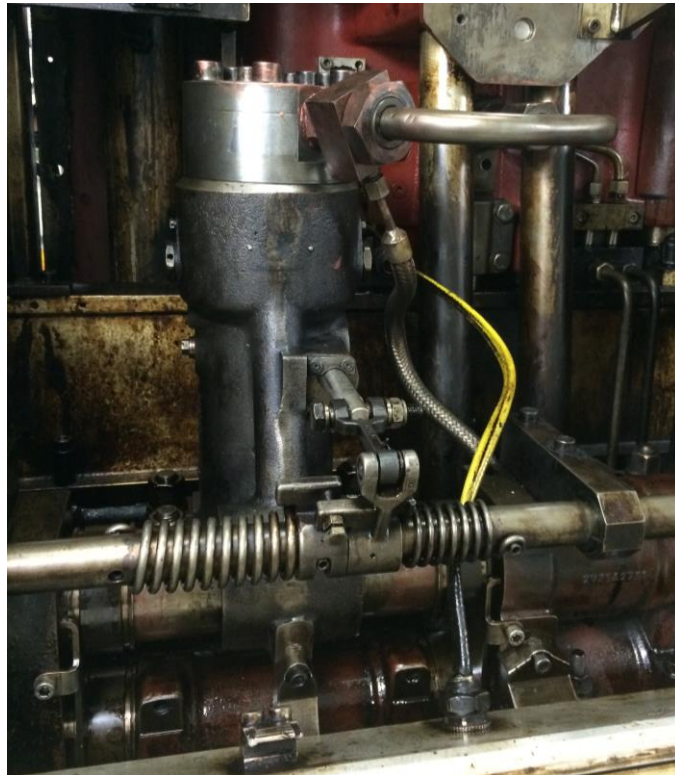
Fuente: Trabajo de campo

V. RESULTADOS

Como esperábamos, se descubrieron varias fugas de combustible sobretodo en el conjunto de las bombas de inyección. Al ser un combustible con mucha menos viscosidad, éste puede fugarse por pequeños espacios por donde el fuel no podía.

Por ello se precisó de la ayuda del caldereta y el engrasador para limpiar en la medida de lo posible todo el local hasta que la presión se estabilizara un poco.

Ilustración 57: Conjunto bomba de inyección



Fuente: Trabajo de campo

Junto a las gráficas de temperatura y tiempo de cambio a MGO, el Jefe tiene que tener preparadas para presentar las gráficas que genera la herramienta Drew Marine Calculator, las cuales vemos en la imagen adjunta a continuación; [52]

Ilustración 58: Plantilla Drew Marine Calculator

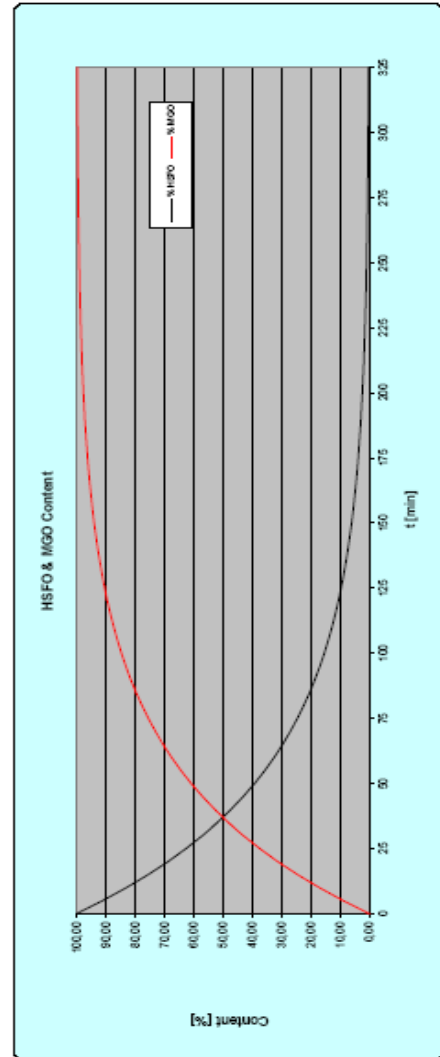
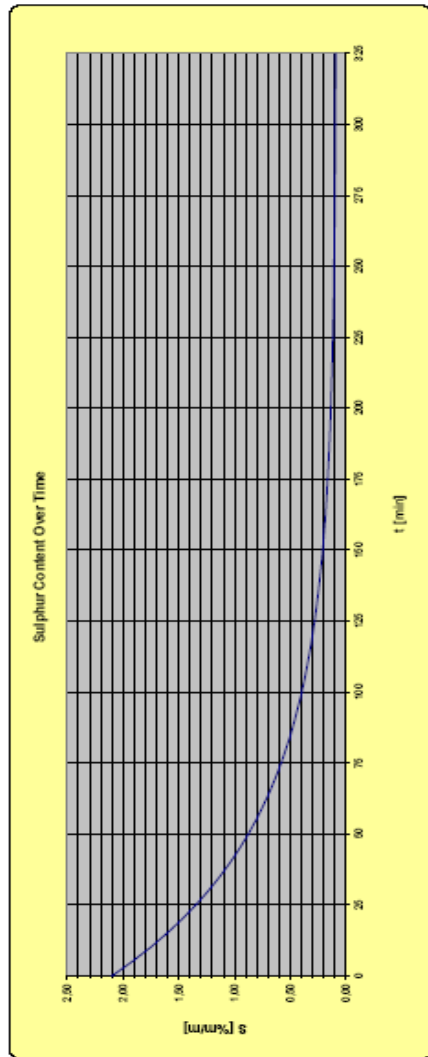
MGO Calculator

Vessel	Galicia	
FO Consumption [m ³ /hr]	0.585	
FO System Capacity [litres]	545	

Fuel Oil Supplier	Argentan	Argentan
Burner Date	10-Dec-2014	10-Dec-2014
Burner Port	Zeebrugge	Zeebrugge
Fuel Oil - MGO Quality	HSFO	MGO
Density @15°C [kg/m ³]	0.9884	0.8900
Viscosity [mm ² /s]	377.0	3.75
Viscosity Temp [°C]	50.0	40.0
Sulphur [Nm/m]	2.10	0.09

HSFO - MGO Fuel Switching Log (5 year retention)			
Entry Details		Departure Details	
Date	Time	Date	Time
Position	Longitude Latitude	Position	Longitude Latitude
CIE Comments			

Change Over Time Time [min]	Change Over Progress			
	% HSFO	HSFO Qty	% MGO	MGO Qty
0	100.00	545.00	0.00	0.00
5	97.00	460.25	3.04	48.75
10	82.00	451.88	17.00	82.14
15	74.49	411.44	34.00	133.00
20	68.14	374.64	51.36	170.36
25	62.99	341.13	67.87	205.26
30	58.99	310.62	83.38	238.38
35	55.10	282.84	97.90	269.90
40	51.36	257.84	111.16	299.84
45	47.84	234.56	123.44	328.56
50	44.54	212.82	134.18	355.18
55	41.44	192.54	143.46	379.54
60	38.54	173.72	151.28	401.28
65	35.84	156.28	157.72	420.28
70	33.34	140.14	162.86	436.14
75	31.04	125.22	166.78	449.22
80	28.94	111.54	169.46	460.54
85	27.04	99.00	170.90	470.10
90	25.34	87.62	171.10	477.88
95	23.84	77.40	170.16	483.84
100	22.54	68.34	168.00	488.14
105	21.44	60.42	164.62	490.78
110	20.54	53.64	160.00	491.74
115	19.84	47.98	154.18	490.98
120	19.34	43.44	147.16	488.44
125	18.94	39.00	139.90	484.10
130	18.64	35.66	132.42	478.14
135	18.44	32.40	124.74	470.54
140	18.34	29.20	116.86	461.34
145	18.34	26.06	108.78	450.64
150	18.44	23.00	100.50	438.50
155	18.64	20.00	92.00	424.94
160	18.94	17.06	83.26	409.98
165	19.34	14.18	74.28	393.64
170	19.84	11.36	65.06	375.98
175	20.44	8.60	55.60	356.98
180	21.14	5.90	45.90	336.64
185	21.94	3.26	35.94	314.94
190	22.84	0.68	25.68	291.84
195	23.84	-1.94	15.14	267.34
200	24.94	-4.54	4.34	241.44
205	26.14	-7.16	-6.44	214.14
210	27.44	-9.80	-16.80	185.44
215	28.84	-12.46	-26.74	155.26
220	30.34	-15.14	-36.14	123.64
225	31.94	-17.84	-44.94	90.54
230	33.64	-20.54	-53.14	56.04
235	35.44	-23.24	-60.74	20.14
240	37.34	-25.94	-67.74	-17.14
245	39.34	-28.64	-74.04	-37.64
250	41.44	-31.34	-79.64	-60.54
255	43.64	-34.04	-84.54	-85.84
260	45.94	-36.74	-88.74	-113.54
265	48.34	-39.44	-92.24	-143.74
270	50.84	-42.14	-95.04	-175.44
275	53.44	-44.84	-97.14	-208.64
280	56.14	-47.54	-98.54	-243.34
285	58.94	-50.24	-99.24	-279.54
290	61.84	-52.94	-99.24	-317.24
295	64.84	-55.64	-98.54	-356.44
300	67.94	-58.34	-96.14	-397.14
305	71.14	-61.04	-92.04	-439.34
310	74.44	-63.74	-86.24	-483.04
315	77.84	-66.44	-78.74	-528.24
320	81.34	-69.14	-69.54	-574.94
325	84.94	-71.84	-58.74	-623.14
330	88.64	-74.54	-46.24	-672.84
335	92.44	-77.24	-32.04	-724.04
340	96.24	-79.94	-16.24	-776.74
345	100.00	-82.64	0.00	-830.94



Fuente: Trabajo de campo [52]

En ella se representa lo siguiente;

Tabla 20: Último consumo y cualidades del combustible

Vessel	Galicia
FO Consumption [m ³ /hr]	1,15
FO System Capacity [liters]	545

Fuel Oil Supplier	Aegean	Aegean
Bunker Date	25-Dec-2014	25-Dec-2014
Bunker Port	Zeebrugge	Zeebrugge
Fuel Oil - MGO Quality	HSFO	MGO
Density @15°C [g/mL]	0,9884	0,8900
Viscosity [mm ² /s]	377,0	3,25
Viscosity Temp [°C]	50,0	40,0
Sulphur [%m/m]	2,10	0,09

Fuente: Drew Marine Calculator [52] (Trabajo de campo)

En la tabla n° 20, es necesario introducir dónde y cuándo se realizó el último consumo de combustible, la compañía que lo suministró, los datos de consumo y capacidad de combustible del buque, densidad, viscosidades y contenido en azufre de ambos combustibles a modo comparativo. En el caso de que se haya hecho consumo en dos puertos y por dos compañías diferentes para cada tipo de combustible, resulta indiferente para la herramienta y puede introducirse de igual manera.

Tabla 21: Datos de entrada a una zona de control

HSFO - MGO Fuel Switching Log (3-year retention)							
Entry Details				Departure Details			
Date	25/01/2015			Date	29/01/2015		
Time	6h	59min	a.m	Time	10h	26min	a.m
Position	Longitude	48° 14,0' N		Position	Longitude	49° 13,2' N	
	Latitude	005° 59,9' W			Latitude	005° 00,5' W	
C/E Comments							
Total M.G.O (Entrada en zona ECA): 116200 l.							
Suministro en Zeebrugge M.G.O: 56500 l.							
Total M.G.O (Salida en zona ECA): 88600 l.							

Fuente: Drew Marine Calculator [52] (Trabajo de campo)

En la tabla anterior es donde se muestran los datos que justifican la hora de entrada y salida de una zona SECA, con una latitud y longitud exactas para determinar que en ese punto comenzó el cambio de un combustible a otro.

En los comentarios adicionales de la parte inferior se suelen poner las cantidades de gasoil con las que se entra a una zona de control de emisiones y con las que se sale, dado que habitualmente se hace consumo de combustible dentro de la misma zona de control, en este caso Zeebrugge, Bélgica.

La tabla adicional que determina el tiempo de cambio es en sí misma la herramienta de la calculadora, la cual explicamos en el apartado “Calculadoras de tiempo de cambio”. Para la anterior explicación de la misma hemos utilizado exactamente la misma tabla nº 19, en la que marca un tiempo estimado de cambio de 2 horas y 45 minutos.

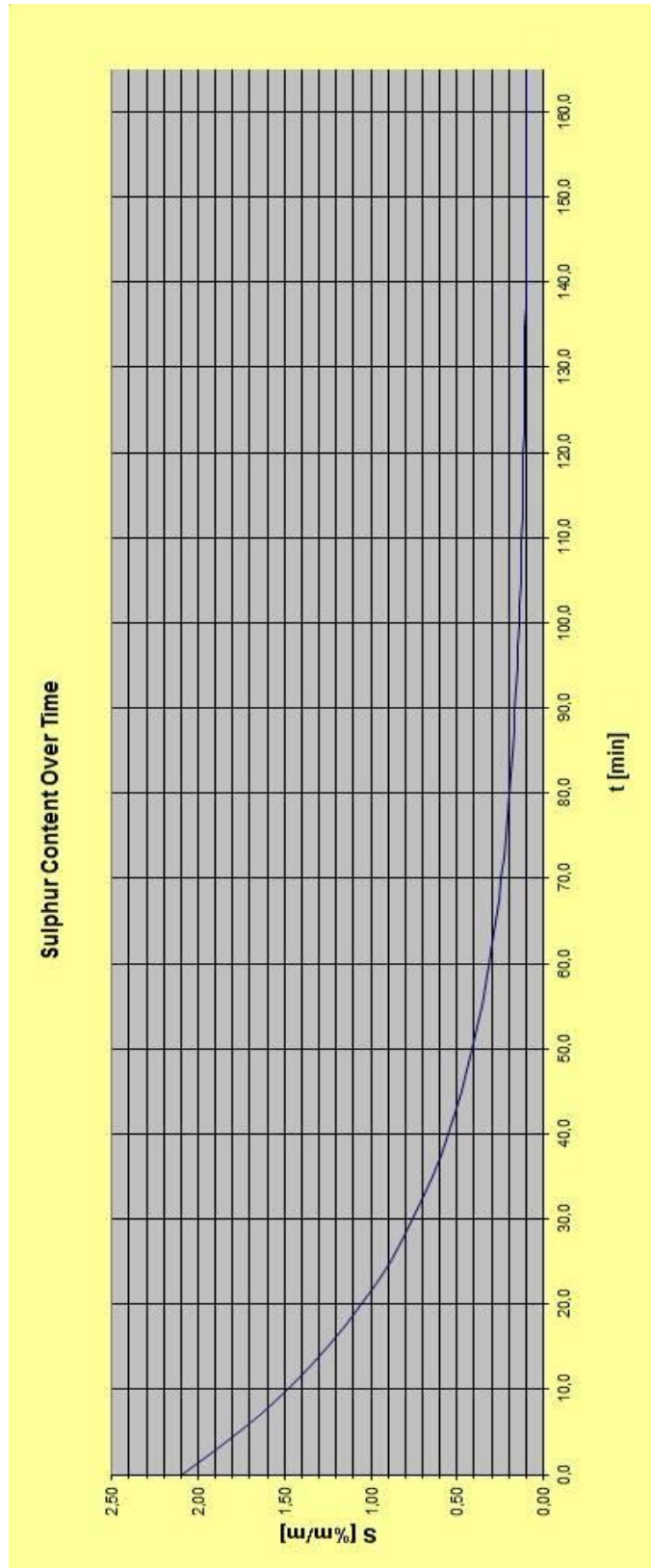
Y por último en las gráficas distinguimos por un lado, la relación del contenido de azufre en el combustible con respecto al tiempo, y por otro, el contenido en porcentaje de ambos combustibles con respecto al tiempo, es decir, la mezcla de combustible que tenemos en cada momento de cambio.

En el gráfico nº 9, podemos ver como al comienzo del cambio aún tenemos el contenido máximo de azufre en el combustible que corresponde con el contenido de azufre del fuel. A medida que el tiempo de cambio va avanzando, el contenido de azufre disminuye en función de la mayor cantidad de MGO que tenga la mezcla.

En el caso de la gráfica nº 10 sucede lo mismo en esencia. Al comienzo contamos con el 100% de HSFO con el que navegábamos, y a partir del inicio del cambio, el contenido de HSFO disminuye a la vez que el de MGO aumenta, y así hasta que el contenido de MGO es del 100%, momento en el que se da por finalizado el cambio de combustible (2 horas y 45 minutos más tarde, con dos motores).

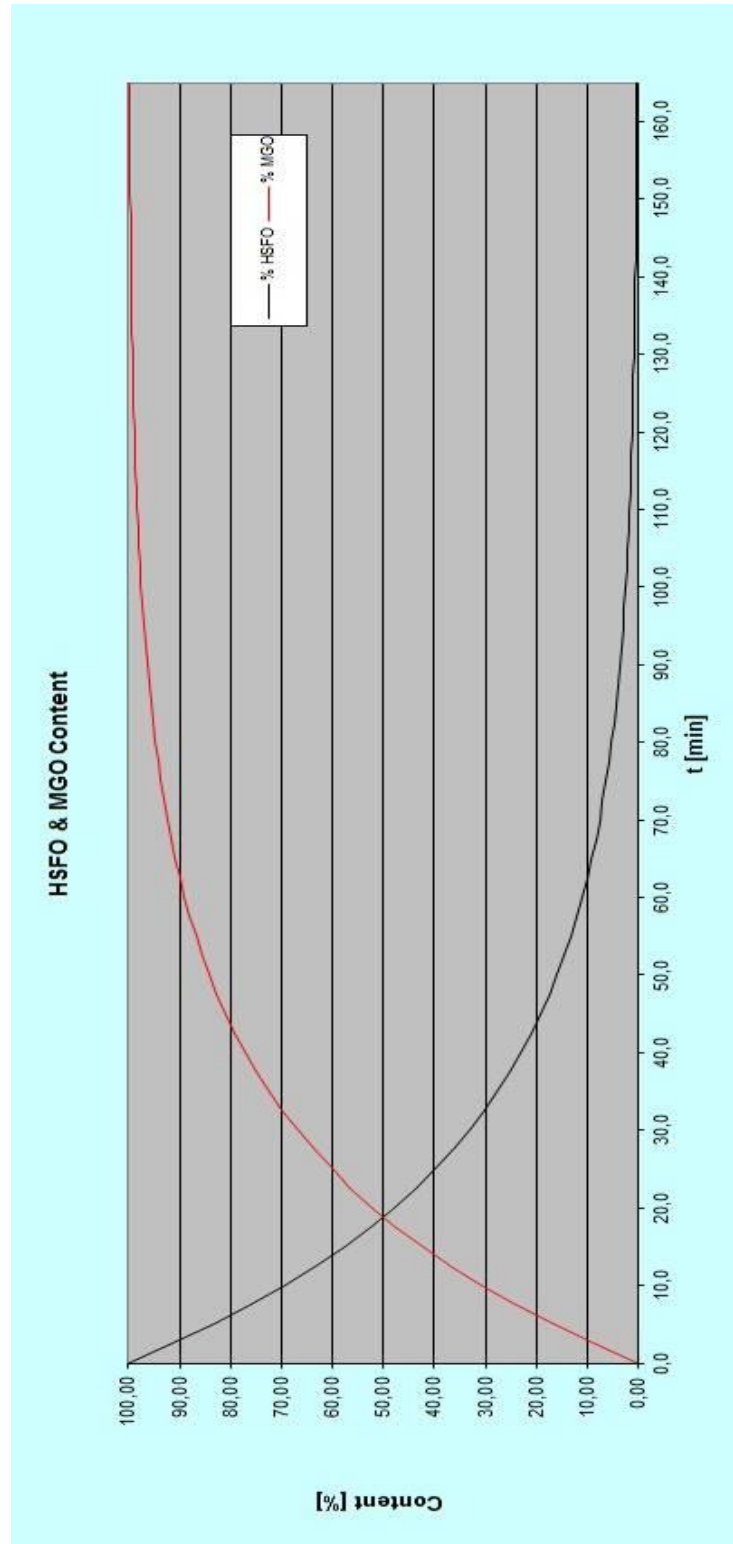
V. RESULTADOS

Gráfico 9: Contenido de azufre con respecto al tiempo



Fuente: Drew Marine Calculator [52] (Trabajo de campo)

Gráfico 10: Dilución de combustible con respecto al tiempo



Fuente: Drew Marine Calculator [52] (Trabajo de campo)

VI. CONCLUSIONES

Una vez hemos expuesto los resultados, vamos a enumerar las conclusiones obtenidas:

1. Habiendo realizado un estudio previo del impacto que tiene el transporte marítimo en la contaminación atmosférica a escala mundial, entre otros medios de transporte, hemos comprobado la gran importancia que tiene reducir las emisiones de azufre y otros agentes contaminantes en los combustibles marinos.
2. Del mismo modo, hemos comprobado la necesidad de que las organizaciones marítimas continúen con el desarrollo de nuevos acuerdos, códigos y propuestas para mejorar las disposiciones de los presentes Anexos sobre las emisiones de agentes contaminantes y reducir el impacto medioambiental, así como con el desarrollo de nuevas enmiendas sobre los límites de emisiones.
3. En tercer lugar hemos comprobado que, siguiendo los requerimientos del Anexo VI del Convenio Marpol, se cumplen perfectamente los límites de azufre establecidos en el Código Técnico en cuanto a las emisiones de combustibles como el gasoil, dejando de consumir, para este caso, un combustible con alto contenido de azufre como el fuel IFO 380.
4. Hemos comprobado que el procedimiento teórico para el cambio de combustible en motores diésel establecido por dicho Código se puede llevar a cabo en un buque común tipo RO/RO con motores diésel sin mayores problemas. Analizando el buque modelo, en el que hemos basado el estudio de un procedimiento práctico de cambio de combustible, vemos que se puede seguir el procedimiento establecido punto por punto siempre y cuando se haya adaptado previamente el circuito de combustible para el caso.

5. Teniendo en cuenta la necesidad de adecuar el sistema de combustible a los motores principales, hemos comprobado en el período de prácticas realizado “in situ” en el buque modelo, que se ha procedido correctamente para obtener un sistema de purificación y trasiego de combustible válido para el perfecto funcionamiento de la máquina con otro combustible.

6. Basándonos en los resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo, la importancia de mejoras en cuanto a reglas para prevenir la contaminación atmosférica, nos lleva a concluir estar de acuerdo con proceder a las revisiones previstas para 2018 según los balances provistos en el Anexo. Pero a su vez, proponemos más periodicidad para las revisiones de los procedimientos que comprenden el uso de combustibles con bajo contenido en azufre, filtros de partículas, desulfuración, etc.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANAVE, *Asociación de Navieros Españoles*, 2015:
<http://anave.es/informes-y-publicaciones/global>
- [2] *Direct Industry, Motores Diesel*, 2015:
<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/motor-termico-diesel-211773.html?originalFilter>
- [3] *Wikipedia, Motores marinos*, 2015:
https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_di%C3%A9sel_marino
- [4] *Ministerio de Agricultura, Alimentación y medio ambiente*, 2015:
http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precursores_ozono.aspx
- [5] *Ismael Prieto, Trabajo profesional “Reducción de emisiones contaminantes en instalaciones de combustión”*, 2015
- [6] *Revista National Geographic, Contaminación marina*, 2015
<http://www.nationalgeographic.es/el-oceano/cuestiones-criticas-sobre-el-problemas-de-la-contaminacion-marina/cuestiones-criticas-sobre-el-problemas-de-la-contaminacion-marina>
- [7] *Wikipedia, Lluvia ácida, efectos de la contaminación*, 2015:
https://es.wikipedia.org/wiki/Lluvia_%C3%A1cida
- [8] *Revista La Noticia, Cambio climático*, 2015:
<http://lanoticia.hn/cambio-climatico>
- [9] *Wikipedia, Equilibrio térmico de la tierra*, 2015:
https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_t%C3%A9rmico_de_la_Tierra
- [10] *Inside the nature, “albedo y radiación solar”*, 2015:
<https://insidethenature.wordpress.com//que-es-el-efecto-albedo-3/>
- [11] *Wikipedia, Efecto invernadero*, 2015:
https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero
- [12] ANAVE, *Concentraciones de CO₂ y aumento de la temperatura terrestre*, 2015:
<http://anave.es/co2-temperatur@-terrestre/or>
- [13] *Wikipedia, Agentes contaminantes*, 2015:
[https://es.wikipedia.org/wiki/Contaminaci%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica#Gases_c
ontaminantes_de_la_atm.C3.B3sfera](https://es.wikipedia.org/wiki/Contaminaci%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica#Gases_contaminantes_de_la_atm.C3.B3sfera)
- [14] *Wikipedia, Óxidos de Nitrógeno*, 2015:
https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xidos_de_nitr%C3%B3geno

[15] *Wikipedia, Dióxido de Carbono*, 2015:

https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_carbono

[16] *Wikipedia, Monóxido de Carbono*, 2015:

https://es.wikipedia.org/wiki/Mon%C3%B3xido_de_carbono

[17] *Tecnun, Sustancias que contaminan la atmosfera-Dióxidos de Azufre*, 2015:

<http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/10CAtm1/200Conta.htm#OxidosS>

[18] *Clare Chan “Óxidos de Azufre SOx”*, 2015:

<https://prezi.com/dozeyohkztsn/oxidos-de-azufre-sox/>

[19] *Wikipedia, Emisión de óxidos de azufre en el mundo marítimo*, 2015:

https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_azufre

[20] *OMI, Organización Marítima Internacional. Antecedentes históricos Convenio MARPOL*, 2015:

<http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Historic%20Background%20GHG.aspx>

[21] *OMI, Organización Marítima Internacional. Convenio MARPOL, Protocolo de 1997*, 2015:

<http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/1997>

[22] *OMI, Organización Marítima Internacional. Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)*, 2015:

[http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

[23] *OMI, Organización Marítima Internacional. Óxidos de Nitrógeno*, 2015:

[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx)

[24] *Rober García, vía Ingeniero Marino “NORMATIVA, TECNOLOGÍAS Y MODIFICACIONES PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE SOX Y NOX A LA ATMÓSFERA*, 2015:

<https://ingenieromarino.wordpress.com/2014/09/17/26o-normativatecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>

- [25] *Alejandro Martínez Gallego, Proyecto de licenciatura “Emisiones Contaminantes en Motores Marinos” Capítulo III*, 2015.
- [26] *RETE, Referencias Tier I, II y III*, 2015:
<http://retedigital.com/?s=Tier+I+II+III/or>
- [27] *Shipowners, Emission Control Areas*, 2015:
<http://www.shipownersclub.com/louise-hall-sulphur-requirements-imo-emission-control-areas/>
- [28] *Wikipedia, Zonas ECA*, 2015:
https://en.wikipedia.org/wiki/Sulphur_Emission_Control_Area
- [29] *OMI, Organización Marítima Internacional. Contenido de azufre en combustibles*, 2015:
<http://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/01-MARPOL-EEDI.aspx>
- [30] *Maritime Cyprus. IMO: New ECA Sulphur Limits*, 2015:
<https://maritimecyprus.com/2015/01/03/imo-new-eca-sulfur-limits-faq/>
- [31] *OMI, Organización Marítima Internacional. Referencias al Anexo VI*, 2015:
[http://www.imo.org/es/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/es/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- [32] *Veintepies, “Propuestas Micro-SECA”*, 2015:
http://www.veintepies.com/secciones/bimco_micro_seca/
- [33] *Revista Marinelink*, 2015:
<http://www.marinelink.com/>
- [34] *ANAVE, Asociación de Navieros Españoles, ECSA e ICS publican unas pautas para el cumplimiento de la nueva normativa en las ECAs*, 2015:
<http://www.anave.es/ultimas-noticias/968-ecsa-e-ics-publican-unas-pautas-para-el-cumplimiento-de-la-nueva-normativa-en-las-ecas>
- [35] *Menorcainfo.net, Contaminación en puertos*, 2015:
<http://www.menorcainfo.net/>
- [36] *IME, Instituto Marítimo Español, Métodos para reducir las emisiones de SOx*, 2015:
<http://www.ime.es/blog/2015/01/28/la-restriccion-al-01-de-azufre-en-combustibles-marinos-una-realidad-en-las-ecas/>

- [37] *Blog Tecnología Marítima, Control de emisiones y métodos de reducción*, 2015:
<http://tecnologia-maritima.blogspot.com.es/2013/03/contro-de-emisiones-en-motores-marinos.html>
- [38] *Convenio Marpol, Anexo VI “Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”*. 2015
- [39] *DNV-GL, Managing sulphur limits*, 2015:
<https://www.dnvgl.com/maritime/low-sulphur-operation.html>
- [40] *Grupo Suardiaz*, 2015:
<http://www.suardiaz.com/>
- [41] *Hijos de J. Barreras*, 2015:
<http://www.hjbarreras.es> [12]
- [42] *Manual técnico CATERPILLAR serie 3508B, Capítulo II*, 2015.
- [43] *Manual técnico WÄRTSILÄ 32, Capítulo 00*, 2015.
- [44] *Manual técnico REINTJES LGF HR, Capítulo I*, 2015.
- [45] *Manual técnico KAMEWAS, Capítulo II*, 2015.
- [46] *Manual de Gestión de la Seguridad, Flota Suardiaz, S.A., “Documentación a entregar a cada tripulante”*, 2015.
- [47] *Convenio MARPOL, Anexo VI Revisado “Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por los buques”*, 2015.
- [48] *Manual Operacional WÄRTSILÄ 32, Capítulo 03*, 2015.
- [49] *WÄRTSILÄ, Marine Diesel Fuel Cooler Unit*, 2015:
<http://www.wartsila.com/services/services-parts/services-catalogue/engine-services-4-stroke/automatic-fuel-switch-marine-diesel-fuel-cooler-unit>
- [50] *DNVGL Calculator*, 2016:
<https://www.dnvgl.com/maritime/advisory/Fuel-change-over-calculator.html>
- [51] *Lloyd’s Register, FOBAS Change-Over Calculator*, 2016:
<https://www.fobas.com/bulletin/46>
- [52] *Drew Marine, Drew Marine Change Over Calculator*, 2016:
http://www.drew-marine.com/fm_lowsulfur_solutions.html

VII. BIBLIOGRAFÍAS