

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

**ESCUELA DE INGENIERÍAS MARINA, NAÚTICA Y
RADIOELECTRÓNICA – EIMANAR**

**DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y
MOTORES TÉRMICOS**



TESIS DOCTORAL

**“EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRANSPORTE
MARÍTIMO. INFLUENCIA DEL ESTADO FUNCIONAL
DE LOS MOTORES TÉRMICOS”**

**YOLANDA AMADO SÁNCHEZ
Cádiz, enero 2021**

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

**ESCUELA DE INGENIERÍAS MARINA, NAÚTICA Y
RADIOELECTRÓNICA – EIMANAR**

**DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y
MOTORES TÉRMICOS**



TESIS DOCTORAL

**“EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRANSPORTE
MARÍTIMO. INFLUENCIA DEL ESTADO FUNCIONAL
DE LOS MOTORES TÉRMICOS”**

**YOLANDA AMADO SÁNCHEZ
Cádiz, enero 2021**



ESTA TESIS DOCTORAL HA SIDO REALIZADA DENTRO
DEL DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES
TÉRMICOS, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍAS
MARINA, NÁUTICA Y RADIOELECTRÓNICA
DE LA UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

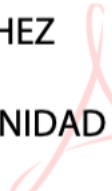
LA DIRECCIÓN DE LA MISMA HA SIDO REALIZADA
POR LA DOCTORA CRISTINA VANESA DURÁN GRADOS
Y EL DOCTOR JUAN MORENO GUTIÉRREZ,
DENTRO DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
“CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS MARINAS”.



Esta tesis doctoral se ha realizado al amparo del Campus de Excelencia Internacional del Mar, **CEI·MAR**.

Memoria presentada para optar al título
de Doctora por la Universidad de Cádiz

AMADO SANCHEZ
YOLANDA
SANTISIMA TRINIDAD -
- 75866902E



Firmado digitalmente por
AMADO SANCHEZ YOLANDA
SANTISIMA TRINIDAD -
75866902E
Fecha: 2021.01.27 00:33:38
+01'00'

Yolanda Amado Sánchez


La Doctora Doña Cristina Vanessa Durán Grados,
Profesora del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos
de la Universidad de Cádiz como su directora

HACE CONSTAR:

Que esta memoria, titulada EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. INFLUENCIA DEL ESTADO FUNCIONAL DE LOS MOTORES TÉRMICOS, presentada por Doña Yolanda Amado Sánchez contempla su trabajo de Tesis Doctoral y, considerando que reúne todos los requisitos legales, autoriza su presentación y defensa para optar al grado de Doctora por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real, 25 de enero de 2021

Fdo.: Cristina Vanesa Durán Grados

Código Seguro de verificación: z85DHNbsQGqJ400V222PbQ==. Permite la verificación de la integridad de una copia de este documento electrónico en la dirección: https://verificarfirma.uca.es Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
FIRMADO POR	CRISTINA VANESA DURAN GRADOS	FECHA	25/01/2021
ID. FIRMA	angus.uca.es	z85DHNbsQGqJ400V222PbQ==	PÁGINA 1/1
 z85DHNbsQGqJ400V222PbQ==			

El Doctor Don Juan Moreno Gutiérrez, Profesor
del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la
Universidad de Cádiz como su director

HACE CONSTAR:

Que esta memoria, titulada EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. INFLUENCIA DEL ESTADO FUNCIONAL DE LOS MOTORES TÉRMICOS, presentada por Doña Yolanda Amado Sánchez contempla su trabajo de Tesis Doctoral y, considerando que reúne todos los requisitos legales, autoriza su presentación y defensa para optar al grado de Doctora por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real, 25 de enero de 2021

Firmado por MORENO GUTIERREZ JUAN - 31185703A el
día 25/01/2021 con un certificado emitido por AC
FNMT Usuarios

Fdo.: Juan Moreno Gutiérrez

El Profesor Dr. D. Francisco Sánchez de la Flor,
Director del Departamento de Máquinas y
Motores Térmicos de la Universidad de Cádiz

HACE CONSTAR:

Que esta memoria, titulada EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. INFLUENCIA DEL ESTADO FUNCIONAL DE LOS MOTORES TÉRMICOS, presentada por Doña Yolanda Amado Sánchez bajo la dirección del Dr. Juan Moreno Gutiérrez y Dra. Cristina Vanesa Durán Grados, reúne todos los requisitos legales para optar al grado de Doctora por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real, 25 de enero de 2021

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned below the date.

Fdo.: Francisco Sánchez de la Flor

A mis hijos, David y Lucas, culpables de que mi vida profesional cambiara de rumbo,
os devolveré todas las horas que os he sustituido por el ordenador.
Gracias por darme la oportunidad de terminar mi Tesis,
nuestra Tesis.

A mi Jefe de Máquinas preferido, a mi marido,
mi gran apoyo desde el comienzo
de esta nueva singladura.
David, gracias por
creer siempre
en mi.

A mis padres y mi hermana, gracias gracias y gracias por
darme la oportunidad de conseguir mis metas y, sobre todo,
por estar tan orgullosos de mi.

Os quiero.

Siempre, a toda máquina.

Agradecimientos

A mis Directores de Tesis, la Dra. Cristina Vanesa Durán Grados por la ayuda ofrecida y tiempo robado, correcciones compartidas en horas de disfrute familiar es muy difícil de agradecer, mil gracias por tu gran dedicación. Al Dr. Juan Moreno Gutiérrez, por tu siempre ayuda e impulsarme en los malos momentos, gracias por compartir tus grandes valores. A ambos muchas gracias por la acogida, aguante y entrega desde que decidí comenzar esta nueva etapa de mi vida, desde el minuto uno habéis estado ahí para ayudarme. Como siempre os digo, “espero poder ir devolviendo tanta ayuda ofrecida”.

A mi Director de Departamento, el Dr. Francisco Sánchez de la Flor porque en momentos de vital importancia tuve “un si, por supuesto cuenta con ello”.

A mi Grupo de Investigación, a todos mis compañeros porque de alguna u otra manera me habéis impulsado. Nos queda mucho “por navegar”, pero siempre juntos. Gracias compi por tantas horas de escucha.

A mis amigos y compañeros, a los que me habéis estado preguntando todos estos años por cómo iba y dándome ánimos y “empujones” ante temporales.

Un especial agradecimiento a una gran persona y mejor profesional al que tuve la suerte de encontrarme en mi carrera de a bordo, y que ha aportado su gran granito de arena, gracias, Antonio Lacida.

Dar las gracias y además agradecer su ayuda y admirable disponibilidad a un gran profesional, Thierry Blommaerts, nunca un no por respuesta.

Una especial mención a una pareja gallega de Jefes, que me mostraron “el camino”.

Agradecer su tiempo y predisposición a todos los Jefes de Máquinas y Oficiales que me he encontrado estos años durante las visitas a los buques para la realización de esta Tesis.

A toda esa gente especial, gracias.

RESUMEN

En este estudio de investigación titulado “*Eficiencia energética en el transporte marítimo. Influencia del estado funcional de los motores térmicos*”, se va a estudiar y comprobar que verdaderamente, las horas de funcionamiento de diferentes equipos del motor, cómo pueden ser las toberas de los inyectores, turbosoplantes y demás parámetros del sistema de inyección, influyen directamente en la emisión de contaminantes, tales como NO_x, CO y material particulado. Se demostrará con este estudio de tesis, que el estado funcional de los motores marinos de gran potencia debe ser considerado algo fundamental para la disminución de emisiones.

Para ello, se debe tomar medidas en motores que lleven acumuladas horas de funcionamiento próximas a las correspondientes para la realización del overhaul (denominación del mantenimiento programado a las 15.000 horas de funcionamiento) durante la fase de operatividad de dichos motores. Una vez terminados los trabajos de mantenimiento del motor, se toman mediciones a bordo nuevamente.

Se toma este camino de investigación alentada por la propia Normativa actual (ANEXO VI de MARPOL 73/78) que establecen los límites de masa admisibles de emisiones contaminantes en función de las revoluciones del motor. Según la Normativa se realizan pruebas con motores de nueva construcción en bancos de pruebas. Sin embargo, este estudio demostrará que no es suficiente tomar valores de referencia en bancos de prueba, sino que, debido a que, a la propia operatividad de los motores, éstos pueden sufrir determinados desajustes, es por ello que se debería tener en cuenta estas circunstancias, y realizar un control más exhaustivo de las emisiones producidas en condiciones normales de funcionamiento a bordo.

Además, tampoco se tienen en cuenta, los límites de emisiones contaminantes que se sobrepasan cuando el motor trabaja con un exceso de horas de funcionamiento, y próximo a su parada por mantenimiento programado por horas de funcionamiento del motor, según protocolo del fabricante. Se ha comprobado que, tras el reemplazo de los inyectores y

ajuste del sistema de inyección en general, el motor disminuye sus emisiones de NO_x, CO y material particulado fundamentalmente.

En base al estudio de Tesis, se realizan unos cálculos comparativos en la medición de emisiones de contaminantes de motores marinos, antes y después de la realización del mantenimiento por overhaul, se estaría en condiciones de proponer un modelo óptimo de operación que minimice las emisiones.

Este estudio de tesis se centra, por tanto, en analizar la influencia que ejercen las toberas de los inyectores, y los sistemas de fluidos que intervienen en el proceso de combustión (combustible y aire) en la formación de los contaminantes anteriormente mencionados. Los inyectores son los responsables de inyectar el combustible en la cámara de combustión, dan forma a la curva de caudal de descarga y además afectan tanto a las presiones y temperaturas, como el tiempo de permanencia de los gases de escape en el interior del cilindro. Los factores que influyen directamente en la formación de emisores contaminantes son las altas temperaturas que se dan en la cámara de combustión y el tiempo de permanencia de los gases de escape en el interior del cilindro.

Como objetivo principal de este estudio de tesis figura el desarrollar un modelo óptimo de operación para minimizar las emisiones contaminantes. Se podrá cuantificar la disminución de las emisiones que se producen con la realización de los mantenimientos programados por el fabricante del motor.

Palabras clave: Horas de Funcionamiento, Mantenimiento, Overhaul, Emisiones Contaminantes, Gases de Escape.

ABSTRACT

In this research study entitled “**Energy efficiency in maritime transport. Influence of the functional state of the diesel engines**”, it is going to study and verify that truly, the operating hours of different engine equipment, how the injectors nozzles, turbocharger and other parameters of the injection system can be, directly influence the emission of pollutants, such as NO_x, CO and particulate matter (PM). This thesis study will be demonstrated that the functional state of high-power diesel engines must be considered fundamental for reducing emissions.

To do this, measures must be taken in engines that have accumulated operating hours close to those corresponding to the overhaul (name of scheduled maintenance at 15,000 operating hours) during the operating phase of said engines. After the engine maintenance work is completed, measurements are taken on board again.

This research path is taken, encouraged by the current regulations (ANNEX VI of MARPOL 73/78) that establish the permissible mass limits for polluting emissions based on engine revolutions. According to the regulations, tests are carried out with newly engines in test benches. However, this study will show that it is not enough to take reference values in test benches, but that, due to the operation of the engines these can suffer certain imbalances, that is why these should be taken into account circumstances, and carry out a more exhaustive control of the emissions produced under normal operating conditions on board.

In addition, the limits of polluting emissions that are exceeded when the engine works with an excess of operating hours, and close to its stop for scheduled maintenance for hours of engine operation, according to the manufacturer's protocol, are not taken into account. It has been proven that, after replacing the injectors and adjusting the injection system in general, the engine reduces its emissions of NO_x, CO and particulate matter fundamentally.

Based on the thesis study, comparative calculations are carried out in the measurement of pollutant emissions marine engines, before and after carrying out overhaul maintenance, it would be in a position to propose an optimal operating model that minimizes emissions.

This thesis study, therefore, focuses on analyzing the influence exerted by the nozzles of the injectors, and the fluid systems involved in the combustion process (fuel and air) in the formation of the aforementioned pollutants. The injectors are responsible for injecting fuel into the combustion chamber, they shape the discharge flow curve and also affect both pressures and temperatures, as well as the residence time of the exhaust gases inside the cylinder. The factors that directly influence the formation of polluting emitters are the high temperatures in the combustion chamber and the residence time of the exhaust gases inside the cylinder.

The main objective of this thesis study is to develop an optimal operating model to minimize polluting emissions. It will be possible to quantify the decrease in emissions that occur with the performance of the maintenance scheduled by the engine manufacturer.

Keywords: Operating Hours, Maintenance, Overhaul, Pollutant Emissions, Exhaust Gases.

Índice de Contenidos

Listado de Figuras	27
Listado de Gráficos	29
Listado de Tablas	31
Listado de Abreviaturas y Acrónimos	33
CAPÍTULO 1.....	35
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	37
CAPÍTULO 2.....	47
HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS	49
2.1. Hipótesis de trabajo.....	49
2.2. Objetivos	51
CAPÍTULO 3.....	53
ANTECEDENTES.....	55
CAPÍTULO 4.....	73
METODOLOGÍA	75
4.1. Metodología utilizada	75
4.2. Plan de trabajo	88
4.3. Buques sometidos al estudio	92
CAPÍTULO 5.....	95
RESULTADOS.....	97
CAPÍTULO 6.....	127
DISCUSIÓN	129
CAPÍTULO 7.....	137
CONCLUSIONES	139
REFERENCIAS	143

ANEXO I.....	151
Capítulo de libro publicado.....	153
ANEXO II	167
Artículo publicado.....	169
ANEXO III.....	185
Artículo publicado.....	187
ANEXO IV	197
Características contaminantes y efectos del medio ambiente	199
ANEXO V	221
Anexo VI Marpol y Código NO _x	223

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Límites de emisiones de NO _x para los motores marinos de acuerdo con el Anexo VI MARPOL	43
Figura 2. Zonas ECA actuales y futuras	63
Figura 3. Unidad meteorológica	79
Figura 4. Equipo Testo 350 Maritime durante toma de datos	83
Figura 5. Equipo Testo 350 Maritime	83
Figura 6. Preparación del equipo para tomar mediciones en Motor B.....	85
Figura 7. Inyector del motor de estudio.....	87
Figura 8. Carcasa exterior turbosoplante Motor A.....	88
Figura 9. Motor A sometido a estudio.....	98
Figura 10. Motor A vista turbosoplante y colector de gases de escape.....	99
Figura 11. Motor B sometido a estudio	101
Figura 12. Motor B vista colector de gases de escape.....	102
Figura 13. Motor C sometido a estudio	104

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Transporte y actividad logística.....	38
Gráfico 2. Emisiones de NO _x y SO ₂ por países	41
Gráfico 3. Límites de emisiones de NO _x para motores marinos, Anexo VI Marpol.....	61
Gráfico 4. Calendario implementación de los límites de SO _x y NO _x según Anexo VI Marpol 73/78	62
Gráfico 5. Límites de contenido de azufre en los combustibles, Regulación Marpol	62
Gráfico 6. Metodología toma de emisiones.....	77
Gráfico 7. Concentraciones de CO ₂ y O ₂ Buque A antes del overhaul	99
Gráfico 8. Concentraciones de NO, CO, SO ₂ y NO ₂ Buque A antes del overhaul ...	100
Gráfico 9. Concentraciones de CO ₂ y O ₂ Buque B antes del overhaul	102
Gráfico 10. Concentraciones de NO, CO, SO ₂ y NO ₂ Buque B antes del overhaul..	103
Gráfico 11. Concentraciones de CO ₂ y O ₂ Buque C antes del overhaul	105
Gráfico 12. Concentraciones de NO, CO, SO ₂ y NO ₂ Buque C antes del overhaul..	105
Gráfico 13. Concentraciones de CO ₂ y O ₂ Buque A después del overhaul.....	107
Gráfico 14. Concentraciones de NO, CO, SO ₂ y NO ₂ Buque A después del Overhaul	108
Gráfico 15. Concentraciones de CO ₂ y O ₂ Buque B después del overhaul.....	109
Gráfico 16. Concentraciones de NO, CO, SO ₂ y NO ₂ Buque B después del Overhaul	110
Gráfico 17. Concentraciones de CO ₂ y O ₂ Buque C después del overhaul.....	111
Gráfico 18. Concentraciones de NO, CO, SO ₂ y NO ₂ Buque C después del Overhaul	112
Gráfico 19. Concentración de NO antes y después del overhaul Buque A	113
Gráfico 20. Concentración de CO antes y después del overhaul Buque A	114
Gráfico 21. Concentración de SO ₂ antes y después del overhaul Buque A	114
Gráfico 22. Concentración de NO ₂ antes y después del overhaul Buque A.....	115
Gráfico 23. Concentración de CO ₂ antes y después del overhaul Buque A.....	115
Gráfico 24. Concentración de O ₂ antes y después del overhaul Buque A.....	116

Gráfico 25. Concentración de NO antes y después del overhaul Buque B	117
Gráfico 26. Concentración de CO antes y después del overhaul Buque B.....	117
Gráfico 27. Concentración de SO ₂ antes y después del overhaul Buque B.....	118
Gráfico 28. Concentración de NO ₂ antes y después del overhaul Buque B.....	118
Gráfico 29. Concentración de CO ₂ antes y después del overhaul Buque B	119
Gráfico 30. Concentración de O ₂ antes y después del overhaul Buque B.....	119
Gráfico 31. Concentración de NO antes y después del overhaul Buque C	120
Gráfico 32. Concentración de CO antes y después del overhaul Buque C.....	120
Gráfico 33. Concentración de SO ₂ antes y después del overhaul Buque C.....	121
Gráfico 34. Concentración de NO ₂ antes y después del overhaul Buque C	121
Gráfico 35. Concentración de CO ₂ antes y después del overhaul Buque C	122
Gráfico 36. Concentración de O ₂ antes y después del overhaul Buque C	122
Gráfico 37. Emisiones de NO para cada Buque	123
Gráfico 38. Emisiones de CO para cada Buque	123
Gráfico 39. Emisiones de SO ₂ para cada Buque.....	124
Gráfico 40. Emisiones de NO ₂ para cada Buque.....	124
Gráfico 41. Emisiones de CO ₂ para cada Buque	125
Gráfico 42. Emisiones de O ₂ para cada Buque.....	125

LISTADO DE TABLAS

Tabla I. Impacto por contaminante.....	40
Tabla II. Zonas de Control de Emisiones.....	43
Tabla III. Valor límite de emisiones de óxidos de azufre	44
Tabla IV. Niveles de emisiones de óxidos de nitrógeno	56
Tabla V. Focos antropogénicos de emisiones primarias	60
Tabla VI. Enmiendas y resoluciones Anexo VI MARPOL	65
Tabla VII. Límites en el contenido de azufre en combustibles, Anexo VI MARPOL, Regla 14.4.....	67
Tabla VIII. Valores límite y umbral de alerta para el dióxido de azufre ⁽¹⁾	68
Tabla IX. Valores límite del dióxido de nitrógeno y de los óxidos de nitrógeno ⁽¹⁾ ...	69
Tabla X. Valores límite de inmisión de partículas PM ₁₀	69
Tabla XI. Valor objetivo y valor límite de inmisión de partículas PM _{2,5}	70
Tabla XII. Valor límite para el monóxido de carbono ⁽¹⁾	70
Tabla XIII. Valor límite para el benceno ⁽¹⁾	71
Tabla XIV. Datos motor Caterpillar sometido a estudio	93
Tabla XV. Datos tomados a bordo del Buque A Naviera A antes de realizar el mantenimiento por overhaul.....	97
Tabla XVI. Consumo de combustible según carga del Motor A	98
Tabla XVII. Datos tomados a bordo del Buque B Naviera B antes de realizar el mantenimiento por overhaul.....	100
Tabla XVIII. Consumo de combustible según carga del Motor B.....	101
Tabla XIX. Datos tomados a bordo del Buque C Naviera C antes de realizar el mantenimiento por overhaul.....	103
Tabla XX. Consumo de combustible según carga del Motor C	104
Tabla XXI. Datos tomados a bordo del Buque A Naviera A después de realizar el mantenimiento por overhaul.....	106
Tabla XXII. Consumo de combustible según carga del Motor A	107
Tabla XXIII. Datos tomados a bordo del Buque B Naviera B después de realizar el mantenimiento por overhaul.....	108

Tabla XXIV. Consumo de combustible según carga del Motor B.....	109
Tabla XXV. Datos tomados a bordo del Buque C Naviera C después de realizar el mantenimiento por overhaul.....	110
Tabla XXVI. Consumo de combustible según carga del Motor C.....	111

LISTADO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Bottom-up: Basado en la actividad

°C: Grado Centígrado, unidad de temperatura

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

ECA: Zonas de Control de Emisiones- Emission Control Areas

EEA: Agencia Europea de Medio Ambiente- European Environmental Agency

EEDI: Índice de Diseño de Eficiencia Energética- Energy Efficiency Design Index

EEOI: Indicador Operacional de Eficiencia Energética- Operational Energy Efficiency Indicator

EMSA: Agencia de Seguridad Marítima Europea- European Maritime Safety Agency

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos- U.S. Environmental Protection Agency

FEDER: Fondo Europeo de Desarrollo Regional

g: Gramo, unidad de masa

g/kWh: Gramos por kilovatios hora

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GNL: Gas Natural Licuado- Liquefied Natural Gas (LNG)

h: Hora, unidad de tiempo

H₂: Hidrógeno

HC: Hidrocarburos

kg: Kilogramo, unidad de masa

km: Kilómetro, unidad de distancia

kn: Nudo, unidad de velocidad- knot

kW: Kilovatio, unidad de potencia

kWh: kilovatio hora, unidad de energía

m: Metro, unidad de distancia

MARPOL: Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques o MARPOL 73/78, es un conjunto de Normativas Internacionales con el Objetivo de Prevenir la Contaminación por los Buques. Maritime Pollution.

M.A.: Motor Auxiliar

mm: milímetros, unidad de longitud

MM.AA.: Motores Auxiliares

MM.PP.: Motores Principales

NECA: Zonas de Control de las Emisiones Contaminantes de NO_x- Nitrogen Emission Control Area

nm: Milla náutica

NO_x: Óxidos de nitrógeno

NO₂: Dióxido de nitrógeno

O₃: Ozono

OMI: Organización Marítima Internacional- International Maritime Organization (IMO)

OMS: Organización Mundial de la Salud- World Health Organization (WHO)

OVERHAUL: Mantenimiento a las 15.000 h de funcionamiento

PGEEB: Plan de Gestión de la Eficiencia Energética

PM: Material Particulado

PM_{2,5}: Material particulado de diámetro inferior a 2.5 micras

PM₁₀: Material particulado de diámetro inferior a 10 micras

ppm: Partes por millón

rpm: revoluciones por minuto. Número de rotaciones completadas cada minuto por un cuerpo que gira alrededor de un eje

SECA: Zonas de Control de Emisiones Contaminantes de Azufre- Sulphur Emission Control Areas

SO₂: Dióxido de azufre

SO_x: Óxidos de azufre

SO₃: Trióxido de azufre

SOLAS: Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar- Safety of Life at Sea

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Las emisiones contaminantes procedentes de motores térmicos instalados a bordo de buques han tomado gran importancia durante la última década, ya que los motores térmicos marinos contribuyen a la degradación del medio ambiente en un porcentaje importante, aunque con un menor nivel de emisiones de CO₂ por tonelada y milla náutica navegada comparado con otros medios de transporte. j ^[1].

Como es sabido, las emisiones de SO_x, junto con NO_x, dan lugar a la formación de Partículas finas (PM_{2.5}) ^[2]; tras finalizar la combustión, el azufre contenido en el combustible se convierte en dióxido de azufre (SO₂) en la cámara de combustión, y una pequeña cantidad (1% ~ 2%) se oxida y se convierte en trióxido de azufre (SO₃) y es emitido directamente como material particulado ^[3]. No hay que olvidar que las emisiones de NO_x también contribuyen al aumento la capa de Ozono(O₃).

En este sentido, Winebrake J.J. estimó un total de 87.000 muertes anuales por cáncer cardiopulmonares y respiratorios causados por las emisiones de PM_{2.5} procedentes del transporte marítimo ^[4].

Por otro lado, las emisiones atmosféricas contaminantes procedentes de otras fuentes contaminantes como la industria terrestre o la industria automotriz y vehículos, son conocidas y controladas desde los años 80 ^[5, 6, 7, 8, 9]. Sin embargo, aún no hay un acuerdo unánime sobre qué procedimientos emplear para el cálculo de los inventarios de emisiones procedentes del transporte marítimo. Dicho cálculo depende de ciertos parámetros, entre los que se encuentran los valores de los factores de emisión de cada contaminante que los motores marinos emiten a la atmósfera, como son los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxidos de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos (HC) y material particulado (PM), así como los gases de efecto invernadero (GEI). Estos parámetros son muy importantes a la hora de realizar los inventarios de emisiones; hay que destacar que dentro de este ámbito existe una serie de incertidumbres siempre relacionadas con los parámetros que intervienen en el cálculo final de la cantidad de emisiones emitidas a la atmósfera.

Hoy en día el transporte marítimo sustenta la mayor parte del comercio mundial, estimándose en 2/3 partes del total o casi el 80% según algunas estimaciones y se considera como el medio de transporte más sostenible en comparación con otros sistemas logísticos (GHG Study).

La navegación tiene un papel esencial en el sistema global de transporte; a través de la industria marítima se mueve más del 80% del total de mercancías del mundo (Asariotis et al., 2009) ^[10]. La cantidad de mercancía desplazada mediante el transporte marítimo ha aumentado alrededor del triple desde 1970, también la media por tipo de barco ha aumentado; otra característica destacable de la flota mundial es el aumento de mercancías transportada mediante contenedor. El comercio marítimo mundial ha cobrado impulso y ha mejorado la confianza del sector del transporte marítimo. No obstante, comparado con otros medios, el transporte marítimo es el que menos consumo de combustible tiene por toneladas/ milla náutica navegada.

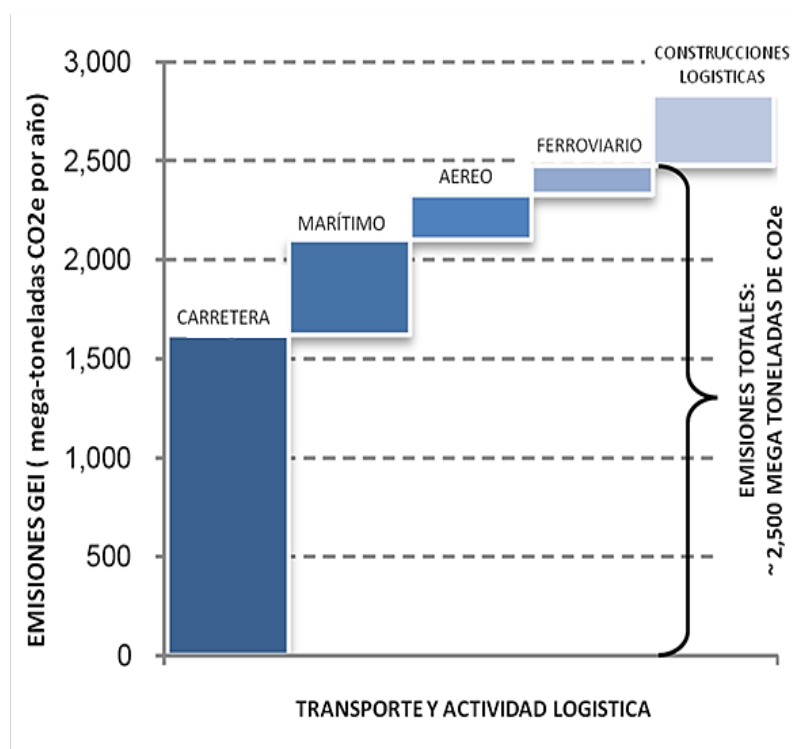


Gráfico 1. Transporte y actividad logística
Fuente: The logistics conference Milan, Mckinnon

Atendiendo a la situación actual la cual obliga a trazar estrategias en materias de reducción de emisiones contaminantes procedentes del transporte a nivel global y desde todos los sectores, la industria naval en particular está sufriendo una presión por parte de las regulaciones procedentes de los Organismos encargados en dictar Normas, que en este caso en particular concierne a la Organización Marítima Internacional (OMI). Si actualmente, estas emisiones representan el 3% de las emisiones de los gases de efecto invernadero a nivel mundial, el continuo aumento del transporte marítimo internacional sin aplicar medidas de mejoras de la eficiencia energética podría alcanzar valores próximos al 6% de aumento de este tipo de emisiones en un futuro inmediato^[11].

Múltiples estudios y representaciones independientes de las rutas de navegación muestran que alrededor del 70% o más de las emisiones de los buques internacionales se producen a menos de 400 km de la costa (Corbett et al. 1999^[12]; Endresen et al., 2003^[13], Eyring et al., 2005^[14]) lo que supone un grave riesgo debido a que estos contaminantes pueden ser transportados cientos de kilómetros tierra adentro (Eyring et al. 2007^[15]; Wang et al., 2007^[16]). Es por ello por lo que el transporte de los buques está considerado como una de las fuentes más importantes de contaminación atmosférica a larga distancia, (Convenio on Long-Range Transboundary Air Pollution, en adelante CLRTAP).

Tanto el CO₂ como el SO₂ son productos de la combustión del combustible, y pueden ser considerados como contaminantes primarios y secundarios. Contaminantes primarios es un término que se utiliza para los contaminantes que se forman durante el proceso de combustión, y los contaminantes secundarios son aquellos formados en la atmósfera como consecuencia de reacciones químicas. Los contaminantes primarios formados durante el proceso de combustión causan problemas de salud, acidificación, eutrofización, formación de foto-oxidantes y cambio climático entre otros. En la tabla I se indican los principales efectos de los contaminantes emitidos.

La OMI en 2009 realizó un segundo estudio sobre gases de efecto invernadero, analizando que se emitió 870 millones de toneladas, siendo un 2,7% de las emisiones totales de CO₂. Diversos países europeos están tomando medidas significativas para la reducción de las

emisiones contaminantes de CO₂, entre estas medidas se incluyen los programas de eficiencia energética, las instalaciones combinadas de calefacción y electricidad, el cambio de combustibles de carbón al gas natural y/o la madera, las medidas encaminadas a modificar la división de modalidades en el transporte, potenciando el transporte marítimo o fluvial y el ferrocarril por su menor consumo energético, y a la absorción de carbono mediante la reforestación ^[17].

Tabla I. Impacto por contaminante

Impacto	Contaminante					
	PM	SO ₂	NO _x	CO ₂	HC	CO
Salud	X	X	X			X
Acidificación		X	X			
Foto-oxidación			X		X	
Eutrofización			X			
Cambio Climático				X	X	

Fuente: Jackson & Jackson

Junto a las emisiones de partículas, el transporte marítimo causa una cantidad significativa de CO₂, SO_x y NO_x los cuales no sólo afectan a la salud, sino que también incrementan la lluvia acida. De todas formas, los sulfuros y óxidos de nitrógeno procedentes de las emisiones de los gases de escape de los buques también forman parte del proceso de reacciones en la parte más baja de la atmósfera debido al denominado “efecto aerosol”.

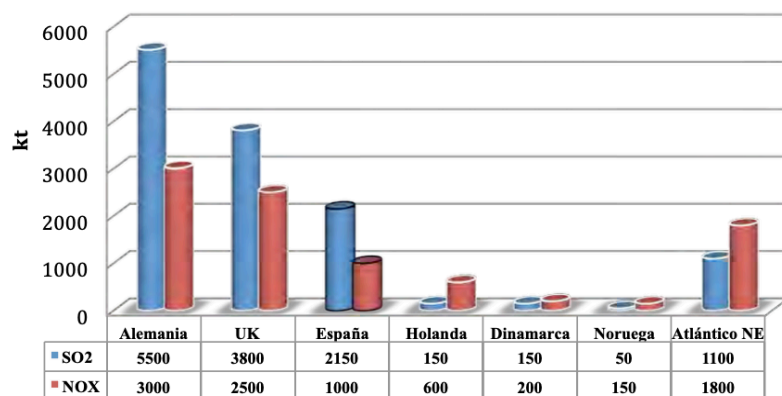


Gráfico 2. Emisiones de NO_x y SO₂ por países

Fuente: EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*)

Los inventarios globales sobre las cantidades de emisiones emitidas a la atmósfera reflejan las grandes contribuciones de concentraciones de NO_x, SO₂ y PM de los buques respecto del transporte por carretera. Esto se debe a las diferencias en las normas ambientales relativas a los diferentes modos de transporte, junto a un conjunto de diferencias tecnológicas.

Los estudios estadísticos realizados por distintos organismos e instituciones a nivel mundial no son coincidentes en cuanto al consumo total de combustible se refiere, lo que sí que está claramente definido son las relaciones entre el consumo de combustible y las emisiones de cada contaminante para condiciones normales de funcionamiento.

Actualmente los costes económicos derivados de los problemas de salud asociados con el tráfico marítimo dan lugar a un gran debate dentro del sector especializado. Solamente en Europa se considera la influencia que ejerce el material particulado (PM) sobre la salud, cuya repercusión económica puede tener unos costes de varios billones de euros. Aunque la contribución a la atmósfera de otros contaminantes como el contenido de

azufre en el combustible y los óxidos de nitrógeno también suponen un alto coste que deberían ser reducidos ^[18].

La Directiva 1999/32/CE (modificada por la Directiva 2005/33/CE) regula el contenido de azufre de los combustibles utilizados para el transporte marítimo e incorpora a la legislación de la UE determinadas reglas internacionales adoptadas en el marco de la Organización Marítima Internacional. Concretamente la Directiva, en su forma actual, incorpora reglas más estrictas sobre el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo en zonas que requieren una protección ambiental especial, denominadas zonas de control de las emisiones contaminantes de azufre (SECA). En la UE, las zonas SECA incluyen el Mar Báltico, el Mar del Norte y el Canal de la Mancha.

El anexo VI del Convenio MARPOL establece así mismo, disposiciones sobre las emisiones contaminantes de NO_x y permite la creación de zonas de control de las emisiones contaminantes de NO_x (NECA). En este anexo se recogen las reglas para la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques. La drástica reducción de estas emisiones supondría importantes beneficios sanitarios, especialmente para aquellas poblaciones en las proximidades de puertos y costas, y un beneficio medioambiental a nivel global.

Dado lo anteriormente expuesto, las emisiones con objetivo de control actualmente son los óxidos de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO_x).

Hay que tener en cuenta que en las últimas restricciones las emisiones procedentes del tráfico marítimo se regulan dependiendo de si se tratan de una zona de control de emisiones u otras, siendo las zonas de control de emisiones las siguientes:

Zona 1: Zona del mar Báltico, definida en el Anexo I del Convenio MARPOL.

Zona 2: Zona del Mar del Norte, definida en el Anexo V del Convenio MARPOL.

Zona 3: Zona de Norteamérica, definida en el apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL.

Zona 4: Zona del mar Caribe de los Estados Unidos, definida en el Apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL.

TABLA II. Zonas de Control de Emisiones

	EMISIONES	EN VIGOR A PARTIR DE
Mar Báltico	SO _x	19 de mayo de 2006
Mar del Norte	SO _x	22 de noviembre de 2007
Norte América	SO _x , NO _x	1 de agosto de 2012
Estados Unidos Mar Caribe ECA	SO _x , NO _x	1 de enero de 2014

Fuente: IMO

Las restricciones están catalogadas en niveles o *tiers*, siendo los más restrictivos el *tier II* y *tier III*, de modo que a las zonas de control de emisiones se les aplica el nivel III, y fuera de ellas se aplicará el nivel II. Dentro de las zonas de control de emisiones, la zona del mar Báltico y la zona del Mar del Norte solo limitan las emisiones de óxidos de azufre, mientras que, en las zonas de Norteamérica y mar del Caribe, además se limita la emisión de óxidos de nitrógeno y material particulado.

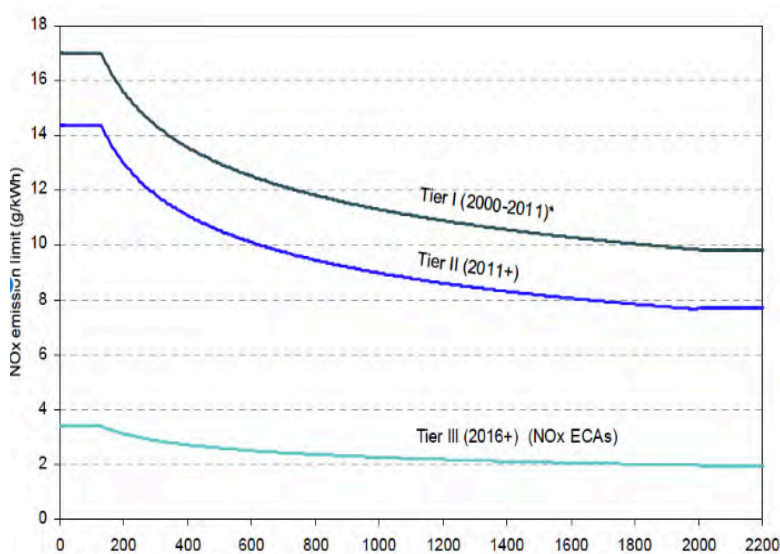


Figura 1. Límites de emisiones de NO_x para los motores marinos de acuerdo con el Anexo VI MARPOL

Fuente: IMO

Para disminuir los efectos de las emisiones, la Organización Marítima Internacional ha publicado normas de obligado cumplimiento. La necesidad de controlar las emisiones ha llevado a marcos regulatorios restringidos al uso de opciones especiales de

abastecimiento de combustible. El Anexo VI del Convenio MARPOL de la Organización Marítima Internacional coloca un límite al azufre en áreas especiales, denominadas zonas ECAs (Zonas Controladas de Emisiones). En zona SECA (área controlada por emisión de azufre), en la zona del Norte y del Mar Báltico, la fracción máxima de azufre en combustible tiene que ser inferior al 1% desde 2010 y posteriormente entraría en vigor en Norteamérica en 2012. Este límite se redujo a menos del 0,1% en 2015. El azufre mundial se limita en 2012 al 3,5% en combustible. Actualmente, desde enero de 2020, tenemos un límite de 0,5 %.

Tabla III. Valor límite de emisiones de óxidos de azufre

Límite de emisiones SO _x y de materia particulado dentro de la zona de control de emisiones	Límite de emisiones SO _x y de materia particulado fuera de la zona de control de emisiones
1,5% masa/masa antes del 1 de julio de 2010	4,5% masa/masa antes del 1 de enero de 2012
1,0% masa/masa a partir del 1 de julio de 2010	3,5% masa/masa a partir del 1 de enero de 2012
0,1% masa/masa a partir del 1 de enero de 2015	0,5% masa/masa a partir del 1 de enero de 2020

Fuente: Anexo VI MARPOL regla 14

Al reducirse el contenido de azufre, también se disminuirán las emisiones de material particulado, al ser éstas una parte importante de las emisiones. De todas formas, nunca será posible la reducción absoluta de material particulado, aún toda la flota global disminuyera el contenido de azufre en el combustible consumido. Las emisiones de PM también pueden ser reducidas usando técnicas de pos-tratamiento las cuales eliminan una parte significativa de este PM.

Tras las medidas de emisiones contaminantes reflejadas en este estudio de tesis y que han sido efectuadas a bordo de diferentes buques, se ha podido comprobar la influencia que tiene el estado de conservación de los motores sobre el contenido de emisiones, fundamentalmente de NO_x . Quiere decir esto que la Normativa actual (ANEXO VI MARPOL) deberá interpretarse en sus términos exactos porque, de otra forma, puede inducir a error en el momento en que haya una desviación entre las condiciones de operación y aquéllas en las que se hizo el primer control en banco de pruebas. Esto significa que no se debe presuponer la exactitud de las medidas entre motores idénticos si dichas medidas no son efectuadas en las mismas condiciones de carga y velocidad.

En este estudio de tesis queda demostrado que las medidas de emisiones tomadas en un motor nos sirven como indicador del estado de otras variables de operación del propio motor, concretamente de todas las que componen el sistema de inyección y aire de alimentación.

De esta forma, se ha conseguido desarrollar un estudio que nos ha llevado a relacionar claramente el contenido de NO_x , CO y material particulado de las emisiones con el estado de la combustión que se produce en el interior del motor.

CAPÍTULO 2

HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS

HIPÓTESIS DE TRABAJO

Se puede decir que este estudio de tesis es una continuación de la tesis que elaboró la Dra. Cristina Vanesa Durán Grados “*Influencia del contenido de emisiones de NO_x en el rendimiento de la combustión en Motores Diésel Marinos*” (marzo, 2007), donde se realizó un estudio de investigación influenciado en la escasa o nula información sobre los valores límites de NO_x, CO, SO_x y material particulado que emite un motor diésel marino en condiciones normales de funcionamiento. Dado que el Anexo VI de Marpol hace referencia a motores de nueva construcción, pero no tienen en cuenta la realización de comprobaciones periódicas coincidentes con el aumento de horas de funcionamiento de los motores marinos.

Se realiza este estudio de tesis una vez analizado el material publicado y la falta de profundidad en este sentido y la inclusión en los inventarios de emisiones del estado funcional de los motores como una incertidumbre importante a tener en cuenta.

El control de emisiones contaminantes producidas por el tráfico marítimo está teniendo cada vez más importancia y, sobre todo, se es conocido lo importante que es la vigilancia de las emisiones procedentes de los motores marinos. Pero hasta ahora estos cálculos son estimados y basados fundamentalmente en el cálculo de emisiones globales y no en mediciones tomadas a bordo. En estos cálculos no se contemplan las condiciones de operatividad y perfiles de carga del motor. Además, en estos cálculos estimados se supone que la relación que existe entre la producción de concentraciones de NO_x y la potencia desarrollada por el motor, es una relación lineal. Cuando se analizan datos reales tomados directamente de un motor, podemos apreciar que no es así, dado que existe una zona de trabajo (30%- 75% de la carga) donde el motor emite mayores concentraciones que para cargas superiores.

En cuanto a las condiciones de operatividad, hay que hacer hincapié en diferenciar las condiciones de funcionamiento de un motor en servicio instalado en una sala de máquinas de un buque y las de un motor en banco de pruebas, y es en esta última condición donde

tras realizar las pruebas se emite la certificación del motor. Evidentemente en las condiciones de funcionamiento del motor instalado a bordo entran en juego las fluctuaciones de carga, debidas mayoritariamente a las condiciones meteorológicas, que condicionan en gran medida a las fluctuaciones de par resistentes, muy frecuentes con condiciones de mal tiempo. Si se tuvieran en cuenta estas fluctuaciones, se analizaría la influencia directa que ejercen sobre las emisiones contaminantes procedentes del tráfico marítimo, las cuales no sólo deben ser controladas por los daños que provocan al medio ambiente, sino que además son un claro indicador del estado funcional del motor.

La hipótesis inicial fue la de comprobar la influencia de los diferentes emisores sobre el proceso de combustión, ligado al sistema de inyección y sistema de aire de admisión. Tras el análisis de los resultados obtenidos durante las diferentes tomas de mediciones realizadas a bordo, se comprueba que no existe una relación potencia- emisiones de NO_x que corresponda a una ley exacta.

Como segunda hipótesis se plantea utilizar los datos de las emisiones tomadas para analizar las causas de formación de los mismo y elaborar un plan de actuación a tener en cuenta sobre los mantenimientos u acciones que se deben corregir en el motor para así minimizar las concentraciones de emisores contaminantes.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio de tesis es desarrollar un análisis de la influencia que los cambios de presión en la inyección, el estado de conservación de las toberas, la sincronización del sistema de inyección y las condiciones de presión y temperatura del aire de aspiración, ejercen sobre las emisiones al objeto de proponer un modelo adaptado a cada motor en particular que minimice las emisiones.

En base a lo anteriormente expuesto, los objetivos de este estudio son los siguientes:

1. Cuantificar emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero en motores próximos a su revisión por horas de funcionamiento y realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos con el motor en condiciones originales provenientes de fábrica, si las hubiera.
2. Cuantificar emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero en esos mismos motores una vez realizadas las operaciones de mantenimiento correspondientes y realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos antes de dicha revisión.
3. Definir un modelo óptimo de funcionamiento en base a los resultados anteriores.

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

El estado funcional de los motores nunca es cuantificado en los inventarios de emisiones procedentes del transporte marítimo, a pesar de que tiene una clara influencia sobre la cantidad que se emite de cada uno de estos contaminantes, principalmente los NO_x, CO y material particulado. El estado funcional de los motores marinos de gran potencia influye sobre la producción de estos contaminantes, en este estudio de tesis nos basaremos fundamentalmente en el estado de conservación de las toberas, inyectores, aire de aspiración y, en general, todos los elementos que intervienen en el proceso de combustión.

El análisis se efectuará sobre varios motores:

- 1.- Funcionando con los sistemas de combustión y aire en las condiciones correspondientes a un número elevado de horas de funcionamiento que suponga una parada próxima para realizar el mantenimiento correspondiente a las 15.000 horas de funcionamiento, mantenimiento denominado overhaul.
- 2.- Toma de datos una vez revisado y ajustado el motor.

La Normativa actual (ANEXO VI de MARPOL 73/78) establece un límite de emisiones en función de las revoluciones del motor, pero este límite está basado en pruebas realizadas con motores de nueva fabricación y en banco de pruebas. Sin embargo, no se hace referencia alguna a los límites que se pueden sobrepasar cuando el motor se encuentra en un mal estado de funcionamiento como, por ejemplo, con toberas e inyectores en mal estado, mala sincronización de la inyección, problemas con la temperatura y humedad del aire de aspiración, con excedente de horas de funcionamiento sin revisión, etc.

Cuando se realizan las mediciones del motor en banco de pruebas, se realizan según el Código Técnico con las condiciones óptimas para obtener el valor mínimo de emisiones de NO_x ^[19].

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

Los motores diésel instalados en buques a nivel mundial tienen que cumplir con las regulaciones de emisiones 73/78 ANEXO VI del Convenio MARPOL de la OMI cuyo cumplimiento se comprueba en banco de pruebas; pero esta regla no exige comprobar su cumplimiento una vez instalado el motor a bordo. No existe ningún método para seguir comprobando el régimen de emisión a bordo, sólo podemos comprobar a través del histórico de mantenimiento de los motores marinos si se ha cumplido con las horas de funcionamiento que propone el fabricante.

Las emisiones procedentes de los motores marinos se componen principalmente de NO_x, CO, SO_x y material particulado (PM), como se ha expuesto anteriormente. De los mencionados sólo las emisiones de NO_x están limitadas en los motores diésel marinos por medio de una regulación internacional (ANEXO VI, MARPOL) aprobada por la Organización Marítima Internacional. La limitación de NO_x se define en la regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78. El 1 de enero de 2011, entró en vigor el límite de emisión Nivel II, estando vigente hasta el 1 de enero de 2016, que entró en vigor el límite de Nivel III.

TABLA IV. Niveles de emisiones de óxidos de nitrógeno

	ENTRADA EN VIGOR	NUEVOS MOTORES INSTALADOS A PARTIR DE	LIMITE NO_x g/kWh	REDUC. RELATIVA A RESPECTO A TIER I
Tier I	2005	Del 1 enero 2000 al 31 diciembre 2010	9,8 – 17,0	-
Tier II	1 de enero de 2011	Posteriores al 1 de enero de 2011	7,7 – 14,4	15 – 25%
Tier III	1 de enero de 2016	Barcos construidos después del 1 de enero de 2016 y que operan en NECAs	2,0 – 3,4	80%

Fuente: IMO

También, como ya es conocido, sobre el 21% del aire atmosférico es oxígeno, gas necesario para la combustión, pero la mayor parte de ese aire atmosférico es nitrógeno. La principal fuente de formación de NO_x es la oxidación del nitrógeno atmosférico en la admisión, que se produce en la combustión a consecuencia de las altas temperaturas; cuanto mayor temperatura de combustión y mayor tiempo expuesto a alta temperatura, mayor será la formación de NO_x . Bajo las condiciones de altas presiones y temperaturas que se dan en un motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno reaccionan en el aire formando óxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, los cuales los conocemos como NO_x .

Los NO_x se forman en la cámara de combustión por la combinación de nitrógeno y oxígeno en condiciones de alta presión y temperatura. Aunque el combustible tiene algo de nitrógeno y oxígeno en su composición, la fuente principal de la formación de NO_x es la combinación de nitrógeno atmosférico y el oxígeno. La mayor parte de los NO_x producidos en la cámara de combustión de los motores diésel marinos proviene del aire que interviene en el proceso de combustión. Como es sabido, los principales mecanismos de formación son el conocido mecanismo térmico (mecanismo de Zeldovich), el mecanismo indicador de NO (mecanismo Fenimore) y el mecanismo de nitrógeno contenido en el combustible. El NO_x térmico es de alrededor de 70% del total de NO_x en las condiciones de la cámara de combustión en un motor diésel de velocidad media ^[20]. El mecanismo Zeldovich es el responsable de la mayoría de las emisiones de NO_x procedentes de los motores Diésel cuando la temperatura de combustión excede los 2000K. El valor máximo de la temperatura y la aproximación de la relación aire-combustible al valor estequiométrico de la mezcla, son importantes. A una temperatura inferior a 1700K, su contribución es insignificante.

El mecanismo Fenimore ^[21], es otro mecanismo que influye en la formación de los NO_x , es muy rápido y se forman en la zona de combustión. La generación de los NO_x es muy significativa a temperaturas mayores a los 2000K. Los NO_x provienen de los fragmentos del carbono contenido en el combustible, con un cambio de fase de combustión relacionada por la disminución de temperatura.

Por tanto, es fácilmente deducible que cuanto menor sea el valor de la temperatura a la que se produce la combustión y cuanto más rápida sea ésta, menor será la formación de NO_x . Pero ambas circunstancias influyen negativamente en el rendimiento del motor por lo que, en principio, las medidas para reducir las emisiones de NO_x se deberían basar fundamentalmente en la reducción de la temperatura máxima de combustión y la reducción del tiempo de combustión mediante procedimientos que no impliquen una reducción del rendimiento, aunque la mayoría de ellas tienden a reducir la temperatura máxima de combustión, ya que la formación de NO_x es una función exponencial de la temperatura ^[22]. De hecho, la proporción de NO_x suele incrementarse por un factor de proporción de 10 por cada 100K de aumento de temperatura ^[23].

Debido a esto, los principales métodos de reducción de emisiones de NO_x en el motor se centran en la reducción de la temperatura de combustión máxima y la duración de la combustión. Estos métodos de limitación de emisiones en el motor han traído como consecuencia una disminución de la eficiencia energética de los motores diésel ^[24]. Esta característica de la formación de NO_x se contempla en la Regla 13 del Anexo VI y los límites de emisión específicos son mayores cuanto menor es la velocidad del motor. Cuanto más potencia y volumen tenga el motor, por lo general, más lenta es la velocidad del pistón durante la carrera, más adiabático es el proceso de combustión y, por lo tanto, mayores las temperaturas de combustión, con lo cual, mayor formación de NO_x . Hay que tener en cuenta los daños que ocasiona este contaminante, tanto para la salud (principalmente al tracto respiratorio) como al medio ambiente incluso en zonas alejadas del punto de emisión.

Para evitar la formación de partículas (material particulado), se limita el contenido de azufre en los combustibles. Los límites de contenido de azufre en los combustibles se establecen en la regla 18 del MARPOL ANEXO VI.

El PM se utiliza para definir a las partículas sólidas o líquidas que se encuentran en el aire. Según la EPA, los focos móviles originados por la conversión de energía por medio de un motor diésel, contribuye a más de la mitad de las emisiones de material particulado ^[25].

Por otro lado, se ha comprobado que si los motores consumen fuel-oíl pesado con alto contenido de azufre, existe una fuerte dependencia de la emisión de PM con el contenido de azufre en el combustible ^[26]. Esto significa que una reducción del contenido de azufre en el combustible ocasiona una reducción directa de PM en los gases de escape. El límite de contenido de azufre en el combustible actualmente se ha reducido al Nivel III ^[27].

En este estudio de tesis, se trata de demostrar que no es suficiente tomar valores de referencia en bancos de prueba, sino que se deben tener en cuenta, las emisiones producidas en condiciones normales de funcionamiento a bordo, lo que exige que la toma de valores se realice cuando los motores están instalados a bordo y efectuando su período de pruebas, con el fin de poder ajustar las condiciones de la instalación.

Posteriormente, una vez definido el modelo que relacione las emisiones con dichos parámetros, se puede predecir el estado funcional del motor.

Cabe recordar que, por cada dólar invertido en Estados Unidos en programas de reducción de emisiones, se obtienen nueve de beneficio en salud y medioambiente ^[28].

Los contaminantes presentes en la atmósfera proceden de dos tipos de fuentes emisoras bien diferenciadas: las naturales y las antropogénicas. En el primer caso la presencia de contaminantes se debe a causas naturales, mientras que en el segundo su origen es debido a la actividad humana ^[29].

Las emisiones primarias originadas por los focos naturales provienen fundamentalmente de los volcanes, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos. Por su parte, los principales focos antropogénicos de emisiones primarias los podemos clasificar en:

Tabla V. Focos antropogénicos de emisiones primarias

Focos fijos	Industriales	Procesos industriales
		Instalaciones fijas de combustión
	Domésticos	Instalaciones de calefacción
Focos móviles	Vehículos automóviles	
	Aeronaves	
	Buques	
Focos compuestos	Aglomeraciones industriales	
	Áreas urbanas	

Fuente: Tesis Dra. Vanesa Durán Grados

Este trabajo está centrado exclusivamente en el estudio de los focos de contaminación puntuales, como son las chimeneas de los buques y a ellos, fundamentalmente, nos referiremos en estos análisis críticos de antecedentes y referidos a la producción de los NO_x, CO y material particulado.

La actividad marítima ha aumentado considerablemente a lo largo del siglo pasado y en la actualidad representa una importante contribución a las emisiones globales de contaminantes y de gases de efecto invernadero. A pesar de esto, la información sobre el desarrollo histórico de consumo de combustible y las emisiones contaminantes por lo general está limitada, con pocos datos publicados y con grandes desviaciones en las estimaciones que cubren las 3 últimas décadas ^[11].

La contaminación del aire en zonas costeras es alta, debido al tráfico marítimo. Por ejemplo, en 2005 el 35% las concentraciones de azufre en zonas costeras las originó el tráfico marítimo internacional y superó el 0,2 g/m²/ año, con valores máximos de entre 0,5-1 g/ m²/ año ^[30].

Los buques en ese año emitieron alrededor de 1,7 millones de toneladas de SO₂, alrededor del 20% de las emisiones contaminantes procedentes de fuentes terrestres en la UE-27. En 2005, los buques emitieron alrededor de 2,8 millones de toneladas de NO_x, las equivalentes al 25% de las emisiones contaminantes generadas en tierra. Sobre el 30% de estas emisiones contaminantes fueron generadas en los mares territoriales de los Estados miembros de la UE, o sea, dentro de las 12 millas náuticas de la costa.

Por lo tanto, el transporte marítimo internacional crea un gran impacto ambiental. En 2005 la contaminación del aire provocada por el tráfico marítimo provocó 60.000 muertes anuales, 700 casos de muertes prematuras debidas a la capa de Ozono y 17.000 km² de ecosistemas afectados por la deposición ácida ^[31].

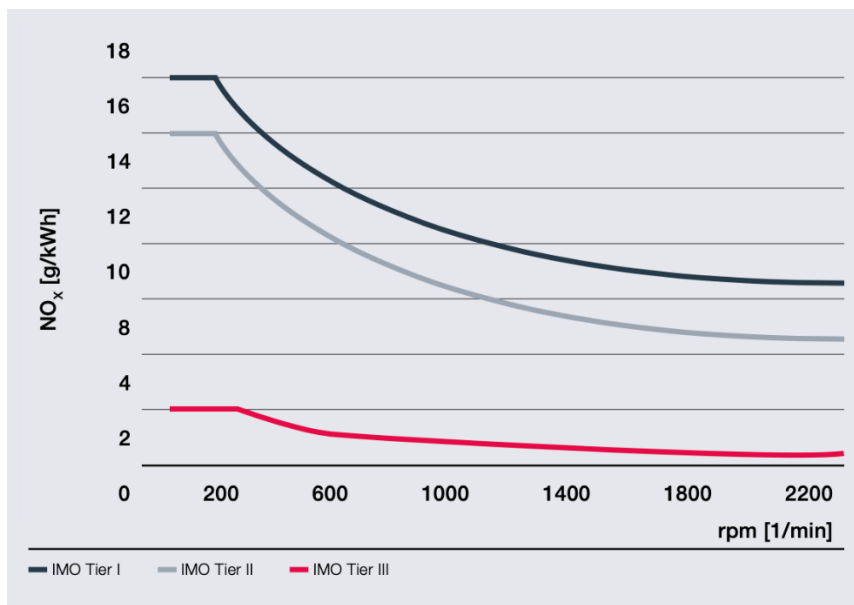


Gráfico 3. Límites de emisiones de NO_x para motores marinos, Anexo VI Marpol
Fuente: IMO

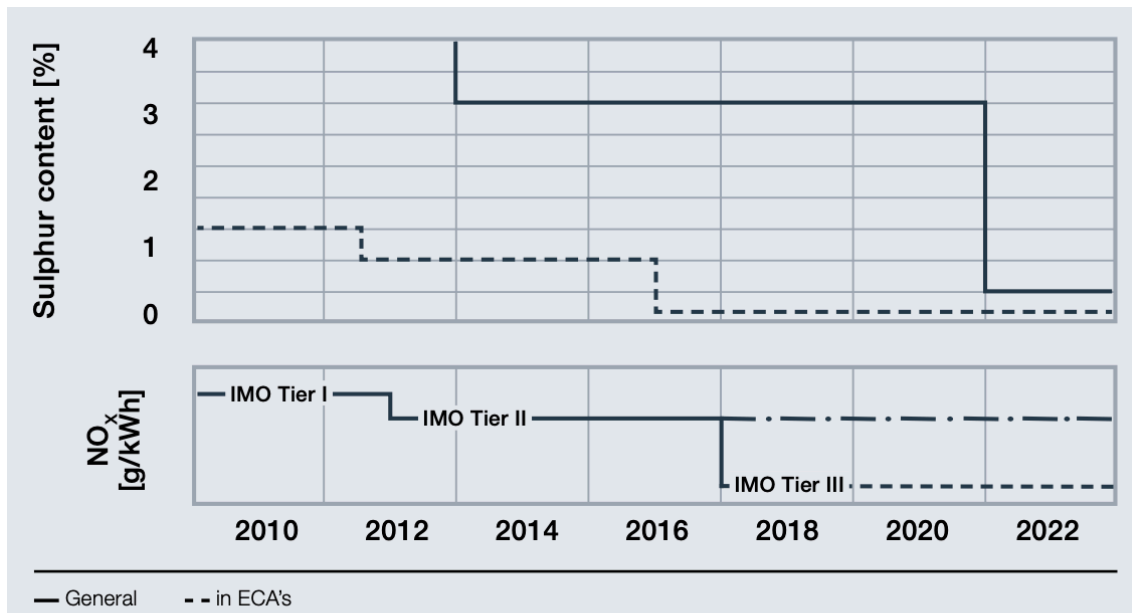


Gráfico 4. Calendario implementación de los límites de SO_x y NO_x según Anexo VI Marpol 73/78
Fuente: IMO

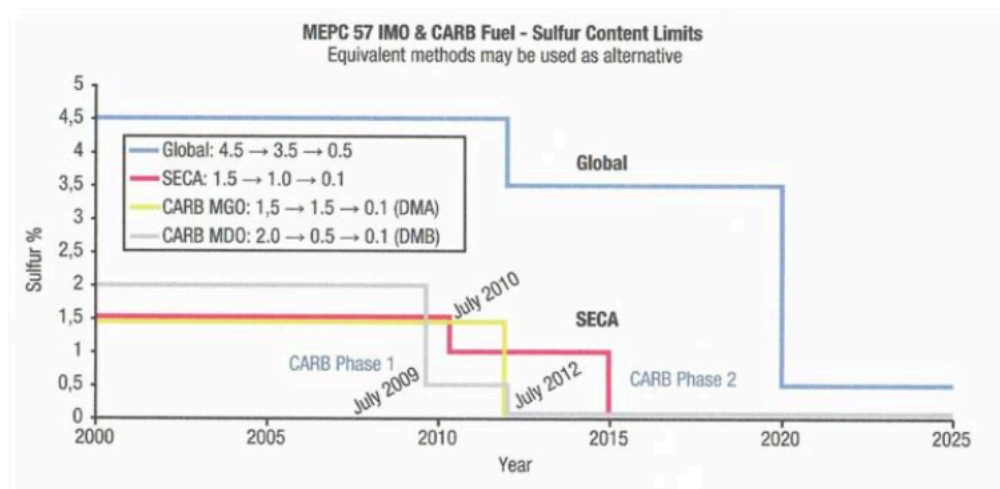


Gráfico 5. Límites de contenido de azufre en los combustibles, Regulación Marpol
Fuente: Man M&W

En el gráfico 5 se muestra la regulación para el contenido de azufre en los combustibles por año.

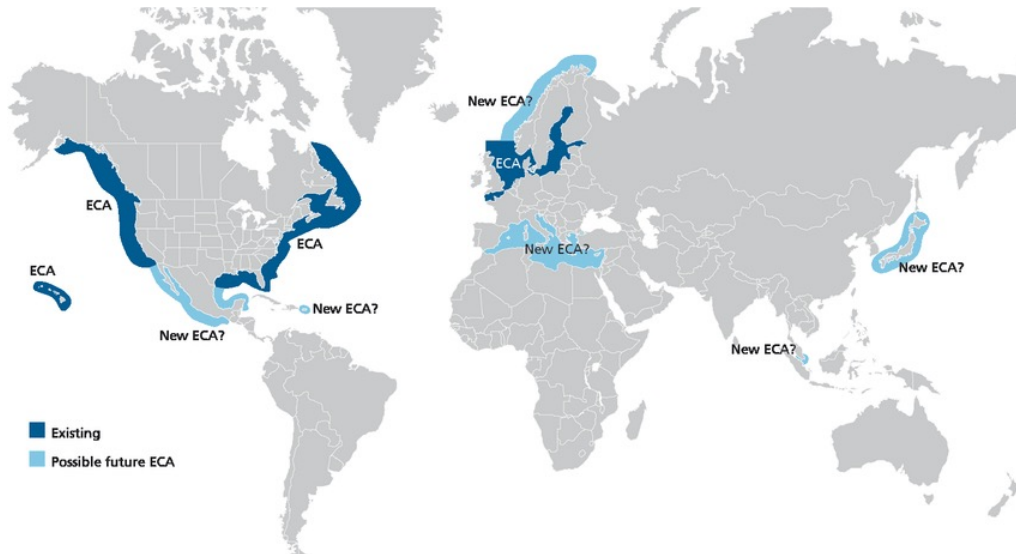


Figura 2. Zonas ECA actuales y futuras

Fuente: Man B&W

La aplicación de la legislación NECA en el Mar Báltico y el Mar del Norte (incluido el Canal De la Mancha) y la SECA de azufre y óxidos de nitrógeno en las aguas territoriales de la UE-27 podrían ayudar a reducir las emisiones contaminantes en 2030 en 23kt de SO_2 y 460kt de NO_x . Para el caso de las Zonas Económicas Exclusivas (200 millas náuticas), estas aplicaciones legislativas conllevarían una caída en las emisiones contaminantes a un total de 160 kt de SO_2 y 970 kt de NO_x para ese mismo año. En cuanto a las emisiones contaminantes de PM se reducirían en un 66 % [32].

Es de total importancia poseer un inventario de emisiones contaminantes por zonas locales. España, hasta la fecha, no tiene publicado un inventario de emisiones contaminantes procedentes del transporte marítimo empleando la metodología de bottom-up. Esta metodología es la empleada por otros países europeos cuando han definido sus emisiones contaminantes con el objetivo de controlar la calidad del aire.

Desde 1992, se han utilizado varios métodos utilizando enfoques diferentes para estimar las emisiones contaminantes procedentes del transporte marítimo a nivel global. Pero hay diferencias significativas en los informes publicados sobre estos inventarios de emisiones

contaminantes. Se han publicado varios artículos en estos últimos 15 años citados algunos, Dalsoren et al. ^[33], Olesen et al. ^[34], Endresen et al. ^[35], Wang et al. ^[36], Jalkanen et al. ^[37], Miola et al. ^[38], Eyring et al. ^[39], Corbett y Koehler ^[40], todos exponen diferencias significativas.

Desde la Unión Europea se están desarrollando estrategias para reducir las emisiones contaminantes atmosféricas procedentes del transporte marítimo. Por ejemplo, si el 50% de los buques que transitan con travesías cortas el Mar Báltico y el Mar del Norte utilizaran gas natural licuado (GNL) como combustible, en el 2030 se llegaría a reducir la contaminación del aire en un 25%.

En la siguiente tabla se observan los límites de emisiones contaminantes de NO_x, SO_x y PM establecidos por las diferentes Normativas y Reglas dictadas por la OMI.

TABLA VI. Enmiendas y resoluciones Anexo VI MARPOL

Denominación	Entrada en vigor	Descripción
MARPOL Anexo VI, 1997	19 mayo 2005	Establece los límites de emisiones contaminantes procedentes del transporte marítimo de SO _x y NO _x . Límite de 4,5% en el contenido de azufre del combustible. Consideraciones a tener en cuenta en las zonas de control de emisiones contaminantes de SO _x Control Áreas (SECA _s): el contenido consumido a bordo no debe exceder de 1,5% m/m. También establece límites en las emisiones contaminantes de NO _x .
Resolución MEPC 82 (43), 1999	1 julio 2010	Reducción del límite de contenido de azufre del combustible de 4,5% a 3,5%. Reducción en los límites de contenido de azufre de 1,5% a 1%, teniendo prevista su reducción a 0,1% en enero de 2015.
Resolución MEPC 53 (24), 2000	Noviembre 2006	Se declara el Mar del Norte como zona SECA
Resolución MEPC 176 (58), 2008	1 enero 2012	4,5% m/m
	Desde 1 enero 2012	3,5% m/m
	Desde 1 enero 2020	0,5% m/m
Requerimientos Zona ECA. Límites de Azufre en el combustible	Antes de 1 julio 2010	1,5 % m/ m
	A partir de 1 julio 2010	1% m/ m
	A partir de 1 julio 2015	0,1% m/ m
Resolución	Julio 2010	Límites de emisiones contaminantes de NO _x : Tier 0, Tier I, Tier II (límites globales) y Tier III standards sólo aplicable en zonas NO _x ECAs.

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

MEPC 177 (58), 2008		
Resolución MEPC 203 (62), 2011	1 enero 2010	El EEDI suministra una figura específica individual para el diseño de buques, expresada en gramos de dióxido de carbono (CO ₂) por cada milla navegada. El menor EDDI se identificará como el más eficiente y es calculado por una ecuación basada en los parámetros de diseño para cada buque individual.

Fuente: *Environment International* 66 (2014) 44–47 ^[41]

Consideraciones:

- a) Quedan exentos los buques que utilicen medios aceptados de reducción de emisiones contaminantes.
- b) Las concentraciones máximas de contenido de azufre establecidas se expresan en % m/m, gramos de soluto/ gramos de solución por 100%.
- c) Según Anexo VI, regla 14.3.1., las zonas actuales denominadas como SECA's son el Mar Báltico y el Mar del Norte, incluido el Canal de la Mancha (Canal de la Mancha).
- d) El 3,5% sólo pueden ser excedidos si se emplean métodos aceptados de reducción de emisiones contaminantes, por ejemplo, scrubbers.
- e) Para buques de cualquier bandera navegando en aguas europeas se permiten métodos de reducción de emisiones contaminantes y combustibles alternativos, como pueden ser scrubbers (sistema de lavado de gases de escape), células de combustibles, mezcla de combustibles marino y boil off, LNG, biocombustibles, si las emisiones contaminantes de SO_x que producen son equivalentes a las que emitiría cualquier otro combustible marino que cumpla con los límites establecidos.

TABLA VII. Límites en el contenido de azufre en combustibles, Anexo VI MARPOL, Regla 14.4

	Fuera de zonas Secas	Dentro de zonas Secas
Buques en Puertos (incluidos fondeados)	0,10 % No aplicable si está menos de 2 horas en puerto o si se va a tomar corriente de tierra	
Buques de pasajeros con servicio regular entre puertos de la Unión	Hasta 01-01-2020: 1,5 % Desde 01-01-2020: 0,5 %	Hasta 31-12-2014: 1,00 % Desde 01-01-2015: 0,1 %
Otros casos de buques	Desde 18-06-2014: 3,5 % Desde 01-01-2020: 0,5 %	Hasta 31-12-2014: 1,00 % Desde 01-01-2015: 0,1 %

Fuente: IMO

La formación de partículas está relacionada con el contenido de azufre en el combustible, si se reduce dicho contenido de azufre en el combustible, se reducirían las partículas. Las partículas de rango de PM_{2,5} e inferiores tiene un fuerte potencial para actuar contra la salud humana, es uno de los aerosoles más peligrosos para la salud humana y del medio ambiente ^[41].

En 2005 el transporte marítimo internacional emitió un total de 195.000 toneladas de partículas en el rango de 2,5.

Con la aplicación de la nueva Normativa, se puede observar una disminución del 13,5% de NO_x hasta 2020 y una gran disminución de los SO_x a menos de 300.000 toneladas, lo que supone más del 80%. Esto ha sido debido a la reducción del contenido de azufre en

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

el combustible a un 0,1% en las zonas SECA y 0,5 en el resto de las zonas. Con esta mejora de la calidad del combustible se ha tenido una disminución del 35% de PM_{2,5}.

En 2030 se prevé que las emisiones contaminantes sufran un ligero aumento debido a un aumento de la actividad marítima y por ello causará un mayor consumo de combustible. En 2050, las emisiones contaminantes seguirán aumentando hasta alcanzar unos valores entre el 40-50% más que en el 2020.

En la siguiente tabla se recogen los valores límites establecidos en el mencionado Real Decreto 102/ 2011 para el dióxido de azufre.

TABLA VIII. Valores límite y umbral de alerta para el dióxido de azufre ⁽¹⁾

	Periodo de promedio	Valor límite	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor límite horario	Una hora	350 µg/m ³ , valor que no podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil.	En vigor desde el 1 de enero de 2005
Valor límite diario	24 horas	125 µg/m ³ , valor que no podrá superarse en más de tres ocasiones por año civil.	En vigor desde el 1 de enero de 2005
Nivel crítico ⁽²⁾	Año civil e invierno (del 1 de octubre al 31 de marzo).	20 µg/m ³	En vigor desde el 11 de junio de 2008

El **umbral de alerta de SO₂** se sitúa en 500 µg/m³. Se considerará superado cuando durante tres horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona, o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

Fuente: Real Decreto 102/2011

(1) Los valores límite se expresan en µg/m³. El volumen a la temperatura de 293 K y a la presión de 101,3 kPa.

(2) Para la aplicación de este valor límite se tomarán en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición representativas de los ecosistemas a proteger, sin perjuicio, en su caso, de la utilización de otras técnicas de evaluación.

En la siguiente tabla se presentan los límites de óxidos de nitrógeno a cumplir desde enero de 2010 establecidos en el Real Decreto 102/ 2011.

TABLA IX. Valores límite del dióxido de nitrógeno y de los óxidos de nitrógeno ⁽¹⁾

	Período de promedio	Valor límite	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor límite horario	Una hora	200 µg/m ³ NO ₂ que no podrán superarse en más de 18 ocasiones por año civil	50% a 19 de julio de 1999, valor que se reducirá el 1 de enero de 2001 y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes anuales idénticos, hasta alcanzar un 0% el 1 de enero de 2010. 50% en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.	En vigor desde el 1 de enero de 2010
Valor límite anual	Un año civil	40 µg/m ³ de NO ₂	50% a 19 de julio de 1999, valor que se reducirá el 1 de enero de 2001 y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes anuales idénticos, hasta alcanzar un 0% el 1 de enero de 2010. 50% en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.	En vigor desde el 1 de enero de 2010
Nivel crítico ⁽²⁾	Un año civil	30 µg/m ³ de NO _x	Ninguno	En vigor desde el 11 de junio de 2008

El **umbral de alerta** para dióxido de nitrógeno se sitúa en 400 µg/m³. Se considerará superado cuando durante tres horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona, o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

Fuente: Real Decreto 102/2011

(1) Los valores límite se expresan en µg/m³, el volumen se normalizará a la temperatura de 293 K y a la presión de 101,3 kPa.

(2) Para la aplicación de este valor límite se toman en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición definidas en el apartado II.b del Anexo III del Real Decreto 102/2011.

En la siguiente tabla se recogen los límites para partículas (PM₁₀) establecidos en el Real Decreto 102/ 2011.

TABLA X. Valores límite de inmisión de partículas (PM₁₀)

	Período de promedio	Valor límite	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor límite diario	24 horas	50 µg/m ³ de PM ₁₀ que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año	50% ⁽¹⁾	En vigor desde el 1 de enero de 2005 ⁽²⁾
Valor límite anual	Un año civil	40 µg/m ³ de PM ₁₀	20% ⁽¹⁾	En vigor desde el 1 de enero de 2005 ⁽²⁾

Fuente: Real Decreto 102/2011

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

(1) Aplicable solo mientras esté en vigor la exención de cumplimiento de los valores límite concedida de acuerdo con el artículo 23 del Real Decreto 102/2011.

(2) En las zonas en las que se haya concedido exención de cumplimiento, de acuerdo con el artículo 23 del Real Decreto 102/2011, el 11 de junio de 2011.

Por otro lado, en la siguiente tabla se presentan el valor objetivo y el valor límite aplicables a las PM_{2.5} establecidos en el Real Decreto 102/ 2011.

TABLA XI. Valor objetivo y valor límite de inmisión de partículas PM_{2.5}

Parámetro	Periodo medio	Valor	Margen de tolerancia	Fecha en que debe alcanzarse el valor
Valor objetivo	Año civil	25 µg/m ³	-	En vigor desde el 1 de enero de 2010
Valor límite	Fase 1			
	Año civil	25 µg/m ³	20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes idénticos anuales hasta alcanzar un 0% el 1 de enero de 2015, estableciéndose los siguientes valores: 5 µg/m ³ en 2008; 4 µg/m ³ en 2009 y 2010; 3 µg/m ³ en 2011; 2 µg/m ³ en 2012; 1 µg/m ³ en 2013 y 2014	En vigor desde el 1 de enero de 2015
	Fase 2			
	Año civil ⁽¹⁾	20 µg/m ³	-	1 de enero de 2020

Fuente: Real Decreto 102/2011

(1) Valor límite indicativo que deberá ratificarse como valor límite en 2013 a la luz de una mayor información acerca de los efectos sobre la salud y el medio ambiente, la viabilidad técnica y la experiencia obtenida con el valor objetivo en los Estados Miembros de la Unión Europea.

En la siguiente tabla se presentan los valores límites de inmisión establecidos en el citado Real Decreto para el monóxido de carbono.

TABLA XII. Valor límite para el monóxido de carbono ⁽¹⁾

Valor límite	Periodo de promedio	Valor límite	Fecha de cumplimiento del valor límite
	Máxima diaria de las medias móviles octohorarias	10 mg/m ³	En vigor desde el 1 de enero de 2005

Fuente: Real Decreto 102/2011

(1) Los valores límite se expresan en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El volumen a la temperatura de 293 K y a la presión de 101,3 kPa.

La media octohoraria máxima de monóxido de carbono correspondiente a un día se escogerá examinando las medias móviles de ocho horas, calculadas a partir de datos horarios y actualizadas cada hora. Cada media octohoraria así calculada se atribuirá al día en que termine el período, es decir, el primer período de cálculo para cualquier día dado será el período que comience a las 17h de la víspera y termine a la 1h de ese día. El último período de cálculo para cualquier día dado el que transcurra entre las 16 y las 24h de ese día.

En cuanto a los valores límites de inmisión establecidos en el citado Real Decreto para el benceno, éstos se muestrean en la siguiente tabla.

TABLA XIII. Valor límite para el benceno ⁽¹⁾

	Período de promedio	Valor límite	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor límite anual	Un año civil	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 13 de diciembre de 2000, porcentaje que se reducirá el 1 de enero de 2006 y en lo sucesivo, cada 12 meses, en 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2010. 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.	En vigor desde el 1 de enero de 2010

Fuente: Real Decreto 102/2011

(1) Los valores límite se expresan en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El volumen a la temperatura de 293 K y a la presión de 101,3 kPa.

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

Como se ha indicado anteriormente, los motores diésel instalados a bordo de la flota mundial tienen que cumplir con las regulaciones de emisiones 73/78 ANEXO VI del Convenio MARPOL de la OMI cuyo cumplimiento se comprueba únicamente en banco de pruebas; pero esta regla no exige comprobar su cumplimiento una vez instalado el motor a bordo. Hoy en día, no existe ningún método para seguir comprobando el régimen de emisión a bordo, sólo podemos comprobar a través del histórico de mantenimiento de los motores marinos, si se ha cumplido con las horas de funcionamiento que propone el fabricante.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1.- METODOLOGÍA

La metodología a emplear será la misma que especifica el Código Técnico para la aplicación de la regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78 y que define los equipos a emplear para la toma de potencia en eje y emisiones en simultáneo, así como medidas de caudales de combustible y condiciones de presión, temperatura, caudal y humedad del aire de admisión. Evitando los aumentos bruscos de la temperatura del agua de refrigeración, que podría provocar un aumento de temperatura en las paredes de la cámara de combustión reduciendo el calor de los gases de escape liberados.

Teóricamente esto tendrá un efecto directo en la generación de NO_x , un aumento de la temperatura de combustión provocará un aumento de la generación de NO_x . De esta manera y según se contempla en el anexo 14 del documento MEPC 58/23 del Código Técnico, el requisito para el sistema de refrigeración es sólo que tiene que ser capaz de mantener el motor en las temperaturas normales de funcionamiento prescritas por el fabricante de motores.

Sin embargo, en el Código Técnico no hay instrucciones claras acerca de la instalación del motor a bordo o condiciones que han de cumplirse cuando el motor está instalado o después de que el motor ha sido instalado a bordo. Los motores diésel marinos construidos hasta el año 2000, pueden ser sometidos a modificaciones importantes para disminuir las emisiones de NO_x .

Para las medidas de presión de inyección se podría emplear la siguiente cadena de medidas:

- Un transductor de presión piezoeléctrico intrusivo PCB 108A02B.
- Un regletero SCB-68.
- Un PC portátil con la tarjeta de adquisición de datos PCMCIA 6062E.

Para la medida de presión de combustión en cámara se podría emplear una cadena de medida similar a la de presión de inyección excepto que el transductor piezoeléctrico de presión sería del tipo PCB112B10 y que debido a sus características eléctricas sería necesario emplear el amplificador de carga en línea modelo PCB422E cuya salida se

aplicaría a la entrada del amplificador PCB482A16 de cuatro canales controlado digitalmente para los sistemas transductores ICP. Además de los transductores de presión aquí mencionados se emplearía un sistema de dos transductores de proximidad con sus respectivos circuitos acondicionadores. También se emplearían termopares de tipo K para medidas de temperaturas y transmisores de presión DANFOSS para la medida de presión de sobrealimentación.

De esta manera los resultados de las pruebas estarían referidos a concentraciones de emisiones en los gases de escape (ppm), aplicando el método de balance de masas y el método del equilibrado del carbono según lo especificado en el código técnico del Anexo VI de Marpol 73/78 para lo que se necesitaría conocer la composición del combustible y el flujo másico de combustible que entra al motor así como la composición de los gases de escape (O_2 , CO_2 , CO , SO_x , NO_x , THC) al objeto de establecer las ecuaciones de equilibrio por medio de las cuales se determinarían los flujos másicos de los componentes de los gases de escape.

La ubicación de las sondas de muestreo se colocaría conforme a la Normativa vigente que establece 0,5m como mínimo, o tres veces el diámetro del colector de escape. Las medidas de potencia en ejes se realizarían mediante torsiómetro de par de galgas extensiométricas para los Motores Principales (MM.PP.). Para los Motores Auxiliares (MM.AA.) se tomarían potencias en tiempo real en cuadro eléctrico.

Las pruebas se realizaron de acuerdo con los ciclos de propulsión E2 y E3. Ciclo E2 es el ciclo de pruebas para la aplicación "velocidad constante de propulsión principal" en el que el motor funciona en revoluciones constantes y los cambios de carga se harían con hélice de paso variable o propulsión diésel eléctrico. EL ciclo E3 es el ciclo de pruebas que teniendo en cuenta la ley de la hélice aplicable, básicamente para los motores principales que se ejecutan con hélices de paso fijo.

El mismo sistema de medidas se emplearía para cumplir con ambos objetivos 1 y 2.

El objetivo 3 se cubriría una vez analizados los resultados de los objetivos 1 y 2.

La metodología empleada para el desarrollo de este estudio de tesis se basa en la metodología inicial empleada en el trabajo de tesis de la Dra. Cristina Vanesa Durán Grados.

Como norma general, cuando se realiza un test para medir mediciones contaminantes, en primer lugar, hay que realizar un balance de materia cuantificando cada uno de los componentes que han participado en el proceso de combustión. Esto lo podemos realizar directa o indirectamente siguiendo:

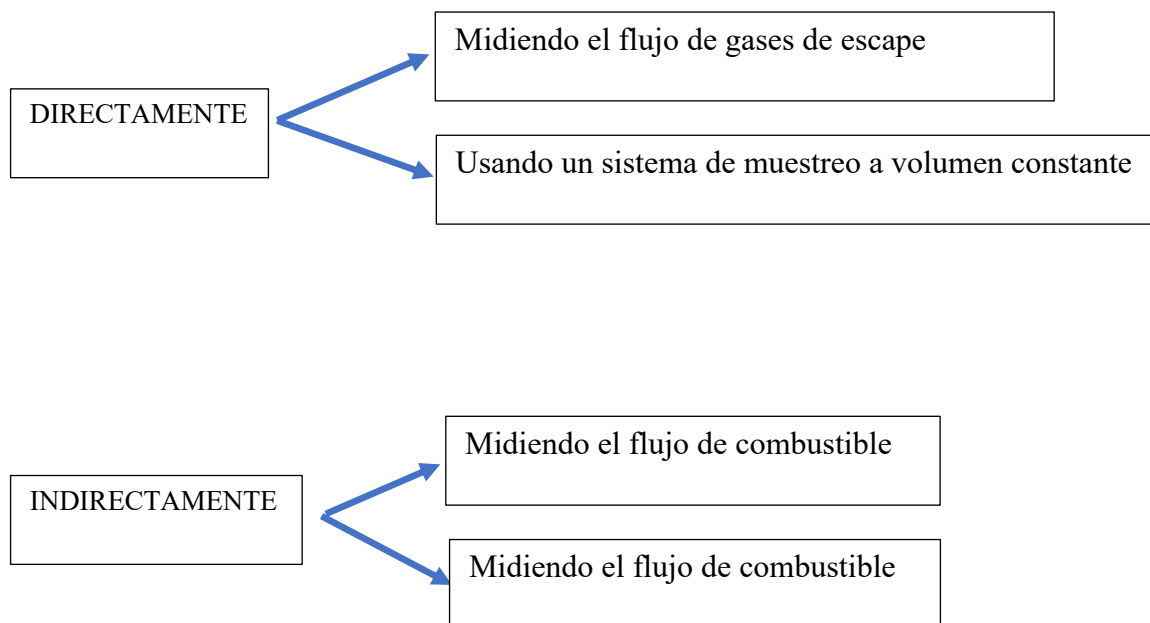


Gráfico 6. Metodología toma de emisiones

Fuente: Tesis Dra. Cristina Vanesa Durán Grados

En este estudio de tesis se ha realizado medición directa del flujo de gases de escape. Puede parecer sencillo, pero es una tarea dificultosa, ya que tenemos en cuenta las posibles desviaciones que se producen en la velocidad de los gases a través del diámetro del conducto dónde medimos y las relaciones de flujo másico con la densidad de los gases de escape, teniendo en cuenta que esta última es función de la presión y la temperatura.

De hecho, para la realización de este estudio, se han realizado medidas comparativas, siempre a la misma presión y temperatura, para que el posible error pueda ser despreciado.

Es muy importante especificar el tipo y calidad de combustible que consumen los motores marinos sometidos a las pruebas de estudio, ya que dependiendo del tipo de combustible se valorarán características como la viscosidad, densidad, poder calorífico, porcentajes de carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre, ya que estas características influyen directamente en las emisiones contaminantes de los gases de escape del motor.

Para realizar un ensayo, siguiendo la Norma ISO 8217: 2017 especifica que la selección del combustible que se utilizará para el ensayo dependerá el objetivo del ensayo en sí, y de no disponer de un combustible apropiado de referencia, se utilizará el especificado en la Norma ISO 8217: 2017. Hay que tener en cuenta que los motores marinos pueden operar con una gran variedad de combustibles, y que en muchas ocasiones no coinciden con los combustibles que se utilizaron durante los ensayos en bancos de prueba durante su certificación ISO.

También se requiere de un análisis para cuantificar los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), dióxidos y metales pesados, todos ellos considerados como microcontaminantes ^[42] porque contienen pequeñas cantidades de metales pesados y esas emisiones llegan a ser un foco de contaminación.

Cualquier modificación del combustible que se está utilizando durante la realización de la prueba, es decir, combustible de diferente concentración de azufre, o alguna técnica de pretratamiento, como por ejemplo la inyección directa homologada por los fabricantes (por ejemplo, Wärtsilä) ^[43], o modificaciones del poder calorífico o cualquier otra propiedad del mismo, deben ser anotadas.

En referencia a las mediciones realizadas en este estudio de tesis, se realizaron a motores que consumían el mismo combustible, luego nada de lo anteriormente expuesto debe considerado, con el objetivo de que no exista ningún tipo de error ni la realización de ningún tipo de ajuste.

Se utiliza el método de equilibrado del carbono de combustible y de las concentraciones en los gases de escape, en este método se mide el flujo de los gases de escape midiendo el aire y el combustible, y se desarrolla utilizando equipos de medida.

Además, hay que tener en cuenta que los estudios se han realizado en motores con sobrealimentación, dónde se produce un enfriamiento del aire de aspiración, luego por este motivo las condiciones de los gases de escape se ven afectadas, además del aumento de la masa del flujo de aire de entrada, consecuencia directa del sistema de sobrealimentación. Pero como se ha dicho anteriormente, se realiza un balance de carbono teniendo en cuenta el consumo de combustible y el flujo de gases de escape, así que muy posiblemente no afecte a los resultados de las pruebas.

En este estudio de tesis se obtienen medidas porcentuales comparativas, limitándose a la medición de los NO_x , CO , SO_2 como concentraciones en los gases de escape del motor tomados en ppm y la concentración del O_2 y CO_2 en %, evitando realizar balance alguno.

También se han tenido en cuenta la humedad relativa y la temperatura en las diferentes salas de máquinas dónde se han tomado mediciones a los diferentes motores sometidos al estudio.



Figura 3. Unidad meteorológica

Fuente: Elaboración propia

En la medición del aire, se tiene en cuenta el efecto del porcentaje de humedad en los gases de escape. El vapor de agua es uno de los productos a tener en cuenta, de la combustión y representa una cantidad significativa de flujo másico, de ahí que se especifique en los análisis si nos referimos a flujos de escape húmedos o secos. Para llegar a comparar los resultados de los análisis para distintas situaciones, tenemos que especificar las condiciones que consideramos a efectos.

Para nuestro análisis vamos a tener en cuenta múltiples parámetros del motor como la velocidad, potencia, par motor, consumo específico de combustible, presiones máximas y temperaturas de gases de escape. También se han medido presiones y temperaturas de aire de aspiración, con el fin de comprobar el estado de los filtros de la turbosoplante y su correcto funcionamiento.

El código técnico para la realización de muestreo de las emisiones contaminantes establece la distancia a la que deben colocarse las sondas de muestreo de las emisiones contaminantes, esta distancia no debe ser menor a 0,5 m, o tres veces el diámetro del colector de escape si este último valor es mayor. Este acondicionante viene influenciado para mantener la temperatura de los gases de escape, que mínimamente debe de ser de 100°C.

Si el motor estuviera dotado de algún sistema de tratamiento de gases de escape, la muestra de los mismos debemos obtenerla después de que éstos hayan pasado por dicho sistema de tratamiento. EPA no establece una distancia determinada para proceder a la muestra, pero hace hincapié en que no haya interferencia entre la temperatura de gases de escape y la temperatura del medio exterior mientras se está llevando a cabo la muestra.

Para la realización de este estudio de tesis se ha efectuado un arduo sondeo de buques que tuvieran instalados el motor diésel sometido a estudio. Las mediciones llevadas a cabo se realizaron en tres buques diferentes correspondientes a tres navieras nacionales. Una vez que se tienen registrados los motores y buques dónde se realizan la toma de muestras, se necesitó la información de horas de funcionamiento de cada motor, y la planificación de las navieras para proceder a la realización del mantenimiento programado por acumulación de horas de funcionamiento.

Dicha estipulación en tiempo ha sido complicada a la hora de establecer el ritmo de trabajo de este estudio, puesto que entraban en juego las varadas de los buques y las necesidades de operativa de los mismos.

Por otro lado, se define los equipos que se van a utilizar durante el estudio. Normalmente en relación con los equipos a emplear, el protocolo define equipos para la medida de gases de escape y partículas, normalmente basados en tecnologías de muestreo específicas para cada contaminante. Se admiten cualquier otro equipo que cumpla con las normas standard, y cumpliendo la Normativa, los equipos que se utilizan en este estudio son:

- HC- Un detector de ionización para medidas de hidrocarburos (HFID). La temperatura deberá estar comprendida entre 453-473 K para motores que utilicen combustibles sin metanol y 375-395 K para motores con combustibles que contengan metanol.
- CO, CO₂ - Detectores no dispersivos de Infrarrojos (NDIR).
- O₂ - Detector paramagnético (PMD), un sensor de dióxido de Zirconio (ZRDO), o un sensor electromecánico (ECS).
- Material Particulado (PM). Es un contaminante complejo a la hora de efectuar su medición. Normalmente se deben realizar diluciones del gas de escape con el aire atmosférico para permitir la formación de partículas y otros procesos que determinen el tamaño y las propiedades del PM como una mezcla entre el gas de escape y el gas frío atmosférico.
- NO_x – Será del tipo Detector quimioluminiscente (DQL) o detector quimioluminiscente caldeado (DQLC) con convertidor de NO₂ y NO, si la medición se realiza en seco. Cuando la medición se realice en húmedo, se utilizará un DQLC con convertidor mantenido a más de 333K (60°C), siempre que se efectúe la comprobación del efecto de mitigación del agua.

En este estudio de tesis no se cuantifica ninguna medida que defina las emisiones conforme a las exigencias de la Normativa actual (ANEXO VI MARPOL), lo que se va a tratar es de establecer una relación entre las emisiones contaminantes y las horas de funcionamiento del motor sometido a estudio.

Para las mediciones a bordo se utiliza el equipo TESTO 350 Maritime. Este equipo es un analizador de gases de escape portátil para la medición de emisiones en motores marinos, según Anexo VI de MARPOL y NO_x Technical Code 2008. Para medir el O₂, CO, SO₂ y NO_x (NO + NO₂ por separado) es sumamente preciso y estable a largo plazo. Se utiliza una celda electroquímica y para la medición de CO₂ se emplearía un detector de infrarrojos no dispersivo. Este equipo es de una precisión equivalente al CLD según la MEPC.103 (49) ^[44, 45, 46], por lo que se utiliza para las mediciones a bordo. Para la determinación del contenido de azufre en el combustible mediante la proporción de SO₂/CO₂ según MEPC 184 (59). Para la medición de las condiciones ambientales también se utilizará la sonda de humedad y temperatura del Testo 350 Maritime.

Para la medición de la potencia de salida a bordo se utilizará un medidor de potencia de galgas extensiométricas que mide la deformación producida por el par que se genera en el eje. Para la medición de potencia de los motores auxiliares se utilizarán los propios indicadores del cuadro eléctrico.

Para el análisis de los procesos de combustión se utilizaría un analizador 2600 de combustión DEWESOFT DEWE.

Para el análisis de la presión de combustión se utilizarían válvulas indicadoras mediante sensores piezoeléctricos KISTLER 6613C.

La presión de inyección también se analizaría directamente en el tubo de alta presión de inyección de combustible por medio de sensores piezoeléctricos piezotronics PCB108A2.

La medición de la temperatura se realizaría con termopares tipo K y para la presión de aire de carga del cilindro se utilizarían transductores de presión Danfoss MBS5150.

Para la medición del consumo de combustible se utilizaría un medidor de flujo ultrasónicos no intrusivo FLUXUS F601.

Antes de la utilización del equipo Testo 350 Maritime para la toma de datos, se envió a calibrar para que cumpliera con las tolerancias admisibles según las normas de calibración para medidores de gases de combustión. Dicho analizador dispone de las funciones de medida directa de temperatura hasta 2000 °F, nivel de monóxido de carbono de 0-3700 ppm sobre 32-104 °F, nivel de oxígeno de 0,2 a 23,5%, medidor de NO_x de 0-1999 ppm y medidor de nivel de SO₂ de 0-1999 ppm y un sensor de oxígeno.



Figura 4. Equipo Testo 350 Maritime durante toma de datos
Fuente: *Elaboración propia*



Figura 5. Equipo Testo 350 Maritime
Fuente: *Manual Testo 350 Maritime*

Al realizar las mediciones debemos tener presente que lo que establece la Normativa es un procedimiento de medidas de emisiones que originalmente fueron creadas para la realización en banco de pruebas y que más tarde se extendieron a mediciones efectuadas a máquinas en servicio para conseguir su certificación. Generalmente las mediciones que

se realizan en banco de pruebas son a motores de una misma familia a diferentes regímenes de carga. Con estos datos se realiza un estudio comparativo cuyo objetivo es analizar el comportamiento del motor a diferentes regímenes de carga y con distintos combustibles.

En este estudio de tesis los motores sometidos a medición son motores que están en servicio en diferentes buques, luego se ha ajustado a los criterios de la propia Normativa, considerando:

1.- Lo ideal para ajustarnos a los criterios de la propia Normativa, hubiera sido tener registros de mediciones realizadas en banco de pruebas o una certificación de emisiones, pero no existe tales registros solicitados al fabricante.

También se podría dar el caso que el motor durante las pruebas realizadas por el fabricante consumiera un combustible diferente al usado posteriormente por la naviera. En este caso, tampoco podríamos realizar la comparativa, ya que, por ejemplo, actualmente para cumplir con las restricciones medioambientales, los buques sometidos a estudio consumen un combustible de baja concentración de azufre el cual tendría que haber sido utilizado en las pruebas para la certificación del motor.

Otro detalle a tener en cuenta es que las condiciones ambientales en el entorno del banco de pruebas y las realizadas a bordo pueden variar.

2.- La medición estando el motor en servicio, siempre es necesaria para realizar una evaluación de la contaminación local. En el caso de las pruebas en banco de pruebas se tiene facilidad para establecer las diferentes situaciones en las que se procederá a medir e incluso establecer los ciclos de medición. Evidentemente a bordo, no es tan fácil, hay que establecer unos protocolos de actuación donde se establecen los ciclos para efectuar las mediciones y luego se compararán con los resultados obtenidos en el banco de pruebas.



Figura 6. Preparación del equipo para tomar mediciones en Motor B
Fuente: Elaboración propia

Para la verificación de la medición de concentraciones de NO_x a bordo, el código técnico establece tres procedimientos:

2.1.- Método de verificación de los parámetros del motor para aquellos motores que hayan recibido un certificado previo, o bien en banco de prueba o tras la finalización de un reconocimiento de certificación inicial, o incluso para aquellos motores que hayan realizado modificación en alguno de sus elementos especificados o características desde que se realizó la última prueba. El motor sometido a estudio no posee certificación de emisiones contaminantes.

2.2.- Método de verificación simplificado, el cual es el que se emplea en este estudio.

2.3.- Método directo de medición y vigilancia con equipos instalados permanentemente a bordo.

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. coincide con los términos de IMO, establece una serie de especificaciones a cumplimentar para el desarrollo de un test de emisiones de escape para un motor diésel, donde se tienen en cuenta los siguientes elementos ^[43]:

- 1.- Requisitos para documentar las condiciones ambientales.
- 2.- Modelo definitivo carga/ velocidad del motor.
- 3.- Propiedades del combustible consumido.
- 4.- Aparatos de medidas, incluyendo exactitud y velocidad de respuesta.
- 5.- Concentración de componentes gaseosos.
- 6.- Masa de partículas emitidas o densidad de los humos.
- 7.- Flujo de gases en el escape (medido directa o indirectamente).
- 8.- Calibración de gases.
- 9.- Procedimientos de cálculos.

Como bien se ha dicho, con este estudio de tesis no se quiere comprobar el cumplimiento de la Normativa en cuanto a emisiones de gases contaminantes, pero si se quiere controlar el proceso de combustión asociado con el incremento de las horas de trabajo de los motores de estudio, ya que teniendo referencias de datos de antes y después de realizar los trabajos de mantenimiento en el motor, podríamos argumentar mejoras en cuanto a tiempos de desgaste o deterioro de algunos de los elementos del motor, y no esperar al protocolo de actuación según fabricante.



Figura 7. Inyector del motor de estudio
Fuente: Elaboración propia

Quizás se podría buscar una doble utilidad a estas pruebas, y es que se podrían considerar los valores obtenidos de las mediciones y obviar los datos que el fabricante considera en bancos de prueba, que son los valores a los que hace referencia en cuanto a emisiones se refiere. Independientemente de la utilidad que se les den a los resultados de estas pruebas, es evidente que interesa a los organismos implicados para el control de las emisiones, y en este caso en particular, a los buques que nos han permitido la toma de datos. Recordando que el motor sometido a estudio no posee de histórico de datos de emisiones contaminantes en banco de pruebas.

4.2.- PLAN DE TRABAJO

En este estudio de tesis, nos hemos centrado en las mediciones de los motores realizadas a bordo. Centrándonos en las concentraciones de NO_x, CO, SO_x y PM.

Con los datos obtenidos se consigue detectar fallos en la sincronización del motor y en el sistema de inyección, además de comprobar como influye negativamente en las emisiones el tener los enfriadores de aire de admisión y filtros de aire de las turbosoplantes sucios.

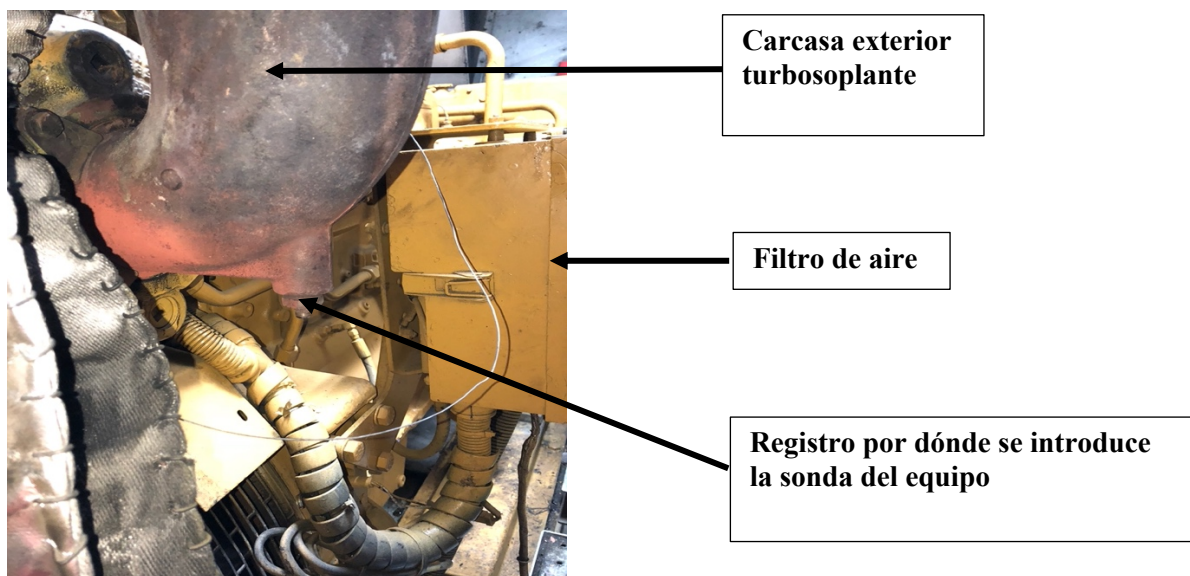


Figura 8. Carcasa exterior turbosoplante Motor A
Fuente: Elaboración propia

Los motores sometidos a estudio son motores diésel generadores, fabricante CATERPILLAR, modelo serie 3406.

Para realizar las medidas se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

1.- Se consideraron las condiciones de temperatura y humedad relativa de las salas de máquinas dónde están instalados los motores sometidos a medición.

2.- La temperatura de agua de refrigeración y la de aire de carga no sufrieron diferencias superiores a 4 K. Tampoco hubo diferencias de presiones superiores a 0,01 atm.

3.- La temperatura de agua de mar varió un máximo de 5°C en alguna medición.

4.- La temperatura de combustible a la entrada de la bomba de inyección varió tan sólo en 1-2°C en alguna medición.

5.- La potencia se tomó del cuadro de distribución eléctrica, ya que los motores sometidos a estudio son motores generadores de energía eléctrica.

6.- Se tomaron medidas porcentuales de NO_x, CO, SO_x y CO₂ en los gases de escape de cada motor a la salida de la turbosoplante.

7.- El equipo empleado fue el mencionado.

8.- Durante la toma de datos de cada motor, la velocidad de este no sufrió una desviación superior al 1,5%, el par no varió del 4% y tampoco se alteró la potencia y el consumo de combustible.

9.- Las temperaturas de agua de refrigeración, aceite lubricante, aire de aspiración y combustible, no sufrieron una variación superior a 2K. La temperatura de los gases de escape si que varió llegando a producirse diferencias de temperaturas de 30 °C.

10.- Se adaptaron los sistemas de control del motor para que las condiciones fuera lo más parecidas posibles a las condiciones que se dan en los bancos de pruebas. Por ejemplo, la estabilización de temperaturas, cada vez que se variaba la carga del motor, para tomar mediciones a los diferentes estados de carga, se esperaban varios minutos para que la temperatura se estabilizara. En los bancos de pruebas es mucho más fácil la estabilización de dichas temperaturas que las tomadas a bordo, ya que entra en función el tiempo de respuesta del motor al variar la carga, a veces involuntaria, por la entrada de algún servicio auxiliar del buque. De todas formas, se han evitado la fluctuación de carga durante la medición, ya que ha sido controlada constantemente y si en algún momento ha variado,

la medición se ha repetido. Además, las mediciones se realizaron en todos los motores cuando los buques estaban en puerto para evitar interferencias con la operatividad del buque.

Durante la muestra de datos de nuestro estudio de tesis, se tiene en cuenta el tiempo de estabilidad del motor, y además durante el proceso de muestreo se dejan fluir los gases de escape por el analizador unos 10 minutos para cada ciclo de prueba.

Si se hubieran tomados mediciones en motores principales, el problema radica principalmente en que los cambios de régimen no están reflejados en las pruebas protocolarias, puesto que hay muchos motores propulsores marinos que mientras están operando sufren cambios de carga frecuentes y rápidos. Por esta situación no se realizaron las mediciones en los buques dónde se ha realizado el estudio, ya que las tres embarcaciones son tipo ferrys de alta velocidad que, en el momento de estudio, operaban en el Estrecho de Gibraltar, con travesías cortas entre Algeciras Ceuta y Algeciras Tanger Med. En estas rutas, consideradas travesías cortas, además por las restricciones de velocidad tanto a la salida de puerto hasta alcanzar las dos millas de la abocana del puerto, y la misma reducción de velocidad cuando se va a alcanzar las dos millas de distancia a la entrada a puerto, el tiempo que trabaja el motor a pleno rendimiento es relativamente corto, unos 25- 30 minutos. Además, hay que sumarla la complejidad de medir potencia en tiempo real.

En los protocolos de EPA y OMI, normalmente especifican que los motores deben ser probados en varios ciclos y en condiciones estabilizadas, concretamente al 100% y en cuatro estados de carga diferentes que serían al 25%, 50%, 75% y 100% con un factor corrector de aumento de 0,15, 0,15, 0,5 y 0,2 respectivamente, según la ISO 1996. ^[47]

Teniendo en cuenta que los ciclos de pruebas son diferentes a los ciclos obligatorios reglamentarios, porque en ciclos de prueba se especifica claramente el tiempo que el motor debe estar a cada régimen, además del tiempo que debe transcurrir entre cada prueba a un régimen distinto, incluyendo el tiempo de estabilización. Esto sería muy difícil de conseguir al tratarse de un motor propulsor, sobre todo como se ha expuesto con

anterioridad, recordando que estos buques están en servicio operando líneas de tráfico regular y transitadas, como el Estrecho de Gibraltar.

Es el estudio realizado se han tomado un número considerado de medidas con el objetivo de compararlas antes y después de realizarles trabajos de mantenimiento programado para evaluar la influencia del estado funcional de los motores y el número de horas de funcionamiento en las concentraciones de emisiones contaminantes.

En estudios fechados en el año 2000, en motores construidos mucho antes de esta fecha, sin certificación OMI, demuestran que al menos la mitad no cumplen con las exigencias de OMI en cuanto a concentraciones de emisiones, pero en dichos estudios no se exponen ni se tienen en cuenta el estado de conservación de los elementos del motor, ni las horas de funcionamiento, ni condiciones de mantenimiento.

En este estudio de tesis, se han tomado concentraciones de NO_x , CO , SO_x y CO_2 con el fin de encontrar la relación en las reducciones de estas concentraciones con la sustitución de los elementos intervinientes en el sistema de inyección y aire de alimentación del motor por horas de funcionamiento, tomando como indicadores los resultados obtenidos de dichos contaminantes en los gases de escape.

4.3.- BUQUES SOMETIDO AL ESTUDIO

Como se ha mencionado con anterioridad, para la realización del estudio es necesario buscar varios buques con los mismos motores, para de esta forma ampliar la cantidad los datos a analizar. Al centrarnos en un motor diésel generador de fabricante Caterpillar, consultamos al fabricante el cual nos confirmó los buques que tenían instalados ese modelo de motores auxiliares. Hemos tenido la oportunidad de tras consultar con tres Navieras Españolas, poder utilizar sus motores para realizar la toma de medidas antes y después de la realización del mantenimiento programado por 15.000h de funcionamiento realizados en el overhaul.

Para la realización de las tomas de datos, hemos necesitado casi 3 años para completar todas las muestras, ya que como hemos mencionado, las tomas de muestras están vinculadas al cumplimiento de horas de funcionamiento del motor, y éstas a la vez están relacionadas directamente con la operativa de cada buque y necesidades de las Navieras. Cada buque cuenta con más MM.AA. (además de los sometidos a estudio) para repartir las horas de funcionamiento de la planta de producción de energía a bordo, luego los tiempos en el cumplimiento de horas se extienden a períodos prolongados. Que a su vez pueden estar influenciados en el retraso por la operatividad u organización interna de estos trabajos para ser realizados durante una varada, según estime conveniente cada Naviera.

A continuación, se detallan las características principales del modelo de motor auxiliar sometido a estudio:

Tabla XIV. Datos motor Caterpillar sometido a estudio

MM.AA. CATERPILLAR MOD.3406			
DATOS TÉCNICOS GRUPO ELECTRÓGENO		SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	
Marca	CATERPILLAR	Volumen de agua incluido el radiador	57,8 litros
Modelo	3406 PGCI	Volumen de agua sin radiador	21 litros
Potencia	275 kW / 220 kWe	Caudal de aire del radiador	522 m ³ /min
Tensión	400 V. Trifásico ISO 8528 PRP	Restricción de aire del ventilador	0,12 kPa
MOTOR, DATOS GENERALES		Potencia consumida por el ventilador	7 kW
Marca	CATERPILLAR	SISTEMA DE ESCAPE	
Modelo	3406C DITA	Caudal de gases de escape	48,5 m ³ /min
Tipo de combustible	Gas-oil	Temperatura gases de escape	564,7 °C
Número de cilindros	6	Contrapresión máxima de escape	6,7 kPa
Disposición	En línea	Contrapresión de diseño de escape	5 kPa
Diámetro	137 mm	Pérdida de carga en silenciosos	1 kPa
Carrera	165 mm	Diámetro interno de brida de escape	157 mm
Cilindrada	14,6 litros	SISTEMA DE LUBRICACIÓN	
Relación de compresión	14,5:1	Capacidad del cárter de aceite	38 litros
Aspiración	Turboalimentado y Postenfriado	Tipo de aceite recomendado	API CH-4 y Normativa Caterpillar ECF-1
Velocidad	1500 rpm		
Potencia al volante (sin ventilador)	246 kWm		

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

SISTEMA DE ARRANQUE		SISTEMA DE ADMISIÓN	
Tensión de baterías	24 Vcc	Volumen de aire de combustión	16,5 m ³ /min
GENERADOR, DATOS GENERALES			
Marca	CATERPILLAR	Paso de devanado	2/3
Modelo	LC5014J	Desviación de onda en tensión	< 5%
Potencia	275 kW	Rendimiento	93,1 %
Velocidad	1500 rpm	Reactancia subtransitoria directa (X"d)	7,91 %
Tensión	400 V. Trifásico	Relación de cortocircuito	0,48 KVA
Factor de potencia	0,8	CONJUNTO MOTOR ALTERNADOR. CONDICIONES DE TRABAJO	
Interruptor tetrapolar de salida	630 A		
Regulación de tensión en rég. permanente	± 0,5%	Altitud máxima sin pérdida de potencia	2500 msnm
Ajuste de tensión	± 5%	Temperatura máxima sin pérdida potencia	50°C
Aislamiento	Clase H	Consumo de combustible 100% carga	64,2 l/h
Protección	IP23	75% Carga	49,9 l/h
Número de cojinetes	1	50% Carga	36 l/h
Factor de influencia telefónica	< 50	Consumo específico de combustible	218,9 g/kWmh

Fuente: Manual MOD. 3406 Caterpillar

CAPÍTULO 5
RESULTADOS

RESULTADOS

PRIMERA PARTE DEL ESTUDIO

De los buques sometido a estudio, se esperó a que uno de sus MM.AA. estuvieran a punto de realizar el mantenimiento por overhaul, mantenimiento que se realiza a las 15.000 horas de trabajo.

En esta primera parte, con varios meses entre una toma y otra, se realizaron un total de 21 tomas de datos, de 8 horas de duración cada una, en los tres MM.AA. correspondientes al motor elegido de cada buque.

Las características de las tomas ya han sido definidas anteriormente, exponiendo con anterioridad el procedimiento que se realiza. Los resultados obtenidos se exponen a continuación:

Tabla XV. Datos tomados a bordo del Buque A Naviera A antes de realizar el mantenimiento por overhaul

BUQUE A		NAVIERA A				
Carga (%)	Emisiones NO (ppm)	Emisiones CO (ppm)	Emisiones SO ₂ (ppm)	Emisiones NO ₂ (ppm)	CO ₂ -IR (%)	Oxígeno (%)
0%	161	158	10	33	2,31	17,83
25%	719	167	20	22,3	4,40	15,18
50%	999	356	31	26,5	7,07	11,75
75%	1059	595	41	26,3	7,99	10,50

Fuente: Elaboración propia

HUMEDAD RELATIVA: 70%
 TEMPERATURA AMBIENTE: 25 °C
 HORAS DE FUNCIONAMIENTO: 13.883h

Tabla XVI. Consumo de combustible según carga del motor A

Carga (%)	Consumo (l/h)
0%	12,3
25%	20,1
50%	37,8
75%	53,7
100%	69,5

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Motor A sometido a estudio

Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Motor A vista turbosoplante y colector de gases de escape
Fuente: Elaboración propia

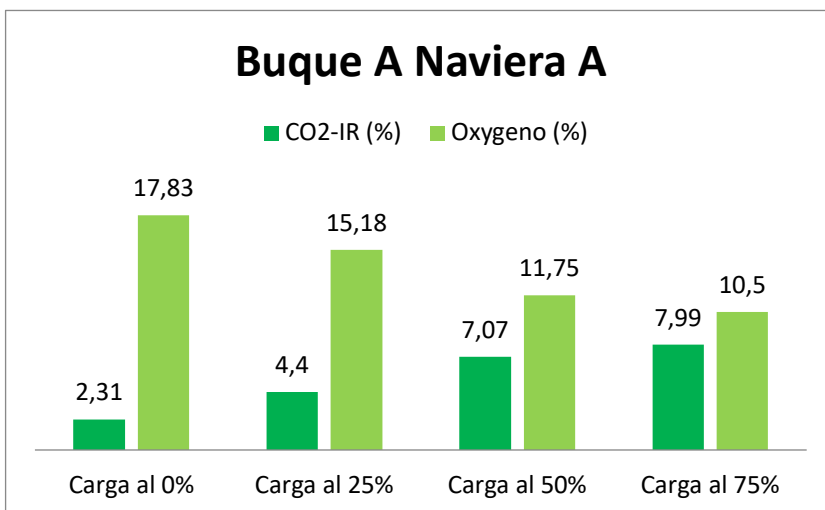


Gráfico 7. Concentraciones de CO₂ y O₂ Buque A Naviera A antes del overhaul
Fuente: Elaboración propia

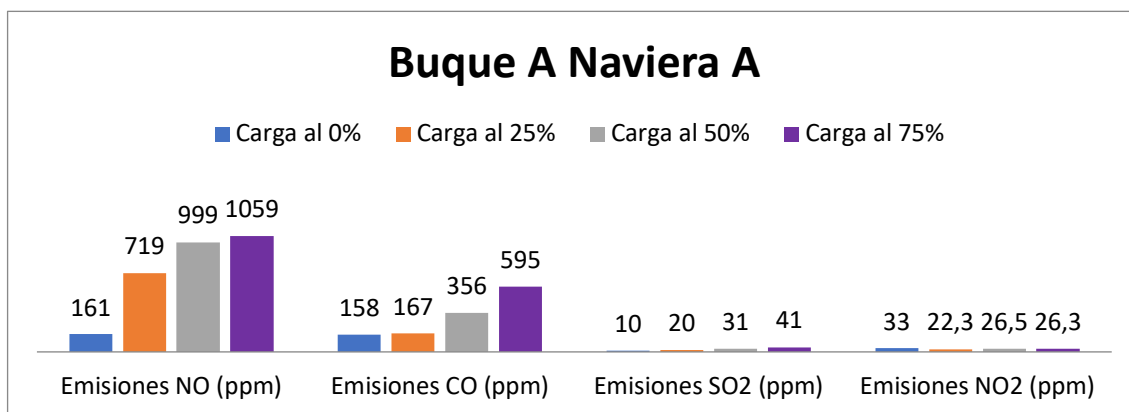


Gráfico 8. Concentraciones de NO, CO, SO₂ y NO₂ Buque A Naviera A antes del overhaul
Fuente: Elaboración propia

Tabla XVII. Datos tomados a bordo del Buque B Naviera B antes de realizar el mantenimiento por overhaul

BUQUE B		NAVIERA B				
Carga (%)	Emisiones NO (ppm)	Emisiones CO (ppm)	Emisiones SO ₂ (ppm)	Emisiones NO ₂ (ppm)	CO ₂ -IR (%)	Oxígeno (%)
0%	168	150	0	25,6	1,70	18,89
25%	760	155	4	41,1	5,49	13,75
50%	975	181	0	43,4	6,66	12,18
75%	623	137	0	21,6	4,18	15,46

Fuente: Elaboración propia

HUMEDAD RELATIVA: 27,3%
TEMPERATURA: 27 °C
HORAS DE FUNCIONAMIENTO: 14.128h

Tabla XVIII. Consumo de combustible según carga del motor B

Carga (%)	Consumo (l/h)
0%	13,4
25%	21,5
50%	38,1
75%	54,6
100%	72,2

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Motor B sometido a estudio

Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Motor B vista colector de gases de escape
Fuente: Elaboración propia

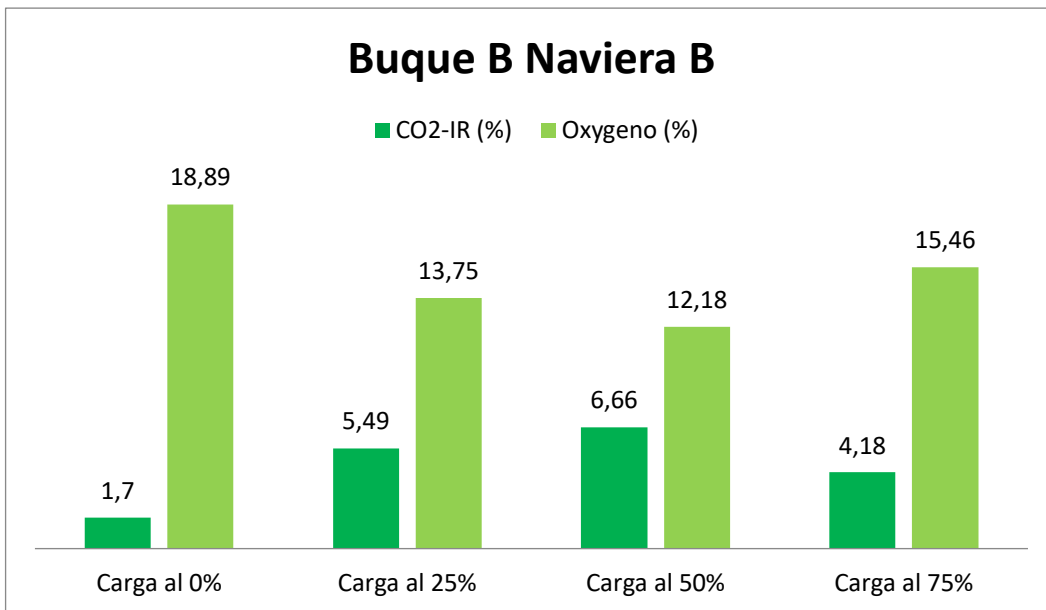


Gráfico 9. Concentraciones de CO₂ y O₂ Buque B Naviera B antes del overhaul
Fuente: Elaboración propia

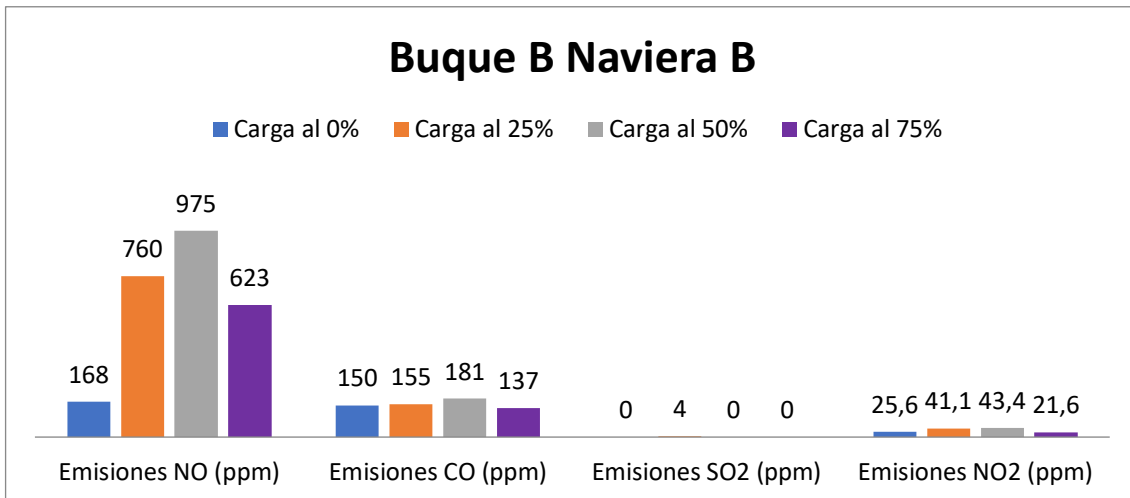


Gráfico 10. Concentraciones de NO, CO, SO₂ y NO₂ Buque B Naviera B antes del overhaul
 Fuente: *Elaboración propia*

Tabla XIX. Datos tomados a bordo del Buque C Naviera C antes de realizar el mantenimiento por overhaul

BUQUE C		NAVIERA C				
Carga (%)	Emisiones NO (ppm)	Emisiones CO (ppm)	Emisiones SO ₂ (ppm)	Emisiones NO ₂ (ppm)	CO ₂ -IR (%)	Oxígeno (%)
0%	158	147	7	33	1,97	17,77
25%	699	159	6	19,4	3,80	15,43
50%	984	282	7	22,6	7,08	12,10
75%	1007	558	5	27	7,39	10,41

Fuente: *Elaboración propia*

HUMEDAD RELATIVA: 54%

TEMPERATURA: 22°C

HORAS DE FUNCIONAMIENTO TRAS OVERHAUL: 13.904h

Tabla XX. Consumo de combustible según carga del motor

Carga (%)	Consumo (l/h)
0%	12,8
25%	20,7
50%	36,9
75%	54,1
100%	71,4

Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Motor C sometido a estudio

Fuente: Elaboración propia

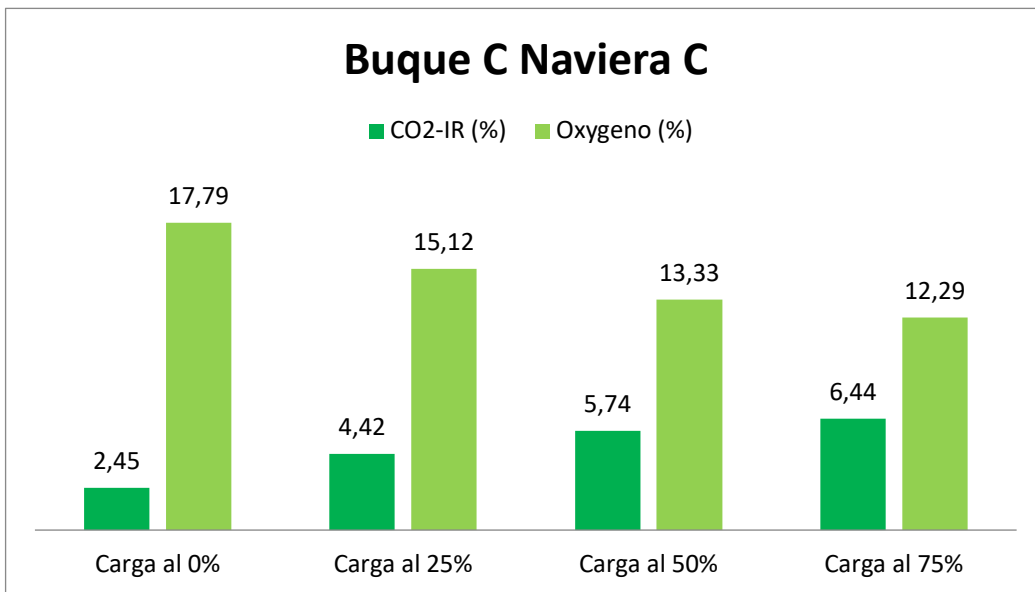


Gráfico 11. Concentraciones de CO₂ y O₂ Buque C Naviera C antes del overhaul

Fuente: Elaboración propia

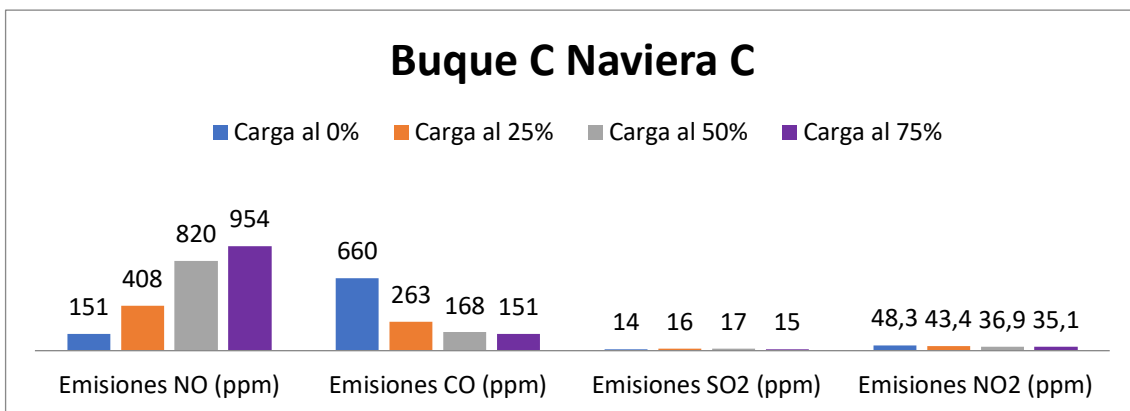


Gráfico 12. Concentraciones de NO, CO, SO₂ y NO₂ Buque C Naviera C antes del overhaul

Fuente: Elaboración propia

SEGUNDA PARTE DEL ESTUDIO

En esta segunda parte del estudio de tesis, se ha esperado que los buques realicen el mantenimiento por overhaul considerado por el fabricante a las 15.000 horas de funcionamiento. Una vez que se acabaron los trabajos por este mantenimiento y se realizó el rodaje de cada M.A. según protocolo marcado por el fabricante, se procede a tomar nuevas medidas a bordo. Destacar que las mediciones se realizan en coordinación con la naviera teniendo en cuenta la operativa del buque, ya que todos los buques donde se han realizado las mediciones estaban navegando en líneas regulares en el Estrecho de Gibraltar.

Tabla XXI. Datos tomados a bordo del Buque A Naviera A después de realizar el mantenimiento por overhaul

BUQUE A		NAVIERA A				
Carga (%)	Emisiones NO (ppm)	Emisiones CO (ppm)	Emisiones SO ₂ (ppm)	Emisiones NO ₂ (ppm)	CO ₂ -IR (%)	Oxígeno (%)
0%	158	520	12	46,3	2,36	17,86
25%	466	224	16	39,8	4,40	15,10
50%	834	163	24	37,4	5,82	13,31
75%	972	150	20	36,3	6,49	12,23

Fuente: Elaboración propia

HUMEDAD RELATIVA: 73%
TEMPERATURA AMBIENTE: 25,6 °C
HORAS DE FUNCIONAMIENTO TRAS EL OVERHAUL: 850h

Tabla XXII. Consumo de combustible según carga del motor A

Carga (%)	Consumo (l/h)
0%	11,2
25%	19,8
50%	36
75%	49,9
100%	64,2

Fuente: Elaboración propia

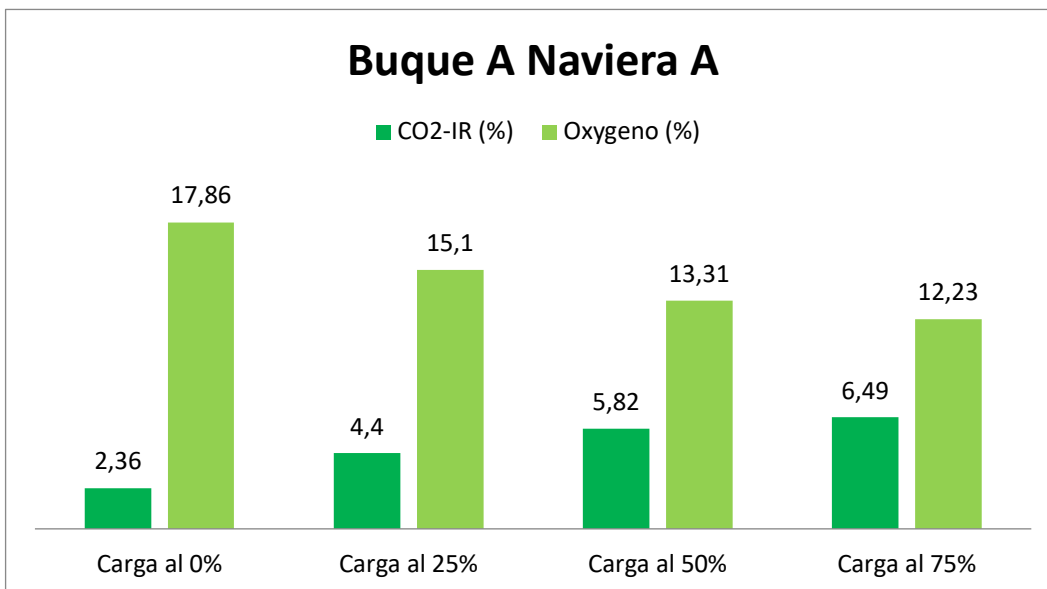


Gráfico 13. Concentraciones de CO₂ y O₂ Buque A Naviera A después del overhaul

Fuente: Elaboración propia

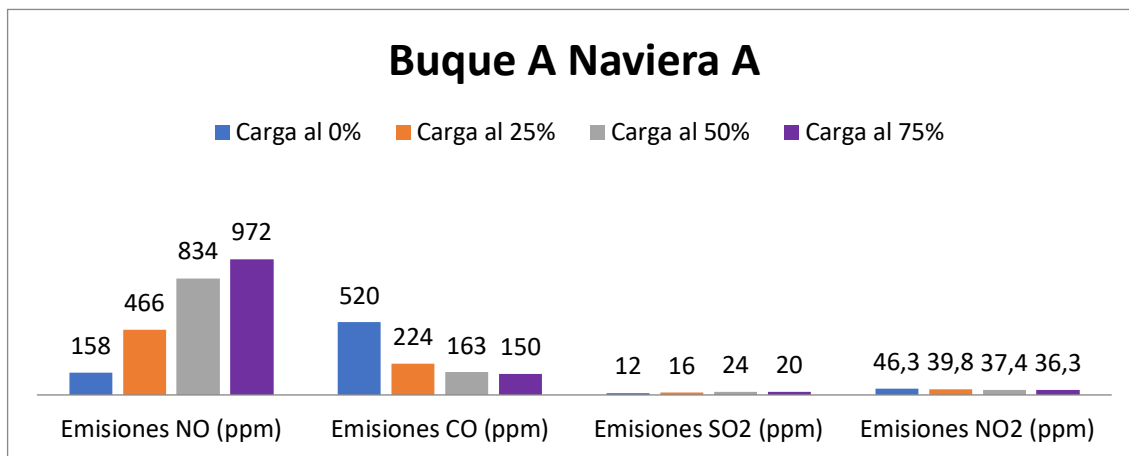


Gráfico 14. Concentraciones de NO, CO, SO₂ y NO₂ Buque A Naviera A después del overhaul
Fuente: Elaboración propia

Tabla XXIII. Datos tomados a bordo del Buque B Naviera B después de realizar el mantenimiento por overhaul

BUQUE B		NAVIERA B				
Carga (%)	Emisiones NO (ppm)	Emisiones CO (ppm)	Emisiones SO ₂ (ppm)	Emisiones NO ₂ (ppm)	CO ₂ -IR (%)	Oxígeno (%)
SIN CARGA	115	152	4	13,2	1,47	19,13
25%	528	158	9	27,6	4,61	14,95
50%	841	164	8	19,7	6,07	12,84
75%	632	127	0	20,2	4,65	14,70

Fuente: Elaboración propia

HUMEDAD RELATIVA: 27,4%

TEMPERATURA: 31 °C

HORAS DE FUNCIONAMIENTO TRAS OVERHAUL: 1.341h

Tabla XXIV. Consumo de combustible según carga del motor B

Carga (%)	Consumo (l/h)
0%	12,1
25%	20,3
50%	37,2
75%	50,9
100%	68,9

Fuente: *Elaboración propia*

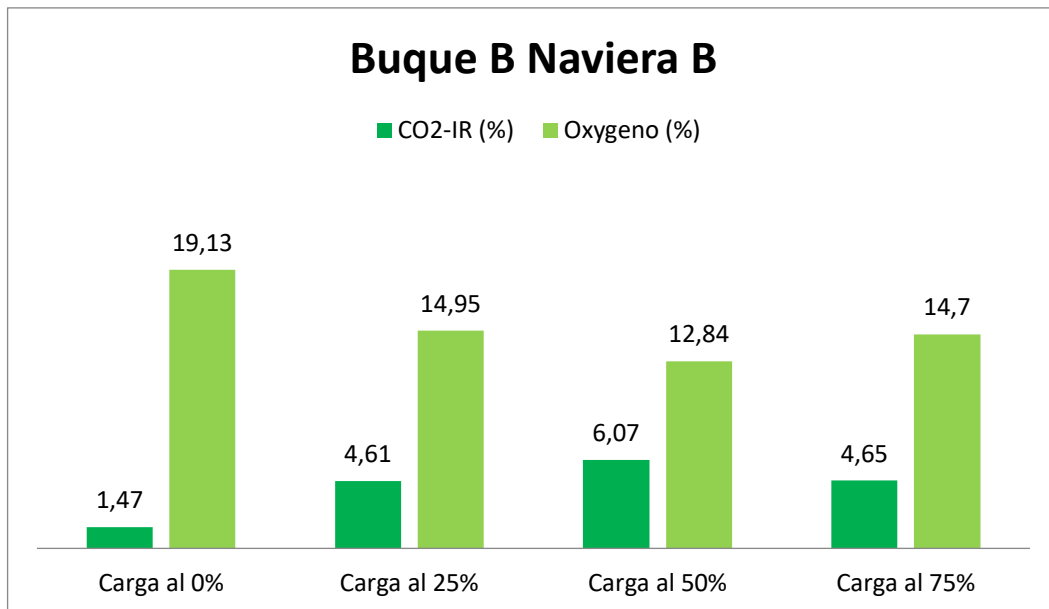


Gráfico 15. Concentraciones de CO₂ y O₂ Buque B Naviera B después del overhaul

Fuente: *Elaboración propia*

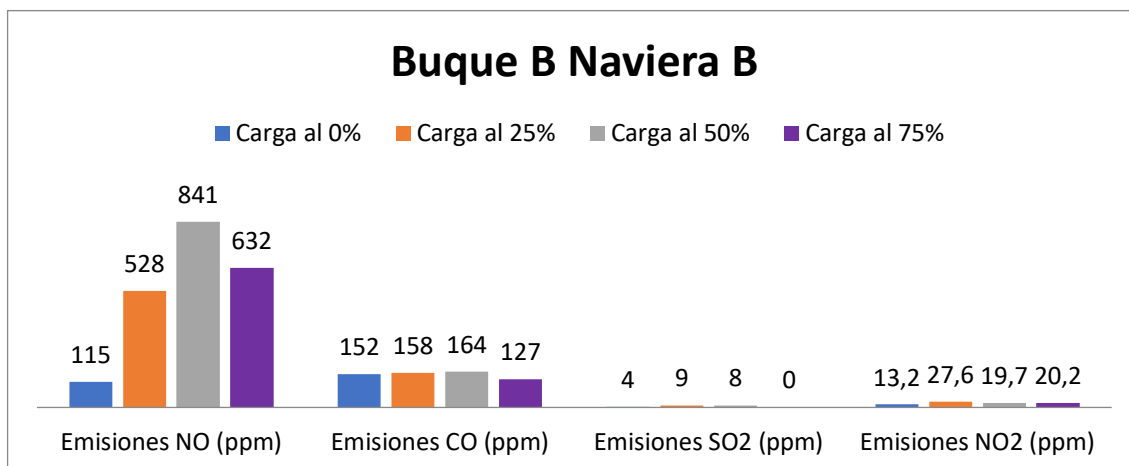


Gráfico 16. Concentraciones de NO, CO, SO₂ y NO₂ Buque B Naviera B después del overhaul
Fuente: Elaboración propia

Tabla XXV. Datos tomados a bordo del Buque C Naviera C después de realizar el mantenimiento por overhaul

BUQUE C		NAVIERA C				
Carga (%)	Emisiones NO (ppm)	Emisiones CO (ppm)	Emisiones SO ₂ (ppm)	Emisiones NO ₂ (ppm)	CO ₂ -IR (%)	Oxígeno (%)
SIN CARGA	151	660	14	48,3	2,45	17,79
25%	408	263	16	43,4	4,42	15,12
50%	820	168	17	36,9	5,74	13,33
75%	954	151	15	35,1	6,44	12,29

Fuente: Elaboración propia

HUMEDAD RELATIVA: 50%

TEMPERATURA: 20,9 °C

HORAS DE FUNCIONAMIENTO TRAS OVERHAUL: 10h

Tabla XXVI. Consumo de combustible según carga del motor C

Carga (%)	Consumo (l/h)
0%	10,8
25%	19,4
50%	35,8
75%	52,3
100%	68,8

Fuente: *Elaboración propia*

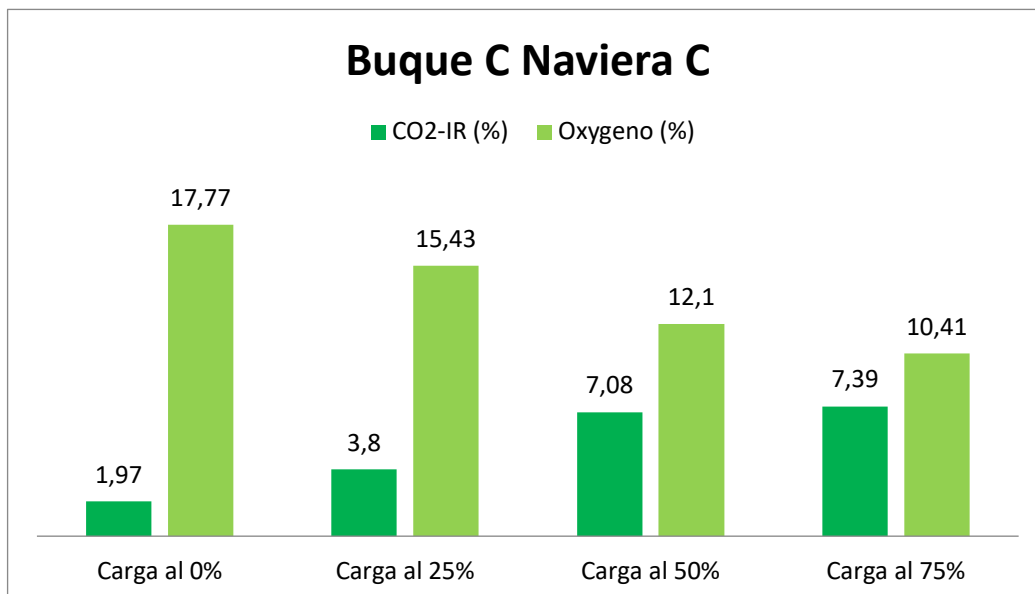


Gráfico 17. Concentraciones de CO₂ y O₂ Buque C Naviera C después del overhaul

Fuente: *Elaboración propia*

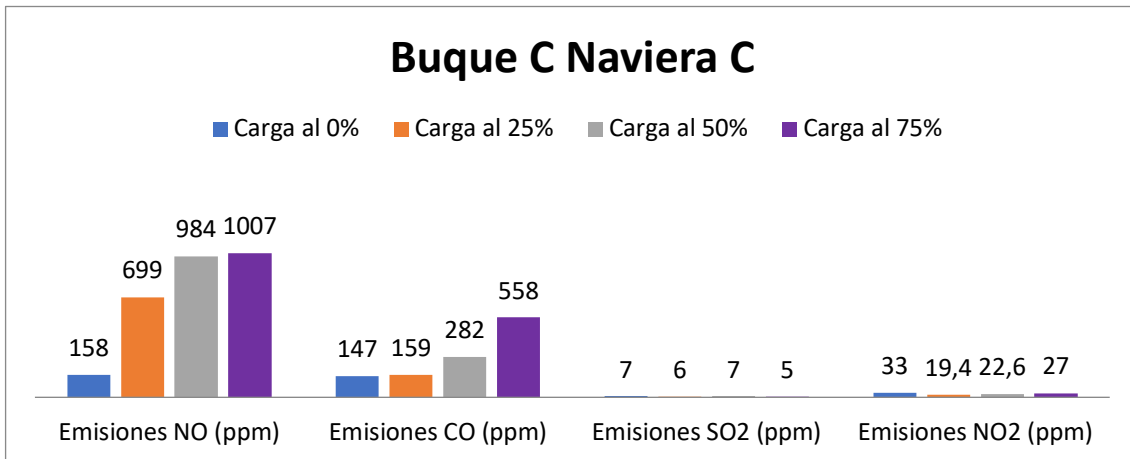


Gráfico 18. Concentraciones de NO, CO, SO₂ y NO₂ Buque C Naviera C después del overhaul
Fuente: Elaboración propia

COMPARATIVA DE EMISORES PARA CADA BUQUE

Una vez realizadas las mediciones antes y después de la realización del mantenimiento por overhaul, se comparan las medidas obtenidas para cada motor y buque. Luego se procede a analizar las causas posibles en relación con las diferencias existentes.

BUQUE A

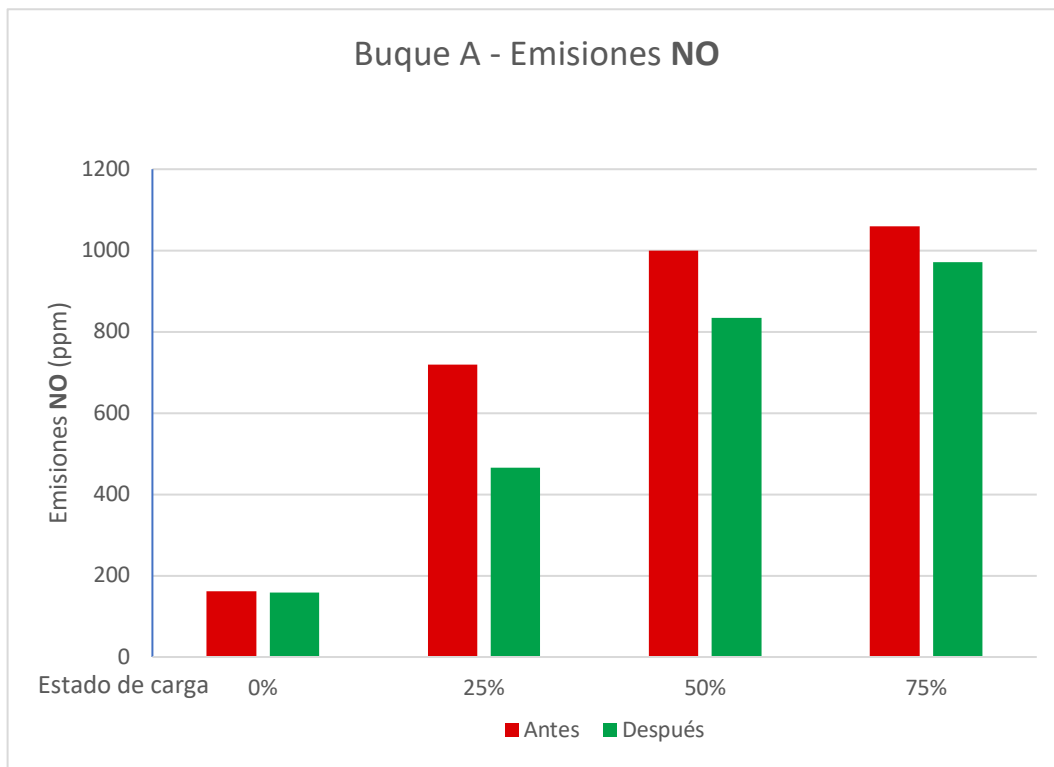


Gráfico 19. Comparativa de concentración de NO antes y después del overhaul Buque A
Fuente: Elaboración propia

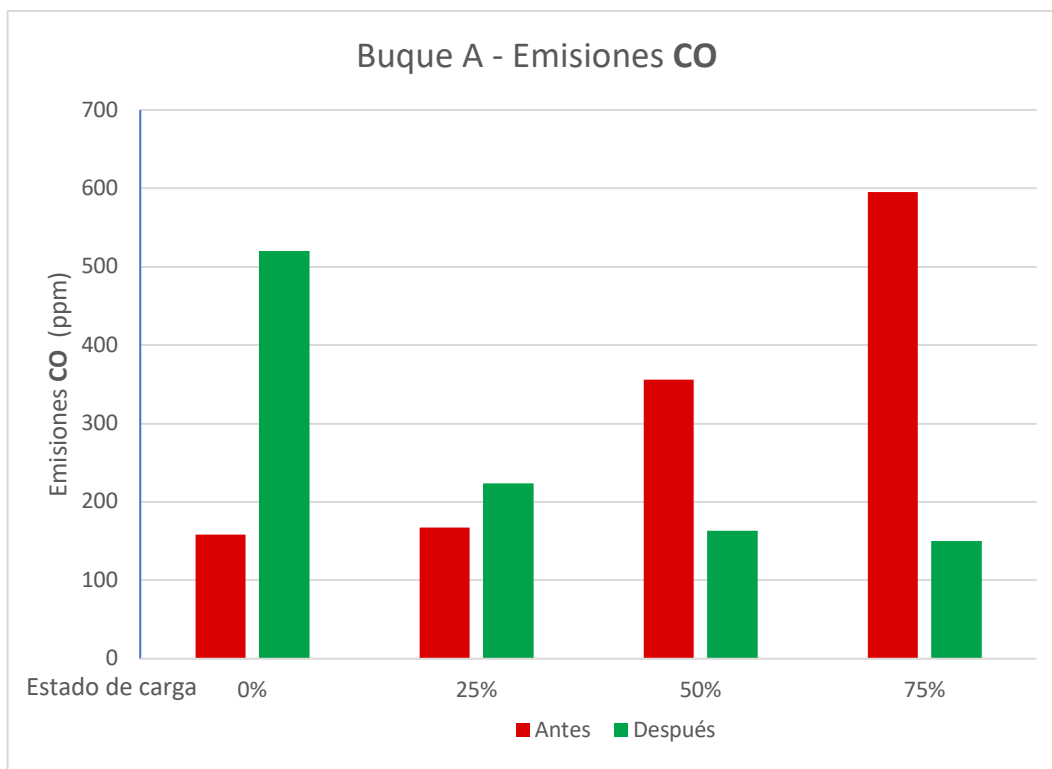


Gráfico 20. Comparativa de concentración de CO antes y después del overhaul Buque A
Fuente: Elaboración propia

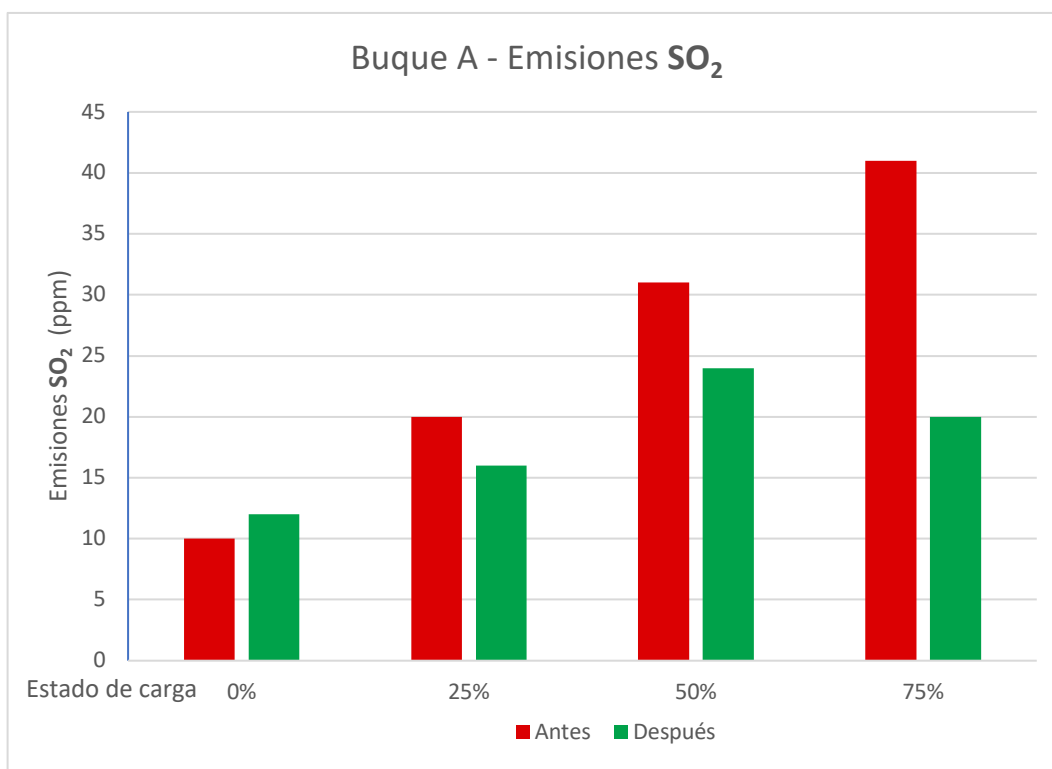


Gráfico 21. Comparativa de concentración de SO₂ antes y después del overhaul Buque A
Fuente: Elaboración propia

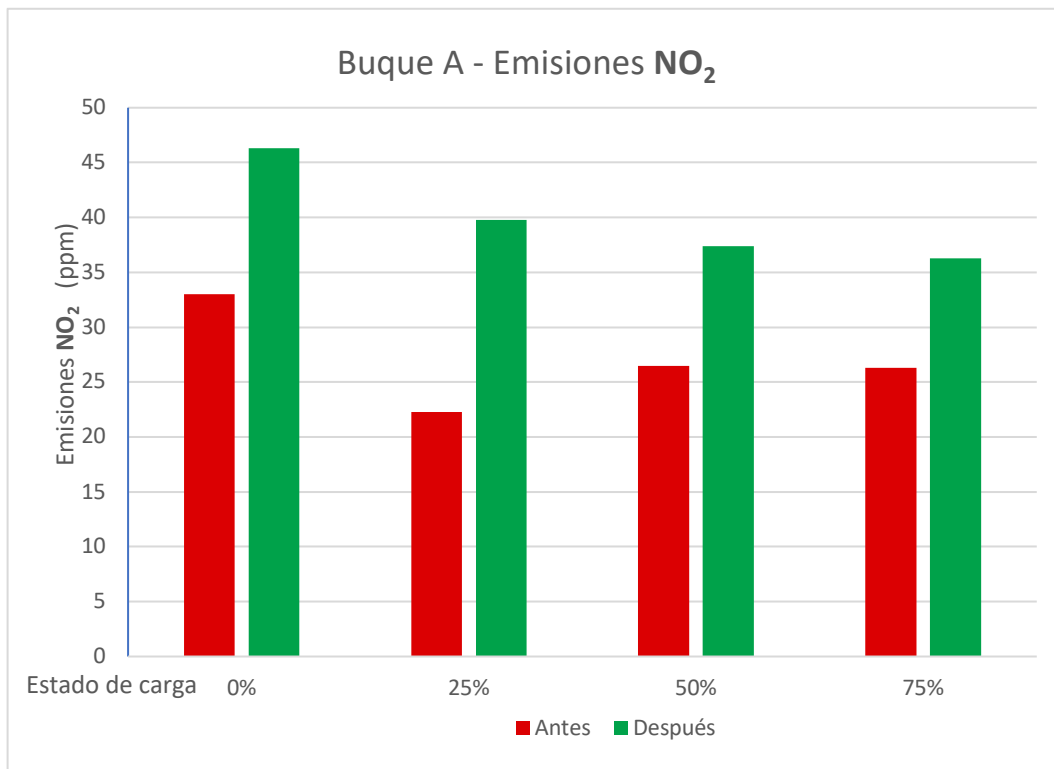


Gráfico 22. Comparativa de concentración de NO₂ antes y después del overhaul Buque A
Fuente: Elaboración propia

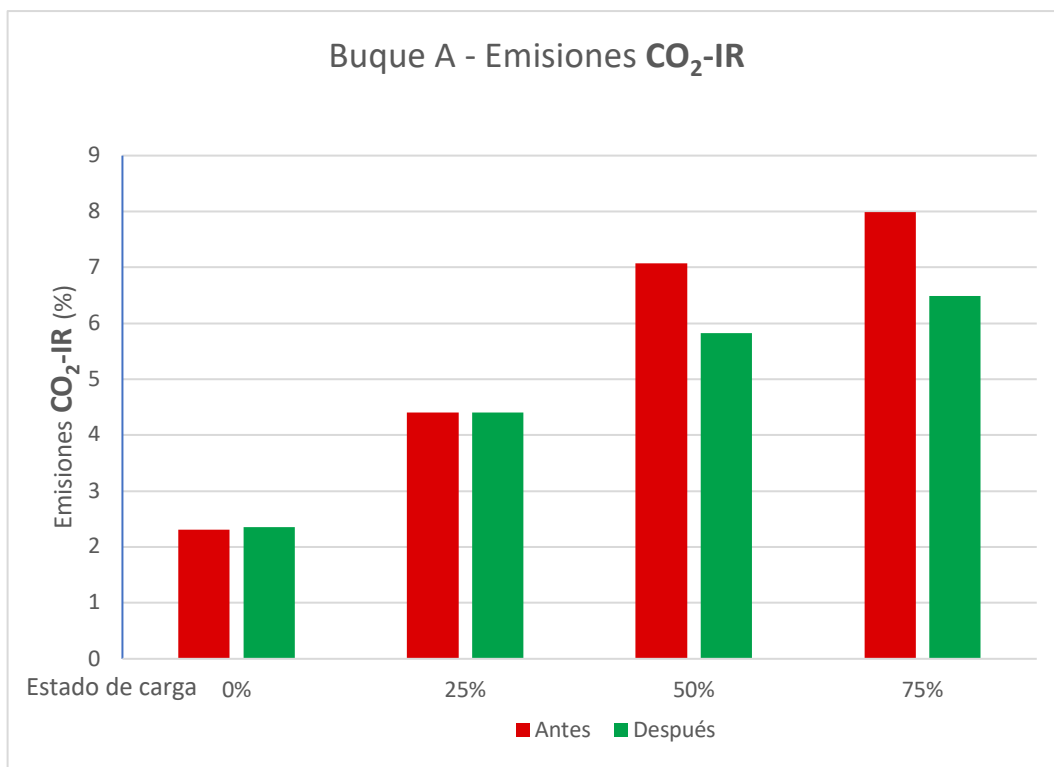


Gráfico 23. Comparativa de concentración de CO₂ antes y después del overhaul Buque A
Fuente: Elaboración propia

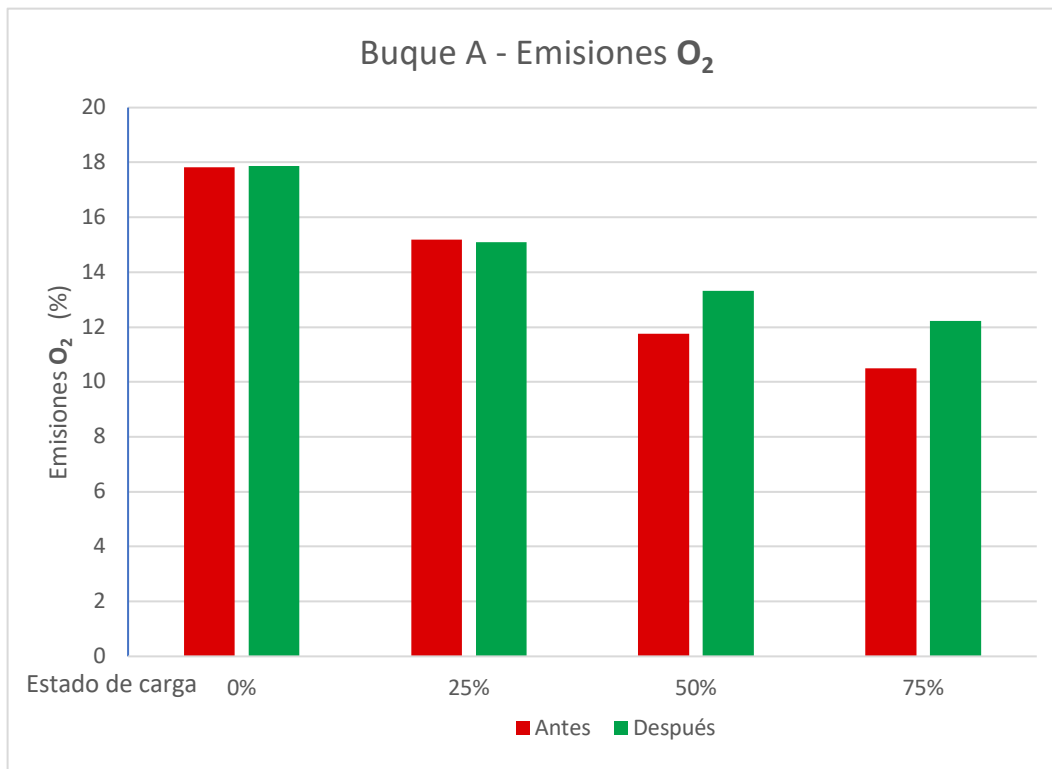


Gráfico 24. Comparativa de concentración de O₂ antes y después del overhaul Buque A
Fuente: Elaboración propia

BUQUE B

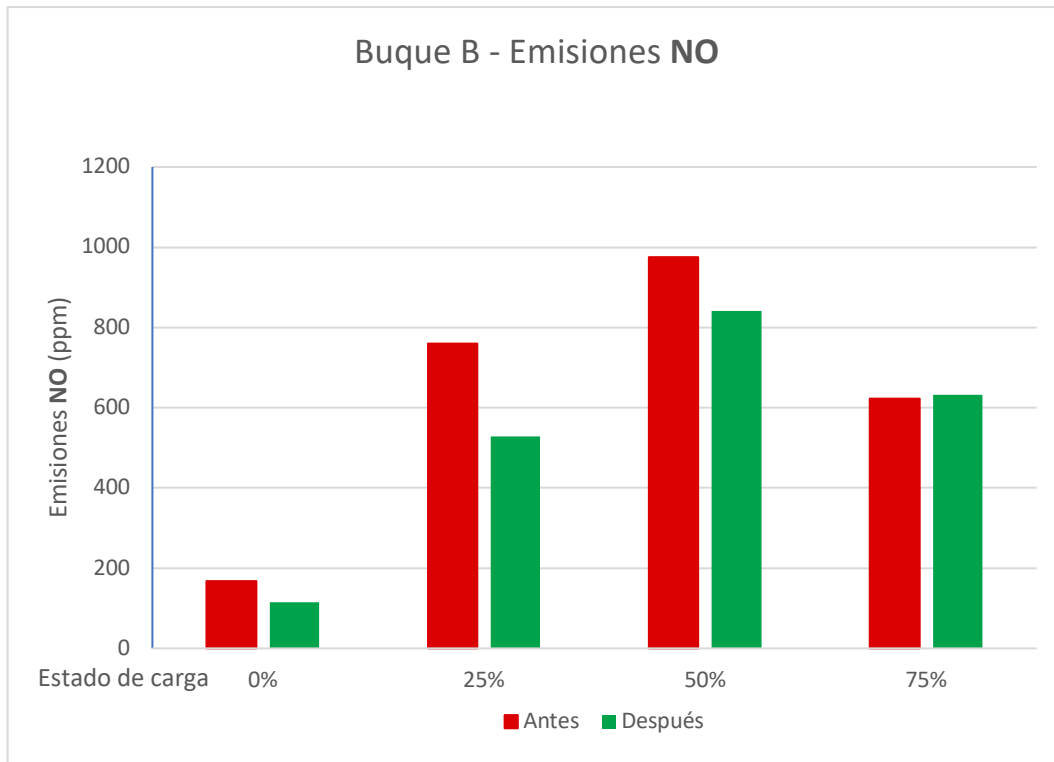


Gráfico 25. Comparativa de concentración de NO antes y después del overhaul Buque B
Fuente: Elaboración propia

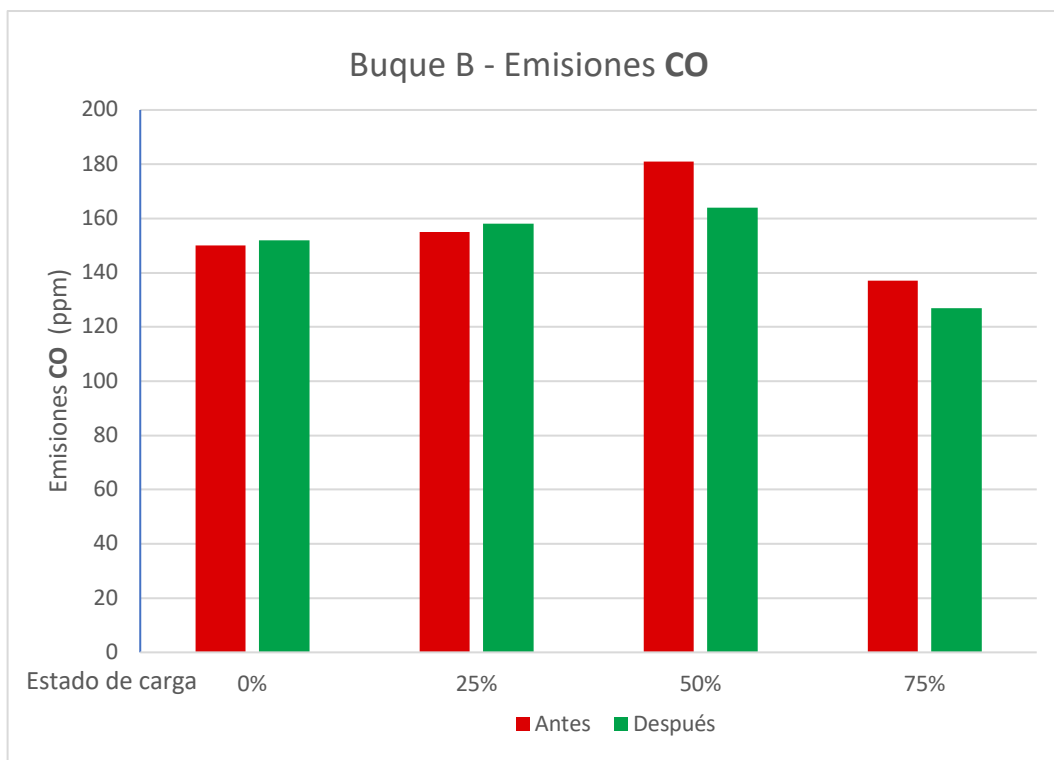


Gráfico 26. Comparativa de concentración de CO antes y después del overhaul Buque B
Fuente: Elaboración propia

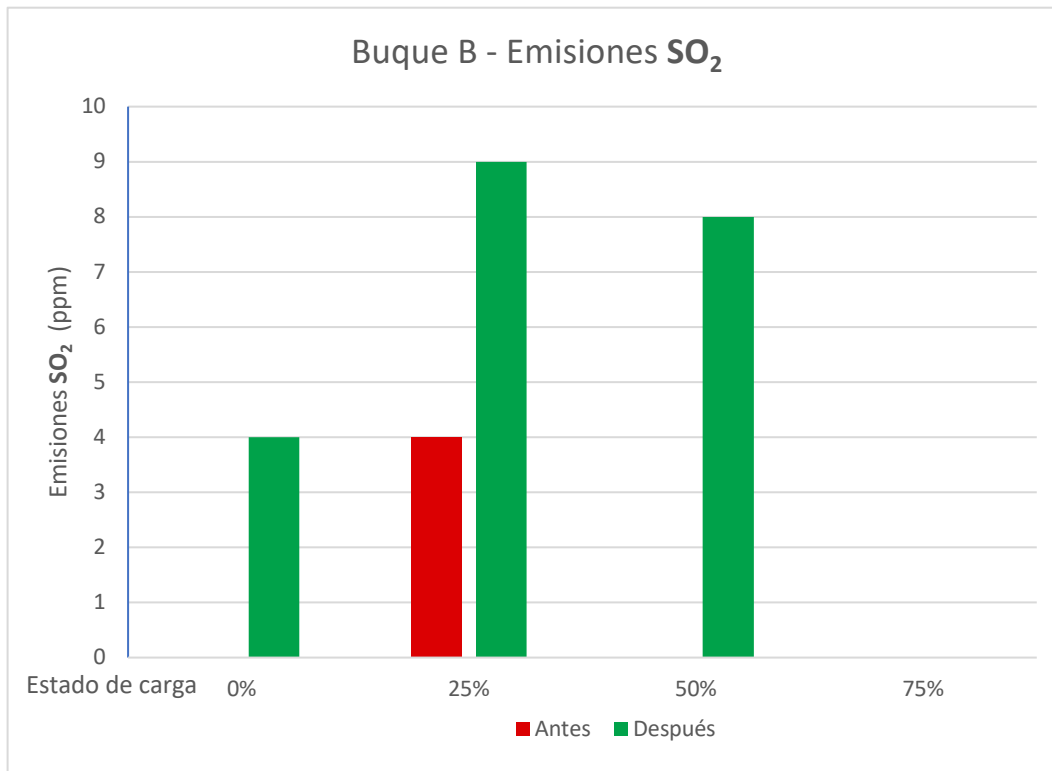


Gráfico 27. Comparativa de concentración de SO₂ antes y después del overhaul Buque B
Fuente: Elaboración propia

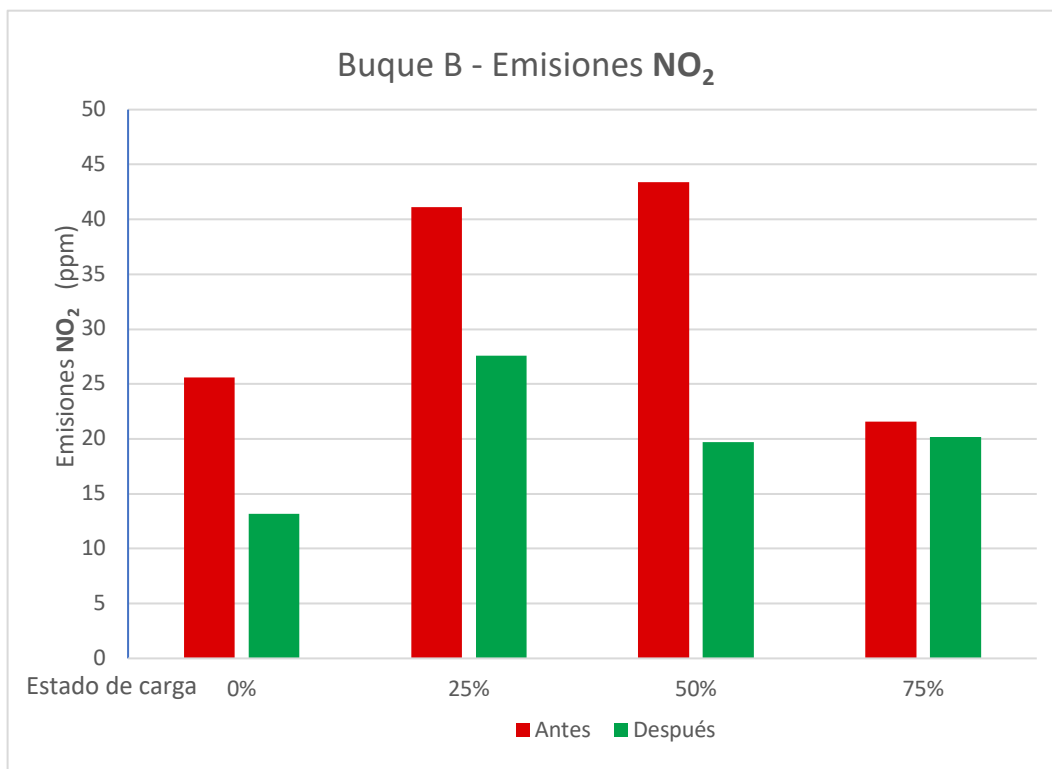


Gráfico 28. Comparativa de concentración de NO₂ antes y después del overhaul Buque B
Fuente: Elaboración propia

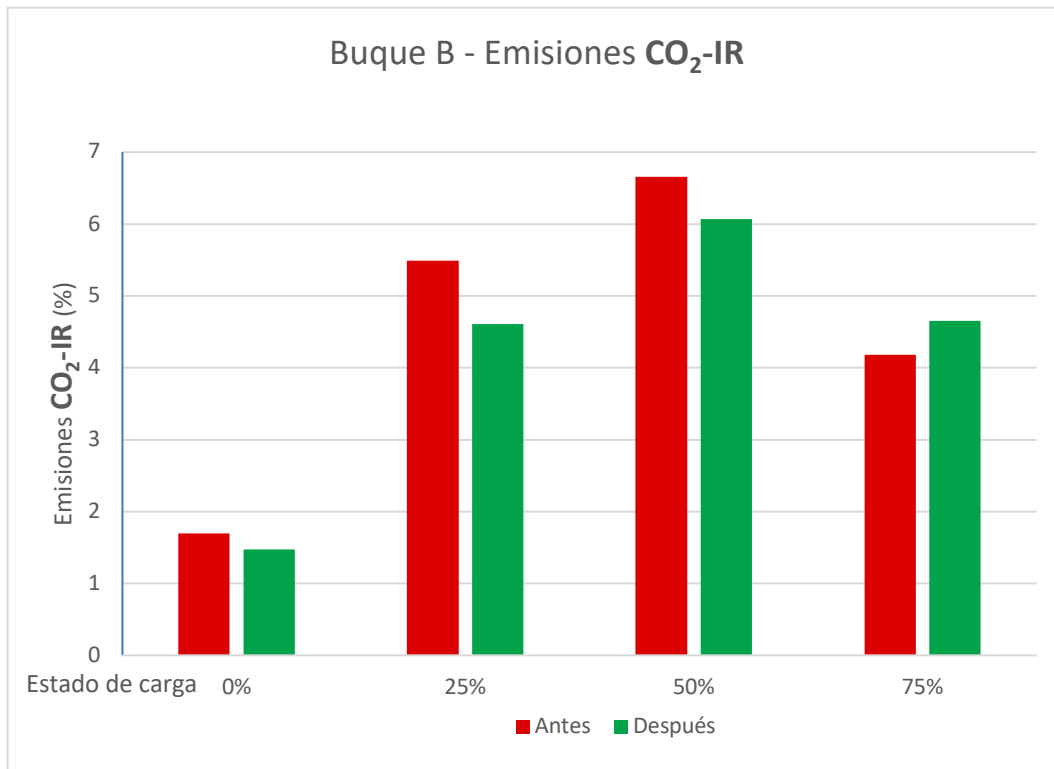


Gráfico 29. Comparativa de concentración de CO₂ antes y después del overhaul Buque B
Fuente: Elaboración propia

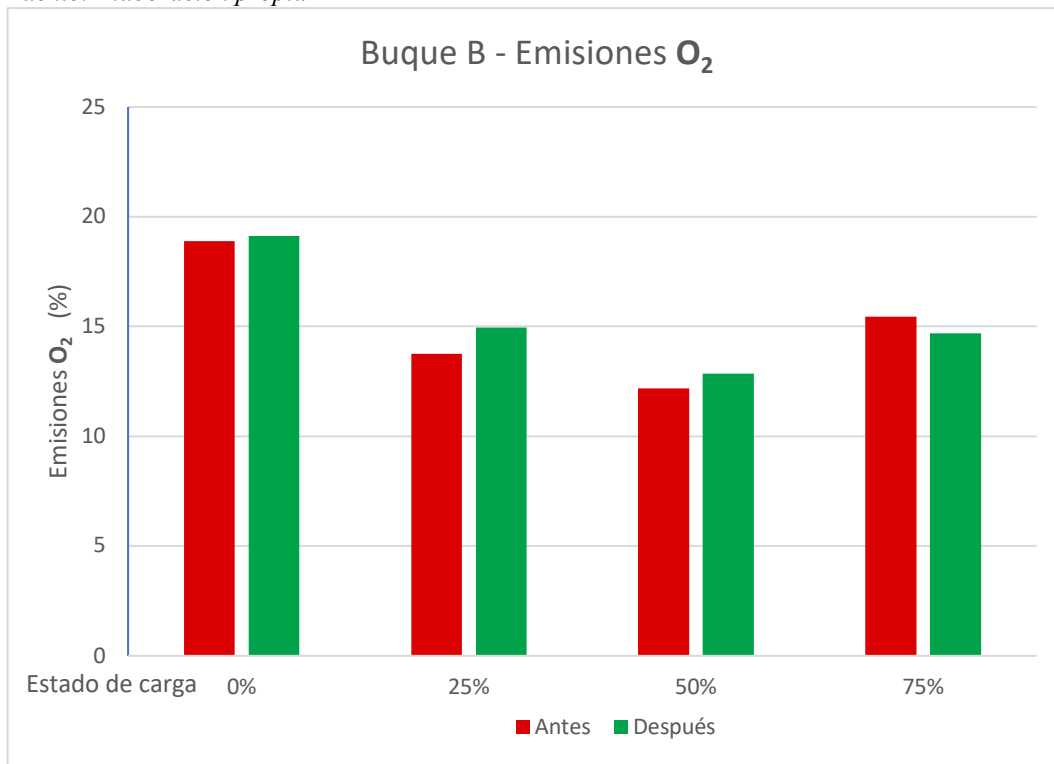


Gráfico 30. Comparativa de concentración de O₂ antes y después del overhaul Buque B
Fuente: Elaboración propia

BUQUE C

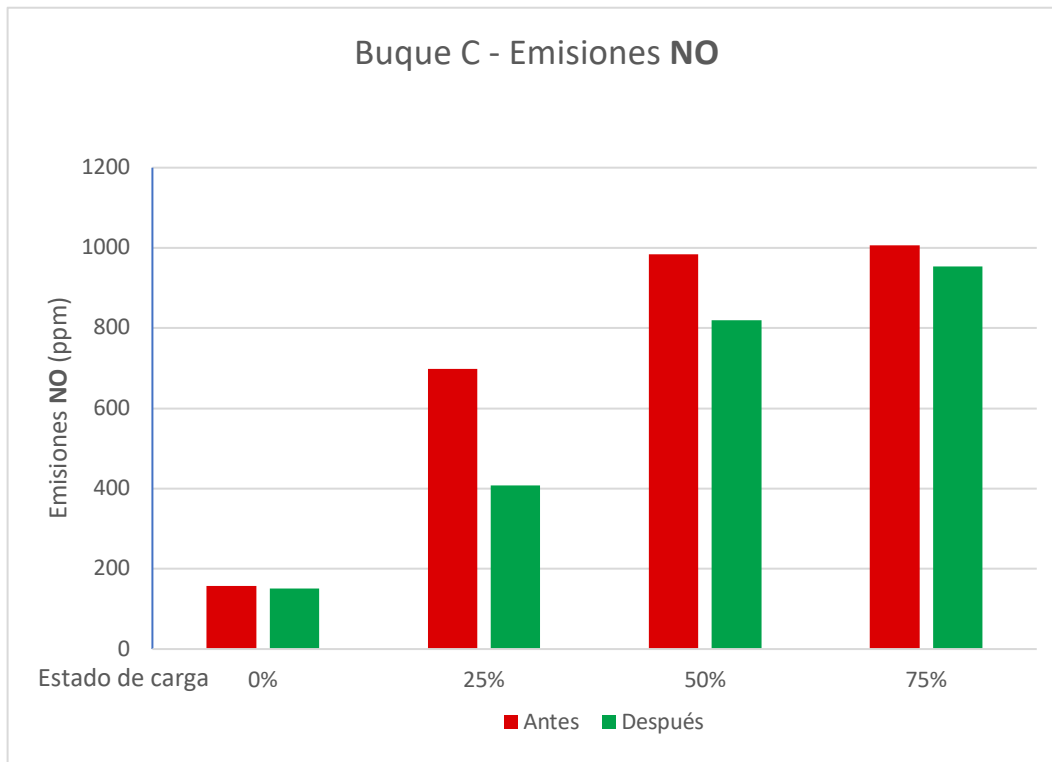


Gráfico 31. Comparativa de concentración de NO antes y después del overhaul Buque C
Fuente: Elaboración propia

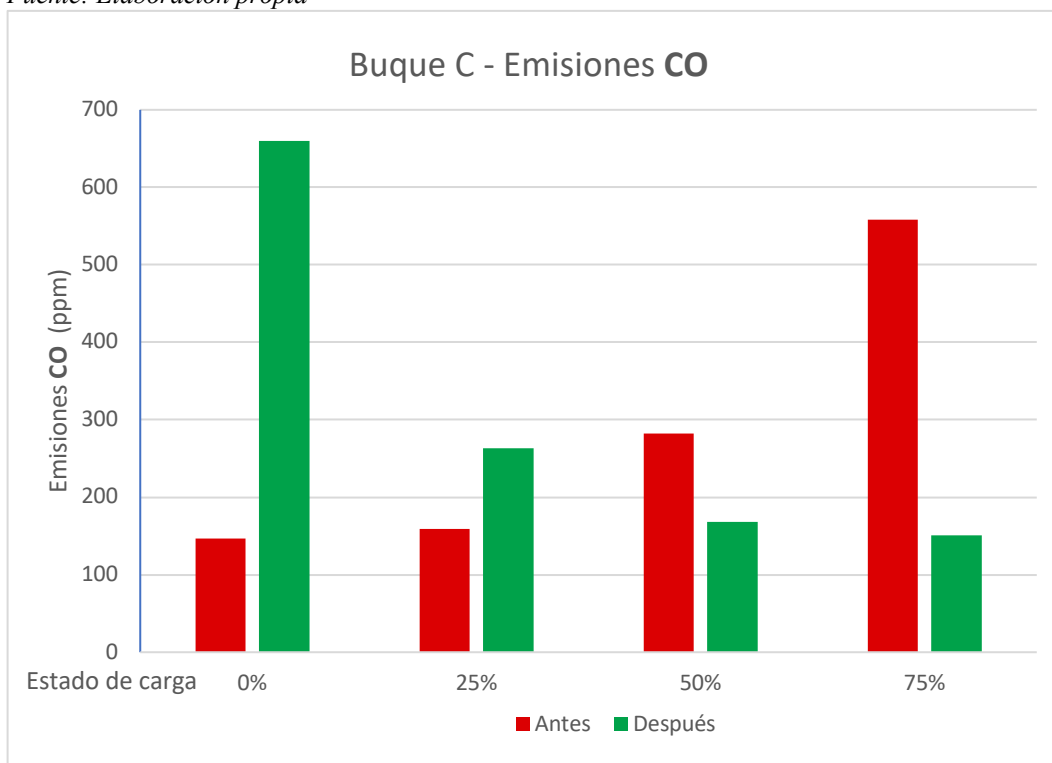


Gráfico 32. Comparativa de concentración de CO antes y después del overhaul Buque C
Fuente: Elaboración propia

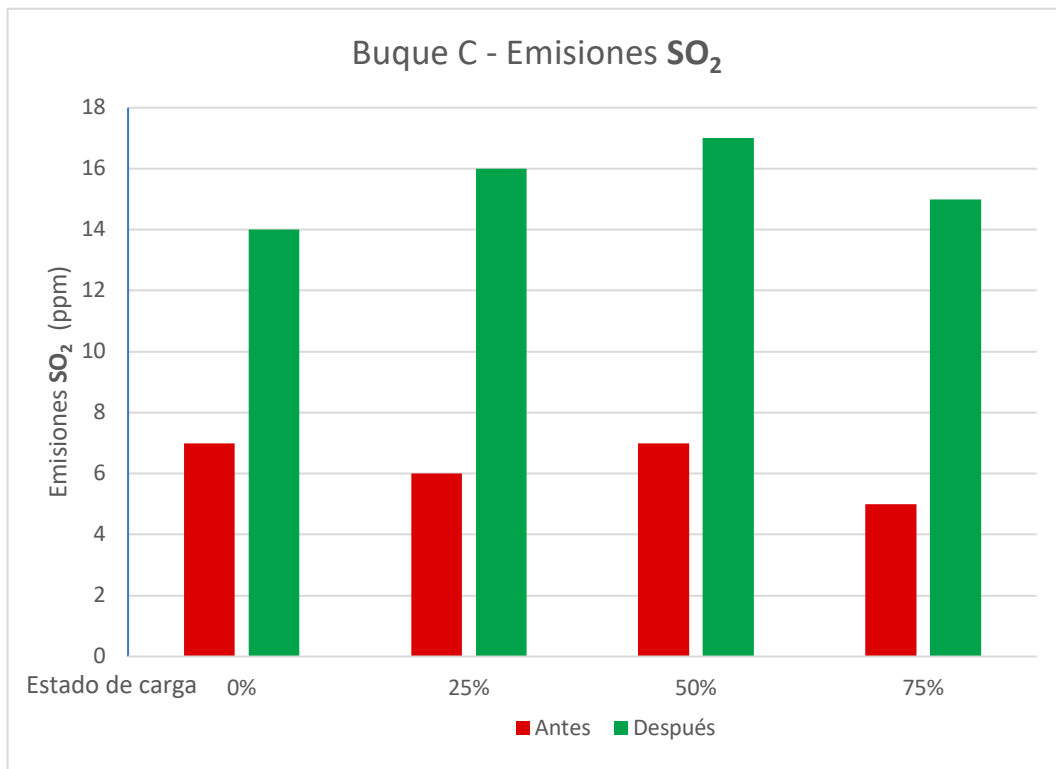


Gráfico 33. Comparativa de concentración de SO₂ antes y después del overhaul Buque C
Fuente: Elaboración propia

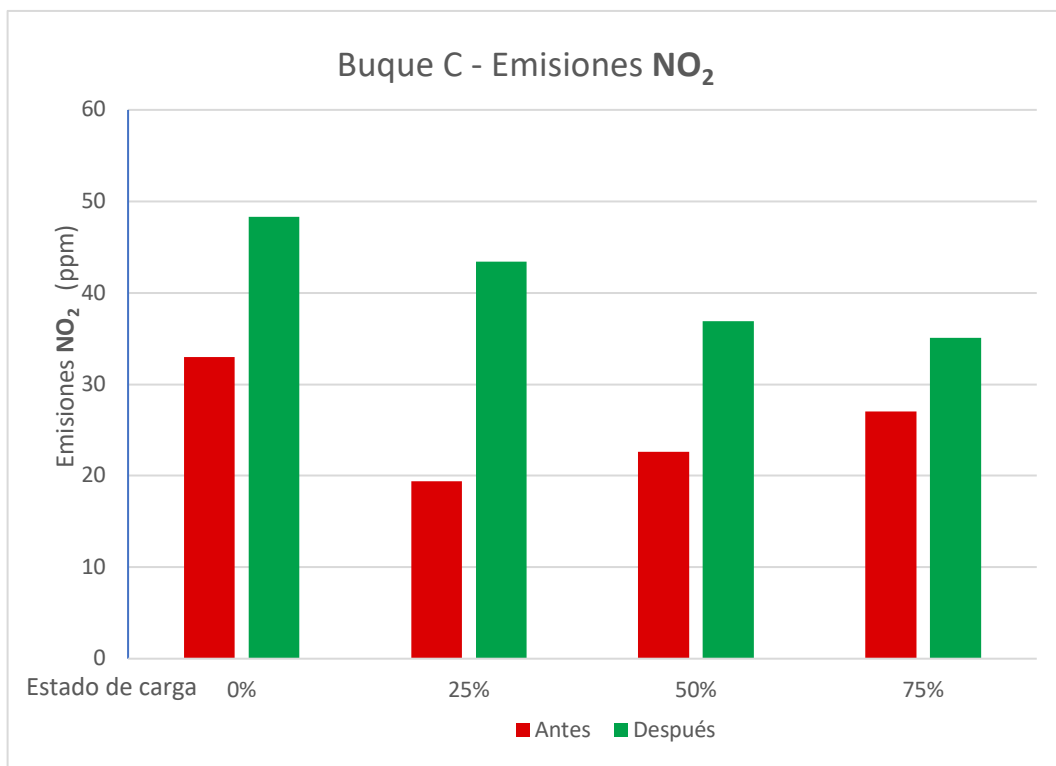


Gráfico 34. Comparativa de concentración de NO₂ antes y después del overhaul Buque C
Fuente: Elaboración propia

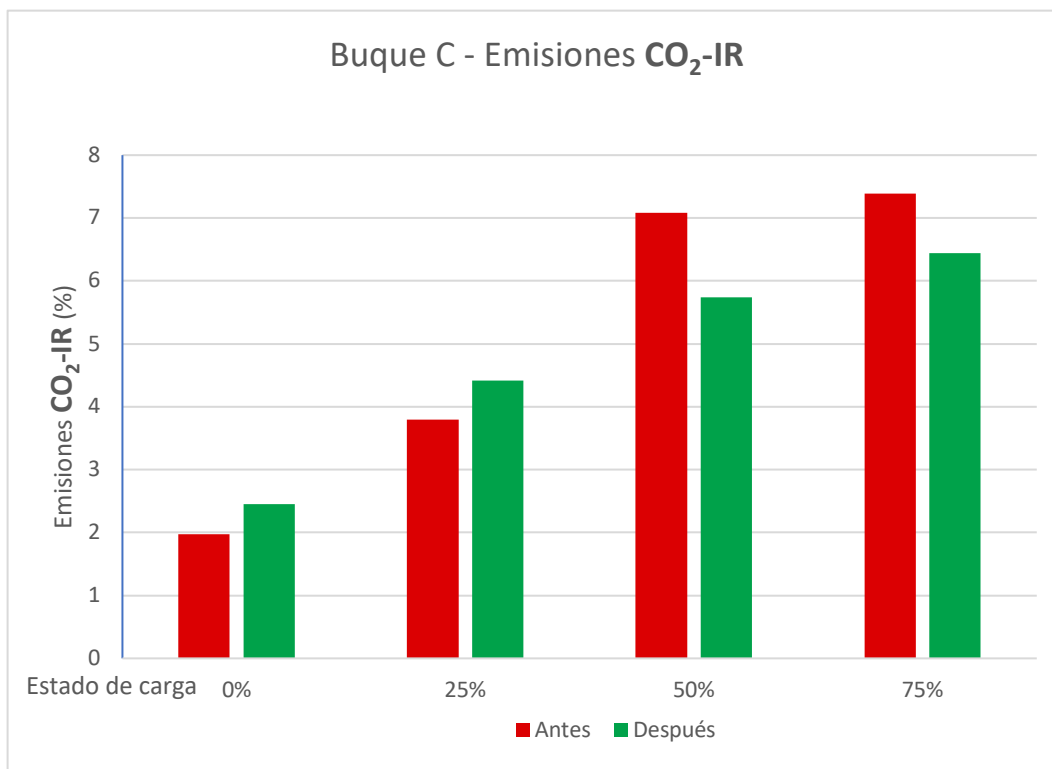


Gráfico 35. Comparativa de concentración de CO₂ antes y después del overhaul Buque C
Fuente: Elaboración propia

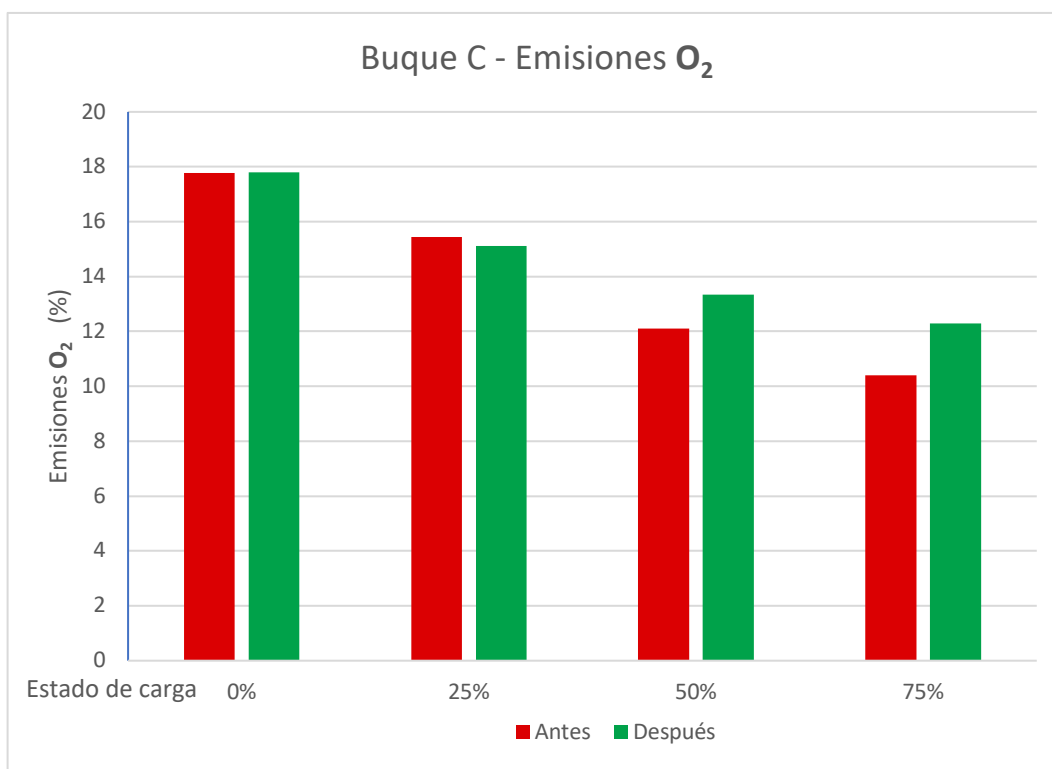


Gráfico 36. Comparativa de concentración de O₂ antes y después del overhaul Buque C
Fuente: Elaboración propia

COMPARATIVA DE EMISORES ENTRE BUQUES

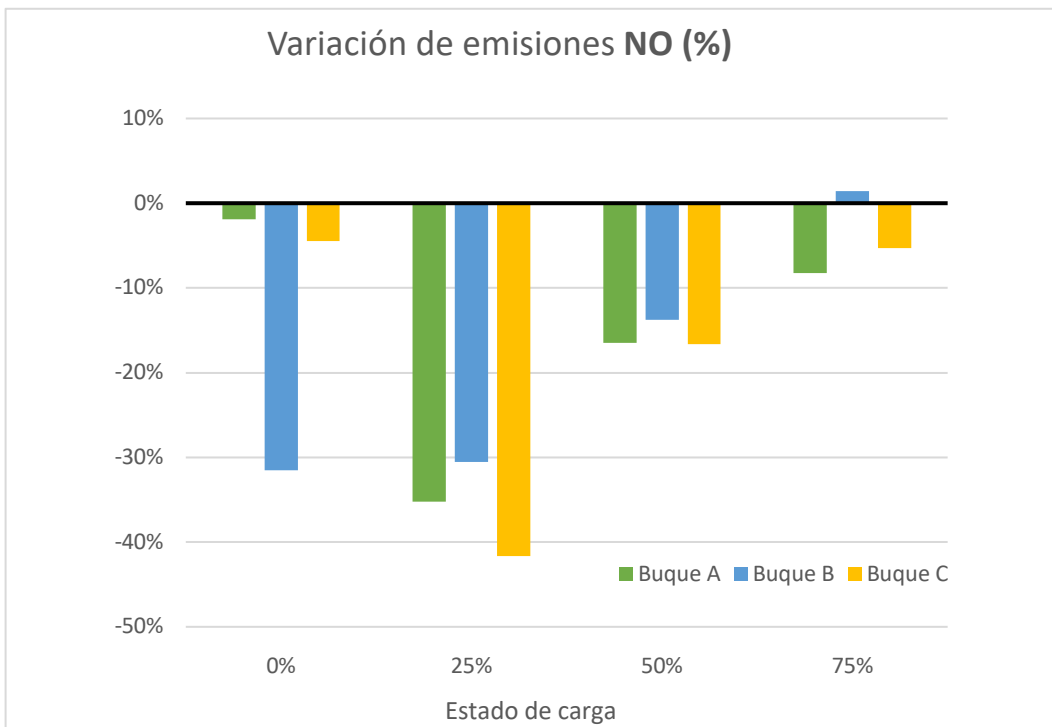


Gráfico 37. Emisiones de NO para cada buque

Fuente: Elaboración propia

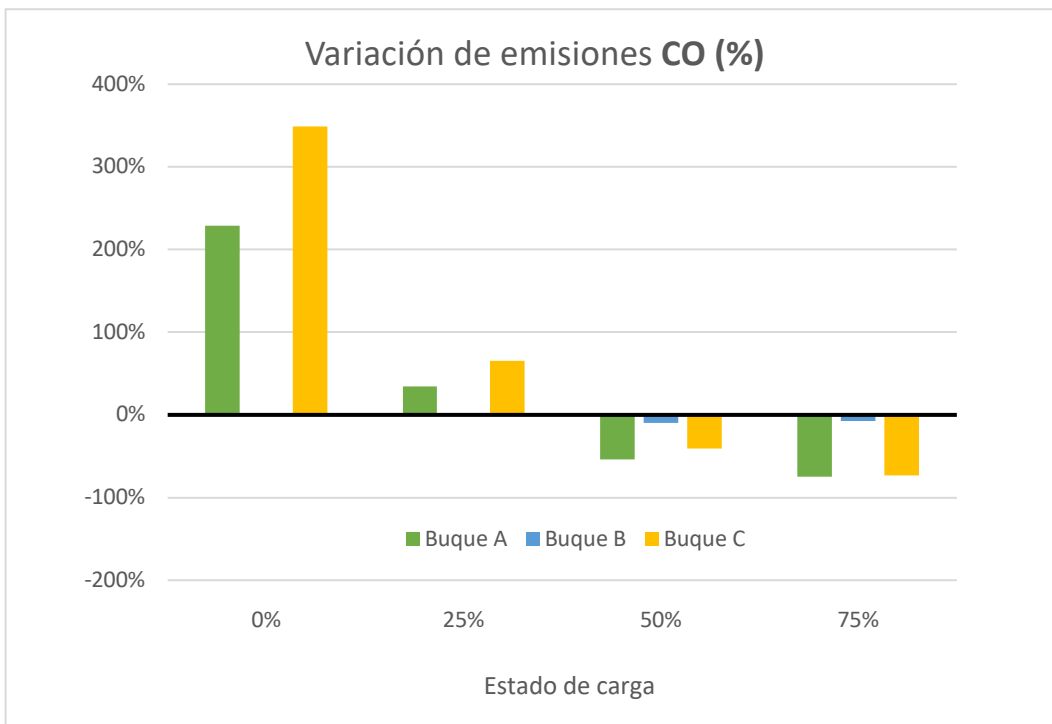


Gráfico 38. Emisiones de CO para cada buque

Fuente: Elaboración propia

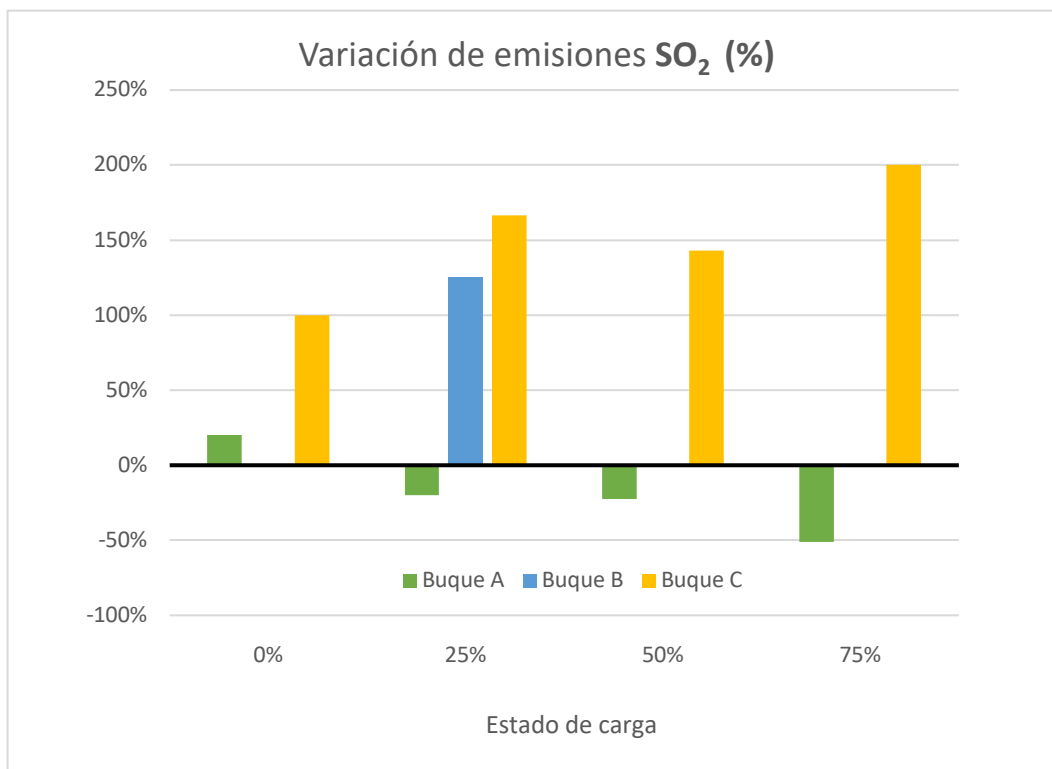


Gráfico 39. Emisiones de SO₂ para cada buque
Fuente: Elaboración propia

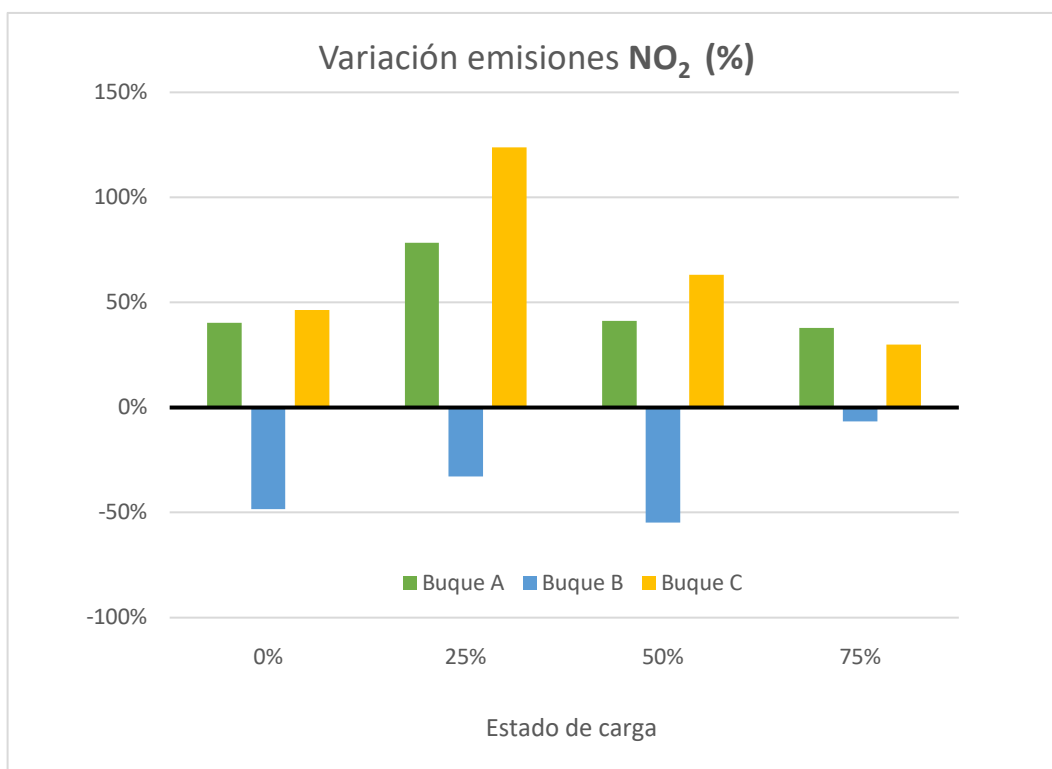


Gráfico 40. Emisiones de NO₂ para cada buque
Fuente: Elaboración propia

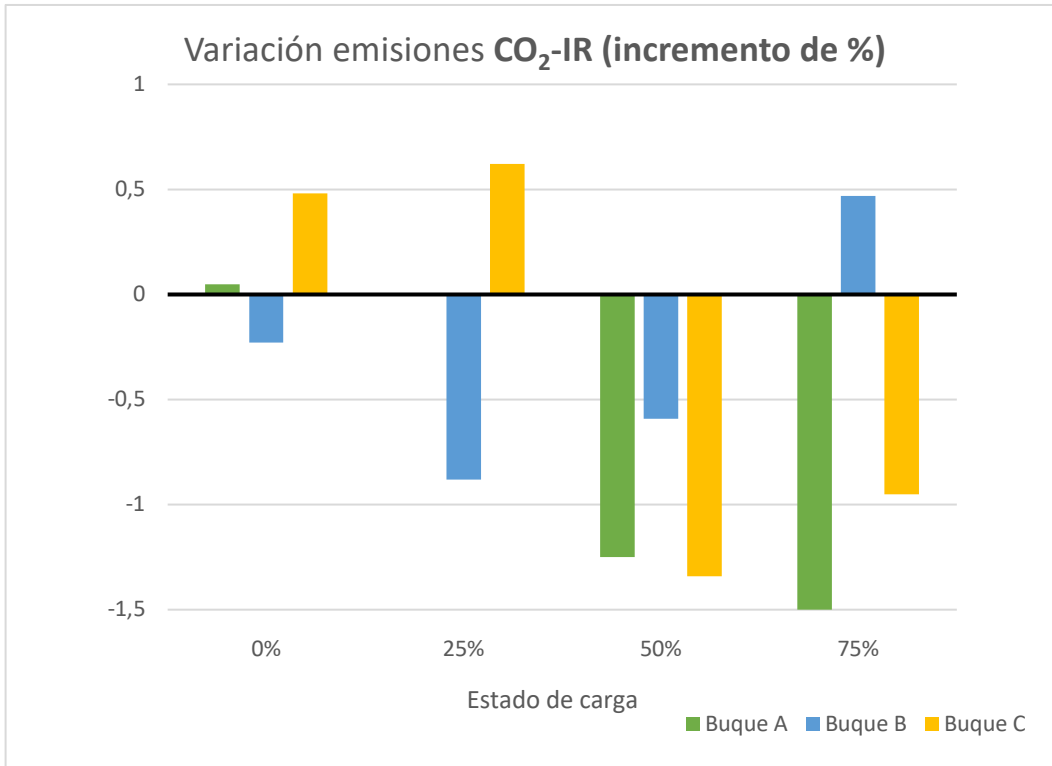


Gráfico 41. Emisiones de CO₂ para cada buque
Fuente: Elaboración propia

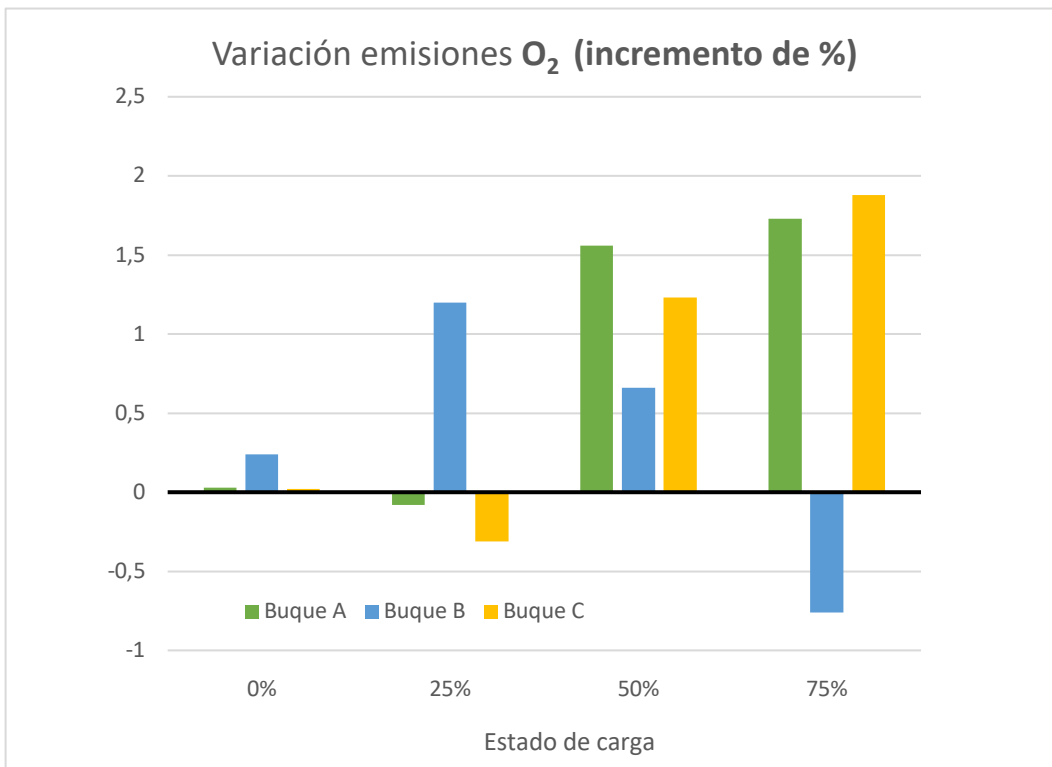


Gráfico 42. Emisiones de O₂ para cada buque
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN

DISCUSIÓN

Para el procedimiento de medidas se emplearon cuatro modos de operación para cada motor bajo condiciones reales de operación. Estos modos de operación fueron elegidos de acuerdo con las directrices marcadas por la normativa técnica del código NO_x, 75%, 50%, 25% y 0% de su potencia desarrollada y a una velocidad constante.

BUQUE A

Después de realizar el mantenimiento por overhaul a las 13.883h de funcionamiento se aprecia una gran disminución en la concentración de las emisiones de NO_x, entorno al 8% de emisiones para una carga del 75%, hay que tener en cuenta que antes de realizar el mantenimiento por overhaul el valor que se tenía para esta misma carga correspondía a 1059 ppm.

En este buque las concentraciones de CO tienen un aumento muy elevado para altas cargas de trabajo antes de la realización del mantenimiento por overhaul, consiguiéndose una disminución del 54% de concentraciones de CO después de la realización del mantenimiento de 15.000h de funcionamiento para cargas de trabajo superiores al 50%.

Este buque posee cuatro MM.AA. y desarrolla su operativa con dos de ellos, trabajando con cargas entre el 25- 35% llegando a alcanzar valores mayores comprendidos entre el 35- 50% en las operaciones de maniobra.

BUQUE B

Después de realizar el mantenimiento a las 14.128h de funcionamiento, podemos apreciar una gran disminución en la concentración de las emisiones de NO_x, alcanzando los mayores valores para cargas entre el 50-75%.

Antes de realizar el mantenimiento por overhaul, este motor tiene un valor de 760ppm para una carga del 25%, valor bastante elevado, pudiéndose deber a un avance en la inyección, puesto que el consumo de combustible para esta carga no es excesivo. Tras la

realización del mantenimiento, obtenemos una disminución del 30% de NO_x para cargas entre el 25- 50% y un 13% de NO_x para cargas entre el 50- 75%.

Las concentraciones de CO tras la realización del mantenimiento mejoran en un 9% sólo para cargas comprendidas entre el 50- 75%.

Este buque posee dos MM.AA. y desarrolla su operativa con ambos, trabajando con cargas de trabajo entre el 50- 60% llegando a alcanzar valores del 75% en la operación de maniobra.

BUQUE C

El mantenimiento se realizó a las 13.904h de funcionamiento. La mayor reducción de concentración de NO_x se obtuvo para una carga de 25- 50%, llegando en este motor a alcanzar el 41%. Para cargas entre el 50- 75% se obtiene el 16,7% de NO_x y para mayores al 75% una mejora de algo más del 5% de NO_x.

En cuanto a la concentración del CO, para máxima carga tenemos una mejora del 27%.

Este buque posee cuatro MM.AA. y desarrolla su operativa con tres de ellos, trabajando con cargas de trabajo entre el 30- 40% llegando a alcanzar valores entre el 45- 60% en la operación de maniobra.

En base a los resultados obtenidos y a la discusión de cada uno de los casos estudiados podemos complementar que con respecto a las emisiones de NO_x se comprueba que no es una ley matemática definida, puesto que para margen de cargas entre el 50- 75% emite mucha cantidad de este emisor. Por lo que la relación entre las emisiones de óxidos de nitrógeno- potencia, no es lineal como interpreta el análisis del Anexo VI de Marpol donde se establecen los límites de emisiones contaminantes.

Recordando que las emisiones de NO_x son las formadas en el interior de la cámara de combustión, resultado de la combinación de N y O_2 debido a las altas temperaturas y presiones que se alcanzan en el interior del motor.

Para cargas comprendidas entre el 25 y el 50%, las disminuciones son mayores después de realizar el mantenimiento por overhaul, llegándose a conseguir el 35% en el buque A, 30% en el buque B y 41% en el buque C. Por los valores tomados antes de la realización de dicho mantenimiento, se diagnostica un avance en la inyección, el combustible entra en la cámara de combustión antes de que se alcance una óptima presión y temperatura en la misma ya que en ese momento del proceso de combustión tanto la presión como la temperatura son aún bajas, esta causa retarda el proceso de combustión y aumenta la cantidad de combustible que entra en la cámara de combustión durante el tiempo de retardo. Este combustible sería quemado rápidamente en la fase de “pre-mezcla” al inicio de la combustión, dando como resultado un aumento de la presión y temperatura y como consecuencia de ello, el aumento de la concentración de los óxidos de nitrógeno.

Luego en referencia a lo expuesto, los motores sometidos a estudio, antes de la realización de mantenimiento programado por 15.000h de trabajo, sufrían un gran desgaste de las toberas de los inyectores, debido a este desgaste la cantidad de combustible que se pulveriza a la cámara de combustión es superior a la necesaria, luego se tiene más cantidad de combustible de la óptima en la cámara de combustión, éste interactúa antes y se obtiene una región de mayor temperatura que la deseada, y como consecuencia mayor formación de las concentraciones de óxidos de nitrógeno.

Al tener tan elevadas concentraciones de óxidos de nitrógeno se ha de suponer anomalías en el sistema de aire de carga, como por ejemplo una baja presión de aire de carga, provocadas por el estado de conservación de la turbosoplante, suciedad del filtro de la turbosoplante o suciedad del enfriador de aire de carga. Si aumentamos la presión de aire de carga junto con una inyección retardada, puede ocasionar un aumento o disminución de las concentraciones de NO_x , dependiendo del diseño del motor. La relación geométrica de compresión se aumenta reduciendo el volumen del espacio neutro, siendo el espacio de combustión más plano, lo cuál dará como resultado mayor enfriamiento de la llama por mayor contacto con las superficies refrigeradas lo que da lugar a un aumento en los

humos y la consiguiente disminución de los NO_x debidos a este enfriamiento. Si reducimos la temperatura de aire de carga, se reduce la temperatura de la cámara de combustión y consecuentemente las concentraciones de NO_x . Por cada 3 °C de reducción de la temperatura de aire de carga, se puede conseguir una disminución de alrededor de 1% de NO_x .

Partiendo de la base de que hay muchas medidas para reducir las emisiones de NO_x en los motores marinos, este estudio de tesis se ha centrado en la influencia que tiene el estado de mantenimiento sobre las emisiones de NO_x .

Algunos métodos de los utilizados actúan sobre el proceso de combustión de la misma manera que el estado de funcionamiento y además el mantenimiento efectuado en el motor también influye en el proceso de combustión. Ambos entran a formar parte de lo que se podría denominar “método primario” de producción de los NO_x y que ha sido estudiado en este trabajo de investigación.

Existen otros métodos, denominados “métodos secundarios”, para reducir las emisiones de NO_x que no evitan su formación, sino que son aplicados después del proceso de combustión como pueden ser los reductores catalíticos.

En los métodos primarios el objetivo principal es la disminución de la temperatura de combustión y del tiempo de su duración dentro de la cámara de combustión, causantes entre otros de la formación de dichos óxidos de nitrógeno.

Además, como es sabido, la gestión para obtener bajas emisiones de NO_x está directamente relacionada con el tiempo que dura la inyección, la relación de combustible/aire y la relación de compresión.

Si aumentamos la relación de compresión y la presión de combustible mientras se retrasa la inyección y se incrementa la velocidad de inyección, se consigue reducir la concentración de los NO_x y además de reducir el consumo de combustible. Esta conversión requiere un nuevo diseño del pistón capaz de soportar presiones mayores y una modificación en el sistema de inyección de combustible.

Entre los posibles métodos primarios se encuentran los siguientes:

- Modificación del sistema de inyección.
- Modificación de las toberas de inyección.
- Inyección de combustible a presiones más altas.
- Retraso en la inyección de combustible.
- Inyección de agua.
- Inyección estratificada.
- Humidificación del aire de entrada a cilindros.
- Variación de la relación de compresión.
- Ajuste de las válvulas de escape.

En los métodos secundarios el principal objetivo es gestionar la eliminación de los NO_x a través de sistemas de post-tratamiento de los gases de escape, lo que se consigue con el empleo de reductores catalíticos.

La mayoría de los métodos considerados aquí como métodos primarios tienen una relación muy directa con el estado de mantenimiento del motor, objetivo fundamental de este estudio de tesis doctoral.

Conforme avanzan las horas de funcionamiento del motor, factores como sustitución de las toberas de inyección, inyección de combustible a presiones más altas, retraso en la inyección de combustible, inyección de agua, humidificación del aire de entrada a cilindros, variación de la relación de compresión y ajuste de las válvulas de escape, se pueden ver totalmente afectados. Esto justifica la aplicación de los resultados de este estudio de tesis.

Para llegar a los mismos, se utilizaron las curvas de funcionamiento del motor facilitadas por el fabricante lo cual significa que los valores de potencia del motor, consumo de combustible y temperatura de aire de carga han sido tenidos en cuenta y comparados con los resultados obtenidos en este trabajo, no presentando resultados apreciables.

Los ciclos de prueba se desarrollaron de acuerdo con el Código Técnico de NO_x, manteniéndose la velocidad en un rango de $\pm 1\%$. El par para cada caso se sacó de las curvas de funcionamiento del motor. La velocidad correspondiente a cada par para cada

uno de los puntos ensayados durante el período de medidas estuvieron dentro del rango $\pm 2\%$ de la velocidad del motor.

Por otro lado, con el objeto de normalización de las emisiones de NO_x para ciertas condiciones de referencia estándar, las emisiones de NO_x están afectadas por las condiciones de temperatura y humedad ambientales, lo cuál ha sido tenido en cuenta en este estudio de tesis.

Los valores medios obtenidos de cada uno de los motores ensayados indican que la influencia del estado de conservación y mantenimiento tienen una gran importancia en la formación de NO_x .

En cuanto a la formación de CO, se supone que, a grandes cargas de trabajo, la concentración de emisiones de NO_x aumentan y se deben reducir las de CO. En los buques A y C las concentraciones de CO tienen un aumento muy elevado para altas cargas. El origen de la formación de las concentraciones de CO se debe a la oxidación incompleta del combustible. Su formación está relacionada con la calidad de la mezcla aire-combustible. Así que se analiza que estos motores antes de realizar el mantenimiento por overhaul, tenían una mala inyección u atomización del combustible, dado que en algunas zonas de la cámara de combustión la proporción del combustible respecto al aire es mucho mayor provocando mayores cantidades de CO en los gases de la combustión.

Además, este aumento de CO para cargas mayores en dichos motores puede deberse a que se genere en una zona donde la mezcla aire- combustible es muy pobre dado que la llama no pueda propagarse idóneamente por lo que el proceso de combustión no se completaría.

En el motor B se considera que la mezcla aire- combustible era la idónea, y se da por hecho que, a grandes cargas de trabajo, la concentración de emisiones de NO_x aumentan y se deben reducir las de CO.

En cuanto al contenido de azufre en las emisiones, no se considera a analizar dado que los motores sometidos a estudio consumen gasóleo DMA (gasoleo diesel marine) con un contenido de azufre igual o menor al 0,1%, dato proporcionado por los diferentes buques mostrando los datos de la empresa suministradora de combustibles, a destacar que cada buque es suministrado por una empresa diferente.

No obstante, durante las fases de estudio se solicitan muestras de combustible a los tres buques para realizar análisis de partículas sulfurosas de dichas muestras. Para la obtención de las concentraciones de azufre de estos combustibles se hace uso de un equipo analizador del contenido de azufre, equipo SLFA- 6100 de Horiba. Los resultados de estos análisis son 0,098% de azufre para el buque A, 0,0908% para el buque B y 0,0972% para el buque C. Luego se comprueba que el combustible consumido por los motores sometidos a estudio cumple con la normativa vigente en cuanto concentración de azufre permitido, siendo para este tipo de combustible menor al 0,1%.

CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en el desarrollo de este estudio de tesis, y tras realizar su análisis y discusión, podemos extraer las siguientes conclusiones:

1.- Existen determinados parámetros en la operación del motor como son la presión y la temperatura de aire de sobrealimentación proporcionada por la turbosoplante del motor, el desgaste de las toberas de los inyectores, desajuste de la presión de inyección como la propia inyección, etc, influyen directamente sobre las concentraciones de emisiones de los gases de la combustión del motor. Luego por este hecho, es poco fiable considerar las concentraciones de las emisiones realizadas del motor en el banco de pruebas, dado que las condiciones de operación nada tienen que ver con las condiciones de operatividad del motor, el desgaste de sus elementos y los mantenimientos realizados.

2.- Los desajustes en el sistema de inyección causan serios problemas sobre las emisiones de NO_x y sobre el rendimiento del motor.

3.- Lo ideal sería que cada buque contara con un sistema fijo de monitorización de emisiones constantes y real, porque de esta manera la propia tripulación analizando los datos, pueden adelantarse a posibles fallos o desajustes por horas de funcionamiento de:

- Desgaste de la tobera del inyector.
- Desgaste del pistón y válvulas.
- Desgaste de algún elemento de la bomba de inyección.
- Desgaste del camón de inyección causando la caída de presión de combustible en ese cilindro.
- Desgaste de la válvula de retención de la bomba de inyección.
- Desajustes en el avance o retardo de la inyección con relación al punto óptimo.
- Reducción de la presión de combustible a la entrada del inyector.
- Desgaste de los alabes de la turbosoplante.
- Anillo de toberas de la turbosoplante en mal estado.
- Desalineación del rotor de la turbosoplante.
- Suciedad del enfriador de aire de barrido.
- Pérdida de estanqueidad del enfriador de aire de barrido.

4.- Teniendo referencia de emisiones contaminantes del motor, se pueden analizar las causas de formación de las mismas y elaborar un plan de actuación a tener en cuenta sobre los mantenimientos u acciones correctivas a realizar en el motor.

5.- Se puede definir un modelo que realice el control de las emisiones a bordo y establecer un sistema de operación sobre el mismo, para de esta forma, poder minimizar las emisiones. Reconociendo que el control de las emisiones es un claro indicador del estado funcional del motor.

6.- Se recomendaría a la tripulación de los buques supervisar de forma continua el estado de la puesta a punto de los motores, realizando:

- tomas de presiones de combustión de cada cilindro, durante viajes con buena mar si es posible.
- control de los índices de carga.
- temperaturas de gases de escape.
- rpm del motor.
- turbocompresor.
- presión de aire de carga.
- índice de carga.
- potencia desarrollada.

7.- No existe ninguna Normativa dentro del Convenio SCTW dónde regule que la tripulación deba tener conocimientos sobre la relación de las concentraciones de emisores de NO_x y CO emitidos y las condiciones de operación de los motores. Si existe en el Anexo 8 de la resolución MEPC.212 (63), 2 de marzo de 2012, una guía que define el método de cálculo del índice de eficiencia energética del diseño para nuevos buques, dónde también se define el procedimiento donde se realiza este cálculo en la fase de explotación del buque.

8.- Se ha comprobado que las horas de funcionamiento de los motores si influyen en el aumento de las concentraciones de las emisiones, fundamentalmente las concentraciones de NO_x.

9.- En cuanto a la interpretación de las emisiones de los NO_x /potencia desarrollada, han de considerarse las cargas parciales, puesto que queda demostrado que se puede emitir un flujo másico superior a cargas inferiores cuando nos situamos en tramos de potencia entre el 25% y el 75%. Por esto los límites de las emisiones de NO_x de un motor diésel marino, no se deberían referir sólo a un consumo específico.

10.- Cuando exista una disminución en el consumo de combustible y aumente la concentración de NO_x , además del aumento de la temperatura de los gases de escape del motor, son signos directos de alguna anomalía en el sistema de inyección, o desajuste de algunos de sus parámetros.

11.- Además de la temperatura de los gases de la combustión, hay que tener en cuenta la temperatura de aire de carga además del índice de exceso de aire.

12.- Aunque en los buques se ha instaurado el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (PGEEB) (2013), no es suficiente para controlar no sólo la contaminación atmosférica y el estado de conservación de los motores. Considerando que los sistemas de control que se emplean a bordo no son suficientes para controlar las emisiones contaminantes emitidas.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Fact Sheet EPA-420-F-09-075, December 2009” United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality.
2. D.Cengiz, Y. Durmuşoğlu. Science of the total environment. 390 (2008) 255 – 261.
3. A. Richard, A. Broome E. Martin, B.Cope, B.Goldsworthy, L. Goldsworthy, K. Emmerson, E. Jegasothy, G. Morgand.. Environment International 87 (2016) 85–93.
4. J.J.Winebrake, J.J.Corbet, , E.H Green,, ALauer, , V. Eyring,. Environ. Sci. Technol. 2009,43(13), 4776-4782.
5. De Meyera, P., Maesa, F., Volckaertb, A. “Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports” Atmospheric Environment 42 (2008) 196–206.
6. Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L., Styns, K., Torfs, R., “Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory, an activity-based emission model” Atmospheric Environment 42 (2008) 667–676.
7. Eyring, V., Isaksen, I., Berntsen, T., Collins, W.J., Corbett, J.J., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J, Schlager, H., Stevenson, D.S. “Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping” Atmospheric Environment (2009) 1–37.
8. Vutukuru, S., Dabdub, D., “Modeling the effects of ship emissions on coastal air quality: A case study of southern California” Atmospheric Environment 42 (2008) 3751–3764.
9. Dore, A.J., Vieno, M., Tang, Y.S., Dragosits, U., Dosio, A., Weston, K.J., Sutton, M.A. “Modelling the atmospheric transport and deposition of sulphur and nitrogen over the United Kingdom and assessment of influence of SO₂ emissions from international shipping” Atmospheric Environment 41 (2007) 2355–2367.
10. Asariotis, R., H. Benamara, J. Hoffmann, E. Núñez, A. Premti, Valentine and V. Vincent (2009). “Review of maritime transport 2009”. New York and Geneva, United Nations Conference on Trade and development (UNCTAD).
11. Tesis Dra. Fátima Calderay Cayetano (2015).
12. Corbett, J.J., Fischbeck, P.S., and Pandis, S.N. (1999), “Global Nitrogen and Sulphur Emissions Inventories for Oceangoing Ships”, Journal of Geophysical Research, 104 (D3), pp. 3457-3470.
13. Endresen, Ø., et al. (2003), “Emission from international sea transportation and environmental impact”, Journal of Geophysical Research, 108 (D17), 4560, doi: 10.1029/2002JD002898.

14. Eyring, V., H. W. Köhler, J. van Aardenne and A. Lauer (2005). “Emissions from international shipping: The last 50 years”. *Journal of Geophysical Research* (D117305 doi: 10.1029/2004JD005619).
15. Eyring, V., et al. (2007a), “Multi-model simulations of the impact of international shipping on atmospheric chemistry and climate in 2000 and 2030”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, pp. 757-780.
16. Wang, C., Corbett, J. J., Firestone, J. (2007a), “Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories”, *Environmental Science & Technology*, DOI: 10.1021/es0700799.
17. Tesis Dr. José Ángel Llamas Alfaro (2012).
18. Winnes, H. and E. Fridell (2009). "*Particle emissions from ships; dependence on fuel type.*" *Journal of Air and Waste Management Association*. DOI:10.3155/1047-3289.59.12.1391): 1391–1398.
19. Zigor Uriondo, C. Vanesa Durán Grados, Manuel Clemente, Juan Moreno-Gutiérrez, Leopoldo Martín, “Effects of charged air temperature and pressure on NO_x emissions of marine medium speed engines”. (2011) Elsevier Ltd.
20. Sarvi, A., Fogelholm, C., Zevenhoven, R., “Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 2. Influence of fuel type and operating mode” *Fuel Processing Technology* (2007).
21. Fenimore, C.P. (1970) “Formation of Nitric Oxide in premixed hydrocarbon flames”, Thirteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh.
22. John B. Heywood, McGraw Hill “Internal Combustion Engines”.
23. European Commission Directorate General Environment Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market based Instruments.
24. Krishnamurthy, M., Carder, D.K., Thompson, G., Gautam, M., “Cost of lower NO_x emissions: Increased CO₂ emissions from heavy-duty diesel engines” *Atmospheric Environment* 41 (2007) 666–675.
25. EPA(1999). Final Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions From Compression- Ignition Marine Engines. Ann Arbor, MI, U.S. EPA Office of Air and Radiation; Office of Mobile Sources; Engine Programs and compliance Division:132.
26. Fridell, E., Steen, E., Peterson, K., “Primary particles in ship emissions” *Atmospheric Environment* 42 (2008) 1160–1168.

-
27. “Report of the Marine Environment Protection Committee on its Fifty-eighth session: Annexes 13 and 14 to the report of the Marine Environment Protection Committee on its fifty-eighth session (MEPC 58/23)”.
 28. EPA. History of Reducing Air Pollution from Transportation in the United States (U.S.).
 29. Tesis Dra. Cristina Vanesa Durán Grados (2007).
 30. Campling P, Liliane J, VanherleK, Cofala J, Heyes C, Sander R. Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emission control areas in European Seas 2013; Vision on Technology(VITO).
 31. James J. Corbett, James J. Winebrake, Erin H. Green, Prasad Kasibhatla, Veronika Eyring and Axel Lauer Environ. Sci. Technol., 2007, 41 (24), pp8512-8518 DOI: 10.1021/es071686z Publication Date (Web): November 5, 2007.
 32. Campling P, Liliane J, VanherleK, Cofala J, Heyes C, Sander R. Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emission control areas in European Seas 2013; Vision on Technology(VITO).
 33. Dalsøren SB, Eide MS, Endresen Ø, Mjelde A, Gravir G, Isaksen, I. Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships. Atmospheric Chemistry and Physics 2009; 9: 2171–2194.
 34. Olesen HR, Winther M, Ellermann T, Christensen J, Plejdrup M. Ship Emissions and air pollution in Denmark. Danish Ministry of the Environment 2009; Environmental project n. 1307 2009.
 35. Endresen Ø, Sørgård E, Behrens H, Brett P, Isaksen I. A historical reconstruction of ship’s fuel consumption and emissions. Journal of Geophysical Research 2007; DOI:10.1029/2006JD007630.
 36. Wang Ch, Corbett J.J, Firestone J. Modeling Energy Use and Emissions from North American Shipping. Environmental Science & Technology. 2007; 41(9): 3226-3232.
 37. Jalkanen JP, Brink A, Kalli J, Pettersson H, Kukkonen J, Stipa T. Modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. Atmos. Chem. Phys.2009; 9:9209-9223.

38. Miola A, Ciuffo B, Marra M, Giovine E. Analytical framework to regulate air emissions from maritime transport. JRC European Commission National Environmental Research Institute 2010.
39. Eyring V, Koehler HW, van Aardenne J, Lauer A. Emission from International Shipping: The last 50 years. JGR. 2005; 110(D17305): 2171-2194.
40. Corbett JJ, Koehler HW. Updated emissions from ocean shipping. JGR 2003; DOI:10.1029/2003JD003751.
41. Blasco, J. Durán,V. Hampel,M and Moreno,J. “Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems. Environment International 66 (2014) 44–47.
42. EPA (1999). 40 CFR Parts S9, 92, and 94: Control of Emissions of Air Pollution from New CI Marine Engines at or above 37 kW, Final Rule. Washington, DC, Environmental Protection Agency.
43. EP A (2002). Draft Regulatory Support Document: Control of Emissions from Compression-Ignition Marine Diesel Engines At Or Above 30 liters per cylinder. Ann Arbor, MI, U.S. EPA: 157.
44. Alan P. Bentz / Elizabeth Weaver “Marine Diesel Exhaust Emissions Measured by Portable Instruments” SAE Paper No. 941784.
45. “Investigation of NO_x Measurement for Practical Use” CIMAC Congress 1998, Copenhagen. N. Baba / S. Yanase / S. Sasaki.
46. John E. Dec. “A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging” SAE Paper No. 970873, John E. Dec.
47. ISO (1996). Reciprocating Internal Combustion Engines - Exhaust Emission Measurement - Part 4: Test Cycles for Different Engine Applications. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.

ANEXOS

ANEXO I

Capítulo de Libro publicado



Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque

Yolanda Amado Sánchez^(a), Fátima Calderay Cayetano^(b), Vanesa Durán Grados^(a), y Juan Moreno Gutiérrez^(a)

^(a)Escuela de Ingenierías Marina, Náutica y Radioelectrónica, Universidad de Cádiz. Campus Universitario de Puerto Real, 11510 Puerto Real, Cádiz, direccion.nautica@uca.es ^(b)Escuela Superior de Ingeniería, Campus Universitario de Puerto Real, 11510 Puerto Real, Cádiz

Abstract

In accordance with the current regulations (ANNEX VI of MARPOL 73/78) that establishes a limit of emissions in the function of engine revolutions, based on tests carried out with newly manufactured engines and on test benches, it is in the development, In its final stages, a doctoral thesis that demonstrates that the functional status of high-power motors has been considered as fundamental to reduce the emissions of pollutants emitted into the atmosphere. With the studies carried out it will be demonstrated that reference values in the test benches are not enough, but also in the operation phase. more exhaustive control of emissions produced under normal operating conditions on board. Also, I have to take into account, the limits that are exceeded when the engine works with an excess of hours of operation, and close to its stop for maintenance. It is verified, fundamentally, the replacement of the injectors and the adjustment of the injection system in general, the engine would reduce its emissions of NOx, CO and PM.

On the basis of the realization of these comparative calculations in the management of pollutant emissions from marine engines, before and after carrying out maintenance maintenance, they are in a position to propose an optimal operating model that minimizes emissions

Keywords: *emissions, energy efficiency, maintenance overhaul*



Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque

Resumen

Atendiendo a la normativa actual (ANEXO VI de MARPOL 73/78) que establece un límite de emisiones en función de las revoluciones del motor, basado en pruebas realizadas con motores de nueva fabricación y en bancos de pruebas, se encuentra en desarrollo, en sus fases finales, una tesis doctoral que demostrará que el estado funcional de los motores marinos de alta potencia ha de considerarse como algo fundamental para disminuir las emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera. Con los estudios llevados a cabo se demostrará que no es suficiente tomar valores de referencia en bancos de prueba, sino que, debido a que durante la fase de operatividad los motores pueden sufrir ciertos desajustes, se debería tener en cuenta estas circunstancias, y realizar un control más exhaustivo de las emisiones producidas en condiciones normales de funcionamiento a bordo. Además, habría que tener en cuenta, los límites que se sobrepasan cuando el motor trabaja con un exceso de horas de funcionamiento, y próximo a su parada por mantenimiento. Comprobaremos que, tras el reemplazo de los inyectores y ajuste del sistema de inyección en general, el motor disminuiría sus emisiones de NOx, CO y PM fundamentalmente.

En base a la realización de estos cálculos comparativos en la medición de emisiones de contaminantes de motores marinos, antes y después de la realización del mantenimiento por overhaul, se estaría en condiciones de proponer un modelo óptimo de operación que minimice las emisiones

Palabras clave: *emisiones, eficiencia energética, mantenimiento overhaul.*



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque***Introducción**

Las emisiones atmosféricas de contaminantes procedentes de los buques, han tomado gran importancia durante la última década sobre todo porque los motores marinos contribuyen en un porcentaje importante a la degradación del medio ambiente, aunque con un menor nivel de emisiones de CO₂ por tonelada y kilómetro transportado comparado con otros medios de transporte. j [1].

Por otro lado, las emisiones de SO_x, junto con NO_x, dan lugar a la formación de Partículas finas (PM_{2.5}) [2]; después de la combustión dentro del motor, el Azufre contenido en el combustible se convierte en dióxido de azufre (SO₂) en la cámara de combustión, y una pequeña cantidad (1% ~ 2%) se oxida y se convierte en trióxido de Azufre (SO₃) y es emitido directamente como PM [3]. Las emisiones de NO_x también contribuyen para aumentar la capa de Ozono(O₃).



Buque en aguas del Estrecho de Gibraltar

Fuente: elaboración propia



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*

En este sentido, Winebrake J.J. estimó un total de 87.000 muertes anuales por cáncer cardiopulmonares y respiratorios causados por las emisiones de PM_{2,5} procedentes del transporte marítimo [4].

Las emisiones contaminantes atmosféricas procedentes de otras fuentes como el área de la industria, industria automotriz y vehículos, son conocidas y controladas [5, 6, 7, 8, 9]. Sin embargo, aún no hay un acuerdo unánime sobre qué procedimiento emplear para el cálculo de los inventarios de emisiones procedentes del transporte marítimo. Dicho cálculo depende de ciertos parámetros entre los que se encuentran los valores de los factores de emisión de cada contaminante que los motores térmicos marinos emiten a la atmósfera como son los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de Azufre, hidrocarburos (HC) y partículas, así como de gases de efecto invernadero (GEI). Como en todo tipo de inventarios dentro de este ámbito, existe una serie de incertidumbres siempre relacionadas con los parámetros que intervienen en el cálculo final.

El estado funcional de los motores nunca es cuantificado en los inventarios de emisiones procedentes del transporte marítimo, a pesar de que tiene una clara influencia sobre la cantidad que emite de cada uno de estos contaminantes, principalmente los NO_x, CO y Material Particulado. El estado funcional de los motores marinos de alta potencia influirá sobre la producción de estos contaminantes, se dedicará el estudio propuesto en este Proyecto basado fundamentalmente en el estado de conservación de las toberas, inyectores, aire de aspiración y, en general todos los elementos que intervienen en el proceso de combustión.

El análisis se efectuará sobre varios motores de potencia próxima a los 5.000 kW y de alta velocidad en dos fases:

1.- Funcionando con los sistemas de combustión y aire en las condiciones correspondientes a un número elevado de horas de funcionamiento que suponga una parada próxima para realizar el mantenimiento correspondiente a las 10.000 horas de funcionamiento.”.



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*



2.- Toma de datos una vez revisado y ajustado el motor.

La normativa actual (ANEXO VI de MARPOL 73/78) establece un límite de emisiones en función de las revoluciones del motor, pero este límite está basado en pruebas realizadas con motores de nueva fabricación y en banco de pruebas. Sin embargo, no se hace referencia alguna a los límites que se pueden sobrepasar cuando el motor se encuentra en un mal estado de funcionamiento como por ejemplo con toberas e inyectores en mal estado, mala sincronización de la inyección, problemas con la temperatura y humedad del aire de aspiración, con excedente de horas de funcionamiento sin revisión, etc.

Las emisiones procedentes de los motores diésel marinos se componen principalmente de NO_x, CO, SO_x y Material Particulado (PM), como se ha expuesto anteriormente. De los mencionados sólo las emisiones de NO_x están limitados en los motores diésel marinos por medio de una regulación internacional (ANEXO VI, MARPOL) aprobada por la Organización Marítima Internacional. La limitación de NO_x se define en la regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78. El 1 de Enero de 2011, entró en vigor el límite de emisión Nivel II, estando vigente hasta el 1 de Enero de 2016, que entró en vigor el límite de Nivel III.

Aunque los SO_x no están cuantificados mediante Normativa, sin embargo, para evitar la formación de partículas, se limita el contenido de azufre en los combustibles. Los límites de contenido de azufre en los combustibles se establecen en la regla 18 del MARPOL ANEXO VI.

Por otro lado, se ha comprobado que si los motores consumen fuel-oíl pesado con alto contenido de azufre, existe una fuerte dependencia de la emisión de PM con el contenido de azufre en el combustible [10, 11]. Esto significa que una reducción del contenido de azufre en el combustible ocasiona una reducción directa de PM en los gases de escape. El límite de contenido de azufre en el combustible actualmente se ha reducido al Nivel III [12].



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*

También, como ya es conocido, la principal fuente de formación de NOx es la oxidación del nitrógeno atmosférico a altas temperaturas que se produce en la combustión; cuanto mayor temperatura de combustión y mayor tiempo manteniendo dicha temperatura, mayor será la formación de NOx.

El NOx se forma en la cámara de combustión por la combinación de nitrógeno y oxígeno en condiciones de alta presión y alta temperatura. Aunque el combustible tiene algo de nitrógeno y oxígeno en su composición, la fuente principal de la formación de NOx es la combinación de nitrógeno atmosférico y el oxígeno. Como es sabido, los principales mecanismos de formación son el conocido mecanismo térmico (mecanismo de Zeldovich), el mecanismo indicador de NO (mecanismo Fenimore) y el mecanismo de nitrógeno contenido en el combustible. El NOx térmico es de alrededor de 70% del total de NOx en las condiciones de la cámara de combustión en un motor diésel de velocidad media [13]. El mecanismo Zeldovich es el responsable de la mayoría de las emisiones de NOx procedentes de los motores Diésel cuando la temperatura de combustión excede los 2000°K. El mecanismo Fenimore, es muy rápido y se forman en la zona de combustión.

Por tanto, es fácilmente deducible que cuanto menor sea el valor de la temperatura a la que se produce la combustión y cuanto más rápida sea ésta, menor será la formación de NOx. Pero ambas circunstancias influyen negativamente en el rendimiento del motor por lo que, en principio, las medidas para reducir las emisiones de NOx se deberían basar fundamentalmente en la reducción de la temperatura máxima de combustión y la reducción del tiempo de combustión mediante procedimientos que no impliquen una reducción del rendimiento, aunque la mayoría de ellas tienden a reducir la temperatura máxima de combustión, ya que la formación de NOx es una función exponencial de la temperatura [14]. De hecho, la proporción de NOx suele incrementarse por un factor de proporción de 10 por cada 100°K de aumento de temperatura [15].



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*



Debido a esto, los principales métodos de reducción de emisiones de NOx en el motor se centran en la reducción de la temperatura de combustión máxima y la duración de la combustión. Estos métodos de limitación de emisiones en el motor han traído como consecuencia una disminución de la eficiencia energética de los motores diésel [16]. Esta característica de la formación de NOx se contempla en la Regla 13 del Anexo VI y los límites de emisión específicos son mayores cuanto menor es la velocidad del motor. Cuanto más potencia y volumen tenga el motor, por lo general, más lenta es la velocidad del pistón durante la carrera, más adiabático es el proceso de combustión y, por lo tanto, mayores las temperaturas de combustión, con lo cual, mayor formación de NOx.

Justificación

Está justificado, por tanto, esta propuesta de trabajo de proyecto de tesis, cuyo objetivo principal sería desarrollar un análisis de la influencia que los cambios de presión en la inyección, el estado de conservación de las toberas, la sincronización del sistema de inyección y las condiciones de presión y temperatura del aire de aspiración, ejercen sobre las emisiones al objeto de proponer un modelo adaptado a cada motor en particular que minimice las emisiones.

Los motores diésel instalados en la flota mundial tienen que cumplir con las regulaciones de emisiones 73/78 ANEXO VI del Convenio MARPOL de la OMI cuyo cumplimiento se comprueba en banco de pruebas; pero esta regla no exige comprobar su cumplimiento una vez instalado el motor a bordo. No existe ningún método para seguir comprobando el régimen de emisión a bordo, sólo podemos comprobar a través del histórico de mantenimiento de los motores marinos, si se ha cumplido con las horas de funcionamiento que propone el fabricante.



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*



Inyector usado durante 5.000 h e inyector nuevo para reemplazo

Fuente: elaboración propia

En este proyecto, se trata de demostrar que no es suficiente tomar valores de referencia en bancos de prueba, sino que se deben tener en cuenta, las emisiones producidas en condiciones normales de funcionamiento a bordo lo que exigiría que la toma de valores se realizara cuando los motores están instalados a bordo y efectuando su período de pruebas, con el fin de poder ajustar las condiciones de la instalación.

Posteriormente, una vez definido el modelo que relacione las emisiones con dichos parámetros, se podría predecir el estado funcional del motor.

Cabe recordar que, por cada dólar invertido en Estados Unidos en programas de reducción de emisiones, se obtienen 9 de beneficio en salud y medioambiente [17].



Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque



Metodología

La metodología a emplear será la misma que especifica el Código Técnico para la aplicación de la regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78 y que define los equipos a emplear para la toma de potencia en eje y emisiones en simultáneo, así como medidas de caudales de combustible y condiciones de presión, temperatura caudal y humedad del aire de admisión. Evitando los aumentos bruscos de la temperatura del agua de refrigeración, que podría provocar un aumento de temperatura en las paredes de la cámara de combustión reduciendo el calor de los gases de escape liberados. Teóricamente esto tendrá un efecto directo en la generación de NOx, un aumento de la temperatura de combustión provocará un aumento de la generación de NOx. De esta manera y según se contempla en el anexo 14 del documento MEPC 58/23 del Código Técnico, el requisito para el sistema de refrigeración es sólo que tiene que ser capaz de mantener el motor en las temperaturas normales de funcionamiento prescritas por el fabricante de motores.

Sin embargo, en el Código Técnico no hay instrucciones claras acerca de la instalación del motor a bordo o condiciones que han de cumplirse cuando el motor está instalado o después de que el motor ha sido instalado a bordo. La única limitación es que el motor no puede sufrir ninguna modificación importante que pudiera causar un incremento en las emisiones.

Para las medidas de presión de inyección se podría emplear la siguiente cadena de medidas:

- Un transductor de presión piezoeléctrico intrusivo PCB 108A02B.
- Un regletero SCB-68.
- Un PC portátil con la tarjeta de adquisición de datos PCMCIA 6062E.



Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque

Para la medida de presión de combustión en cámara se podría emplear una cadena de medida similar a la de presión de inyección excepto que el transductor piezoeléctrico de presión sería del tipo PCB112B10 y que debido a sus características eléctricas sería necesario emplear el amplificador de carga en línea modelo PCB422E cuya salida se aplicaría a la entrada del amplificador PCB482A16 de cuatro canales controlado digitalmente para los sistemas transductores ICP. Además de los transductores de presión aquí mencionados se emplearía un sistema de dos transductores de proximidad con sus respectivos circuitos acondicionadores. También se emplearían termopares de tipo K para medidas de temperaturas y transmisores de presión DANFOSS para la medida de presión de sobrealimentación.

De esta manera los resultados de las pruebas estarían referidos a medidas específicas (g/kWh) y a concentraciones de emisiones en los gases de escape (ppm), aplicando el método de balance de masas y el método del equilibrado del carbono según lo especificado en el código técnico del Anexo VI de Marpol 73/78 para lo que se necesitaría conocer la composición del combustible y el flujo másico de combustible que entra al motor así como la composición de los gases de escape (O₂, CO₂, CO, SO_x, NO_x, THC) al objeto de establecer las ecuaciones de equilibrio por medio de las cuales se determinarían los flujos másicos de los componentes de los gases de escape.

La ubicación de las sondas de muestreo se colocaría conforme a la normativa vigente que establece 0,5 m como mínimo, o tres veces el diámetro del tubo de escape. Las medidas de potencia en ejes se realizarían mediante torsiómetro de par de galgas extensiométricas para los Motores principales. Para los motores se tomarían potencias en tiempo real en cuadro eléctrico.

Las pruebas se realizarían de acuerdo con los ciclos de propulsión E2 y E3. Ciclo E2 es el ciclo de pruebas para la aplicación "velocidad constante de propulsión principal" en el que el motor funciona en revoluciones constantes y los cambios de carga se harían con hélice de paso variable o propulsión diésel eléctrico. EL ciclo E3 es el ciclo de pruebas que teniendo en cuenta la "ley de la hélice aplicable básicamente para los motores principales que se ejecutan con hélices de paso fijo".

*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*



Resultados

Actualmente se están analizando todos los datos tomados a bordo de diferentes embarcaciones.

Conclusiones

Del proyecto de tesis actualmente en desarrollo podremos demostrar cómo el estado funcional de los motores marinos de alta potencia influye directamente sobre las emisiones emitidas de contaminantes tan perjudiciales como el NO_x, CO y partículas.

Gracias a este estudio de tesis se podrá desarrollar un modelo óptimo que defina la relación existente entre el estado funcional del motor y las emisiones de CO, NO_x y PM (a través de la medida de SO_x) basado en el análisis de pruebas que se desarrollarán a bordo de los barcos y teniendo en cuenta que pruebas anteriores realizadas tanto en banco de pruebas como en motores de velocidad media ya instalados a bordo de buques pusieron de manifiesto la influencia que el estado funcional del turbocompresor, la temperatura del aire de admisión del cilindro, la sincronización de la inyección, el estado funcional de toberas e inyectores, etc.. ejerce sobre la producción de esos contaminantes.

No se trata, por tanto, exclusivamente de definir la relación existente entre la emisión de contaminantes y el estado funcional del motor, sino que, basado en los resultados obtenidos en pruebas realizadas en otros motores de mediana potencia que ya han sido publicados y cuyos autores son los directores de esta tesis, definir un modelo óptimo de operación que minimice las emisiones.



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*

Acknowledgements

This project has received funding from the European Union's Erasmus+ programme under grant agreement 2018 – 3387/ 001- 001 (Project number 601186)



"The European Commission support for the production of this publication does not constitute endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein"

Referencias

- [1] Fact Sheet EPA-420-F-09-075, December 2009” United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality.
- [2] D.Cengiz, Y. Durmuşoğlu. Science of the total environment. 390 (2008) 255 – 261.
- [3] A. Richard, A. Broome E. Martin, B. Cope, B. Goldsworthy, L. Goldsworthy, K. Emmerson, E. Jegasothy, G. Morgand. Environment International 87 (2016) 85–93.
- [4] J. J. Winebrake, J.J. Corbet, E.H Green, ALauer, V. Eyring, Environ. Sci. Technol. 2009,43(13), 4776-4782.
- [5] De Meyera, P., Maesa, F., Volckaertb, A. “Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports” Atmospheric Environment 42 (2008) 196–206.
- [6] Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L., Styns, K., Torfs, R., “Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory, an activity-based emission model” Atmospheric Environment 42 (2008) 667–676.



*Influencia del estado funcional de los motores
térmicos en la eficiencia energética del buque*



- [7] Eyring, V., Isaksen, I., Berntsen, T., Collins, W.J., Corbett, J.J., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J., Schlager, H., Stevenson, D.S. “Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping” *Atmospheric Environment* (2009) 1–37.
- [8] Vutukuru, S., Dabdub, D., “Modeling the effects of ship emissions on coastal air quality: A case study of southern California” *Atmospheric Environment* 42 (2008) 3751–3764.
- [9] Dore, A.J., Vieno, M., Tang, Y.S., Dragosits, U., Dosio, A., Weston, K.J., Sutton, M.A. “Modelling the atmospheric transport and deposition of sulphur and nitrogen over the United Kingdom and assessment of influence of SO₂ emissions from international shipping” *Atmospheric Environment* 41 (2007) 2355–2367.
- [10] Sarvi, A., Fogelholm, C., Zevenhoven, R., “Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 2. Influence of fuel type and operating mode” *Fuel Processing Technology* (2007).
- [11] Fridell, E., Steen, E., Peterson, K., “Primary particles in ship emissions” *Atmospheric Environment* 42 (2008) 1160–1168.
- [12] “Report of the Marine Environment Protection Committee on its Fifty-eighth session: Annexes 13 and 14 to the report of the Marine Environment Protection Committee on its fifty-eighth session (MEPC 58/23)”.
- [13] Paro, D., “Development of the Sustainable Engine” CIMAC Congress 2001, Hamburg.
- [14] John B. Heywood, McGraw Hill “Internal Combustion Engines”.
- [15] European Commission Directorate General Environment Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market based Instruments.
- [16] Krishnamurthy, M., Carder, D.K., Thompson, G., Gautam, M., “Cost of lower NO_x emissions: Increased CO₂ emissions from heavy-duty diesel engines” *Atmospheric Environment* 41 (2007) 666–675.
- [17] EPA. History of Reducing Air Pollution from Transportation in the United States (U.S.).

ANEXO II

Artículo publicado



Article

Calculating a Drop in Carbon Emissions in the Strait of Gibraltar (Spain) from Domestic Shipping Traffic Caused by the COVID-19 Crisis

Vanessa Durán-Grados ¹, Yolanda Amado-Sánchez ¹, Fátima Calderay-Cayetano ¹, Rubén Rodríguez-Moreno ¹, Emilio Pájaro-Velázquez ¹, Antonio Ramírez-Sánchez ¹, Sofia I. V. Sousa ², Rafael A. O. Nunes ², Maria C. M. Alvim-Ferraz ² and Juan Moreno-Gutiérrez ^{1,3,*}

¹ Campus de Excelencia Internacional del Mar, College of Marine, Nautical and Radioelectronics Engineering, University of Cádiz, 11510, Puerto Real, Spain; vanesa.duran@uca.es (V.D.-G.); yolanda.amado@uca.es (Y.A.-S.); fatima.calderay@uca.es (F.C.-C.); ruben.rodriguezmoreno@uca.es (R.R.-M.); emilio.pajaro@uca.es (E.P.-V.); antonioramirez.sanchez@uca.es (A.R.-S.)

² LEPABE—Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal; sofia.sousa@fe.up.pt (S.S.); raonunes@fe.up.pt (R.A.O.N.); aferraz@fe.up.pt (M.C.M.A.-F.)

³ School of Marine, Nautical and Radioelectronics Engineering, University of Cádiz, Polígono Río San Pedro, 11510 Puerto Real, Spain

* Correspondence: juan.moreno@uca.es

Received: 16 October 2020; Accepted: 9 December 2020; Published: date

Abstract: As a consequence of the COVID-19 pandemic, the Spanish government declared a State of Emergency, and domestic passenger ship traffic was restricted in Spanish ports. This manuscript presents scenarios of emissions from domestic shipping traffic in the seas of the Strait of Gibraltar (Spain) over three months of the COVID-19 pandemic. Emissions were estimated for only 90 days of the pandemic, and two scenarios were studied: emissions while vessels were berthed at the Algeciras Port and emissions as a consequence of the interruption of passenger ship transportation in the Strait of Gibraltar. To this end, the authors' own model was used, which has near zero uncertainties. This model was used for the first time in this study and takes into account both meteorological and sea condition parameters, as well as the efficiency of the propulsion system. The manuscript concentrates on the emissions of greenhouse gases (GHGs), nitrogen oxides (NO_x), sulphur oxides (SO_x), carbon dioxide (CO₂), and particulate matter (PM) from six Ro-Pax ships that ceased to operate. The main finding is that as a consequence of the pandemic, reductions of up to 12% were found in the Strait of Gibraltar in all the pollutants and GHGs when taking into account all international traffic, while the decrease in emissions from domestic traffic only reached 51%.

Keywords: shipping emissions; greenhouse gases; Strait of Gibraltar; COVID-19; SENEM model

1. Introduction

Based on the Order TMA /419/2020 of 18 May [1], starting at 00:00 on 17 March, 2020, passengers on board Ro-Pax passenger ships and ships providing the regular line service between the Spanish peninsula and Ceuta were forbidden from disembarking. For this reason, all the Ro-Pax ferries from Algeciras to Ceuta (Spain) and from Tarifa (Spain) to Tangier (Morocco) were stopped and berthed at the port of Algeciras.

The COVID-19 pandemic resulted in a decrease in maritime shipping activity due to the large drop in the demand for cargo and oil. Many vessels were dry-docked or sailed at reduced speeds to cut fuel consumption [2].

COVID-19 was first identified on 30 December, 2019, and was declared a global pandemic by the World Health Organization (WHO) on 11 March, 2020 [3]. It resulted in drastic changes in energy use, with expected impacts on the emissions of greenhouse gases (GHGs) and pollutants. The changes in emissions associated with the lockdown were entirely due to reductions in the energy demand [4].

In this sense, pollution from ships is a significant contributor to global air pollution, which affects not only the ports themselves, but also nearby coastlines, since it is also carried for long distances over land and sea. The direct emissions from ships (known as precursor pollutants) are mainly comprised of CO₂, NO_x, SO_x, CO, and particulate matter (PM).

SO_x and NO_x emissions are known to exacerbate the secondary formation of fine particulate matter, PM_{2.5} [5]. NO_x emissions from diesel engines also contribute regionally to increasing ozone (O₃) levels. All of these compounds represent a major threat to human health. They are known to be closely related to both mortality and morbidity in young children, and to the respiratory infections and asthma that affect them [6]. For these reasons, pollutant-specific, location-specific, and source-specific models of health impacts are important and must be considered in the design of policies for the control of emissions, as demonstrated by Stefani et al. [7].

Based on inputs of meteorological data and source information like emission rates and stack height, air quality models are designed to characterize primary pollutants that are emitted directly into the atmosphere from anthropogenic sources (ships in this case). The problem is that air quality models and ship emissions inventories present many uncertainties. The use of air quality models entails significant sources of errors from inaccurate measurements, as is the case of PM_{2.5} in epidemiological studies [8]. Thus, exposure assessment depends strongly on the accuracy of the emissions inventory and on the outcomes of the air quality model where a chemical transport model is included [9].

Since there is not yet a clear agreement on the definition of the parameters to be used in the different models, a ship's emissions inventory is a highly debated issue. Ship Traffic, Energy and Environment Model STEEM [10] and Ship Traffic Emission Assessment Model STEAM [11] are the most widely used models. They use a ship's identity, position, speed, and draught at a given time-stamp. These data are employed, together with the ship's technical specifications, to calculate time histories (known as inventories) of estimated fuel consumption and emissions. All of these data can also be obtained on board the vessel; they are compiled and reported daily in what is known as the ship's noon report.

Models were used in this study because, in the case of maritime transport, there are no systems in place for monitoring and quantifying GHG and pollutant emissions in real time. However, in the case of domestic Ro-Pax traffic (vessels that are used for freight vehicle transport alongside passenger accommodation) around the Strait of Gibraltar (North of Morocco included), ships usually prepare their noon reports every day, and the data from these are used to calculate emissions from ships through the models mentioned above.

In inventories of this type, the most difficult factor for calculating emissions is determining the power delivered by the main engine in real time. In the models used to date, this variable is measured exclusively from the recorded speed of the ship. In this sense, the International Maritime Organization IMO [12] proposed a new model, but it has not specified the procedure for the calculation of speed loss coefficients.

In order to reduce the range of uncertainties, this study used the authors' own model named the Ship's Energy Efficiency Model (SENEM) [13]. This model defines the procedure for the calculation of speed loss coefficients.

Because the prime focus is to study the impacts of ship-based emissions on urban air quality and human health in heavy-traffic regions, the objective of the study is to estimate the emissions

from ships (CO₂, NMVOC, CH₂, N₂O NO_x, SO_x, CO, and PM) as accurately as possible over 90 days of the COVID-19 pandemic in waters around the Strait of Gibraltar.

The SENEM model will be presented in more detail in the next subsection.

Concentrations of emissions were found to be four- or five-fold higher on coastlines where ships regularly pass by [14]. On a global scale, between 2007 and 2012, shipping accounted for 15%, 13%, and 2% of the respective annual emissions of NO_x, SO_x, and CO₂ from anthropogenic sources [15]. In the case of the Strait of Gibraltar, 1028 ton/km²/year of CO₂, 25.46 ton/km²/year of NO_x, and 8.20 ton/km²/year of SO_x were emitted in 2007 [16], while in 2017, the emissions reached 1330 ton/km²/year of CO₂, 24 ton/km²/year of NO_x, and 11.60 ton/km²/year of SO_x [17].

The results from the inventories published to date seem to present a high range of uncertainty, mainly because, as the next subsection shows, the calculation of the main engine load factor (LF) value falls within this range of uncertainty. Moreover, in the case of the study of Ro-Pax vessels, the matter of speed is even more complex. For this reason, this paper simulates a detailed analysis of vessel speeds when approaching or exiting ports. Since it would be necessary to simulate data on a port-by-port basis to be able to apply robust assumptions [18], the movements of six Ro-Pax ships were simulated.

Furthermore, the energy consumption and emissions produced by each ship's operation phase were simulated as real cases by a practical algorithm from each ship. These algorithms were used in the estimation of the two most important parameters on voyages: fuel consumption and emissions.

A study was performed of the decrease in emissions resulting from the ships being stopped and the emissions in ports while at berth during the pandemic (90 days). While the calculations of the effects while ships are not sailing were simulated, the effects of ships at berth are real calculations.

This paper describes both the increase in emissions while vessels were berthed at Algeciras Port during the COVID-19 pandemic and the estimated reduction in emissions as a consequence of these six ships not sailing in waters around the Strait of Gibraltar between three Spanish ports (Algeciras, Ceuta, and Tarifa) and Tangier for 90 days.

2. Materials and Methods

Four models were used for the simulation, which was performed through a detailed analysis of on-board data for each situation and navigation mode. According to data from the Automatic Identification System (AIS) in 2017, 82,490 ships (47,365 International Navigation) cruised the Strait of Gibraltar (warships, fishing vessels, tugs, auxiliary boats, and dredgers were not included). The 35,125 domestic voyages were for transporting passengers, cars, trucks, goods, etc. between the Iberian Peninsula and the North of Africa; of these, 13,165 were fast ferries. In this study, 2700 were analyzed because there was less traffic during the months of the lockdown that were studied (second half of March, April, May, and first half of June).

Two primary emission sources are found on every ship: the main engine (ME), which is used for ship propulsion, and the auxiliary engine (AE), which is for generating electricity on board. When a ship is at berth, only the AE is running.

The emissions were evaluated using data (Table 1) from six fast ferries that did not sail in waters around the Strait of Gibraltar for 90 days due to the pandemic.

Table 1. Characteristics of the ships studied and power delivered by auxiliary engines (AEs) for each mode.

Ship Type/Rounds	$P_{reference}$ ME (kW) 1	Total AE (kW)				Speed (knots) 3	Length (m)	Breadth (m)	Draug. (m) ⁴
		Installed	Cruis. 2	Manv. 2	Hot. 2				
A/270	28,800	4800	720	2160	1440	37	101	26.6	4.2
B/450	28,800	4800	720	2160	1440	42	92	26	4.26
C/540	14,800	3600	540	1620	1080	37	83	13	3.2
D/450	28,304	4600	690	2070	1380	35	86	26	3.8

E/540	17,600	4000	600	1800	1200	35	77.5	26	2.72
F/450	20,240	4200	630	1890	1260	35	96	14.6	2.19

¹ ME Power 100% MCR, ²engine load factor applied by Starcrest Vessel Boarding Program, ³ Max. speed ($V_{reference}$), ⁴ Max. Draught(t_{ref})

The emissions were calculated (Equation (2)) by multiplying the energy delivered in kWh by the emission factors (EF) in g/kWh for each pollutant in question: CO₂, CO, NO_x, SO_x, CH₄, N₂O, NMVOC, and PM in this case.

While other models [11,19] for calculating a ship's emissions only take into account the speed of the ship, this study utilized the SENEM, a new model that takes into account the wind direction and speed, wave direction and height, current influence, and waterjet efficiency—parameters that other models do not consider.

2.1. Theory/Calculation

Equation (1) [20] shows the procedure for calculating emissions when the ship is sailing, where the AE is also included.

$$Emissions(g) = \left(\frac{D}{v}\right) [(ME) * EF_{ME} + (AE) * EF_{AE}] \quad (1)$$

where:

Emissions : Total emissions in grams for the pollutant of interest.

D (miles): Distance that the ship travels within the study area.

v (knots): Average speed of the ship.

Activity time (hours): $\left(\frac{D}{v}\right)$.

ME (kW): Maximum continuous rating (MCR) of the main engine.

LF_{ME} (fraction): Load factor of the main engine as a fraction of the MCR.

SFOC: Specific fuel oil consumption in g/kWh.

AE (kW): Maximum continuous rating (MCR) of the auxiliary engine.

LF_{AE} (%) Load factor of the auxiliary engine as a fraction of the MCR.

EF_{ME} (g/kWh): Emission factor for the main engine for the pollutant of interest (this varies by engine type and fuel consumed rather than by activity mode).

EF_{AE} (g/kWh): Emission factor for the auxiliary engine for the pollutant of interest.

As the MCR is known for each engine [21], the most important factor is the calculation of the load factor (LF). This is calculated according to Equation (2), and is necessary for calculating the main engine power delivered in real time (transient power).

$$LF = \frac{P_{transient}}{P_{reference}} \quad (2)$$

where: $P_{reference}$ and $P_{transient}$ are the power at 100% MCR and the instantaneous power for calculation, respectively.

2.1.1. ME Transient Power

For calculating the ME transient power, two options can be applied:

The first is by applying the current STEEM and STEAM models [11,19], where the LF is defined as being dependent only on the speed of the ships.

STEEM [19] uses Equations (2) and (3)

$$P_{transient} = P_{reference} \left(\frac{V_{transient}}{V_{reference}}\right)^3 \quad (3)$$

STEAM [11] uses Equation (4):

$$P_{transient} = \varepsilon_p * P_{installed} \left(\frac{V_{transient}}{V_{reference} + V_{safety}} \right)^3 \quad (4)$$

The IMO [12] uses Equation (5):

$$P_{transient} = \frac{P_{ref} \left(\frac{t_{transient}}{t_{ref}} \right)^{\left(\frac{2}{3}\right)} \left(\frac{V_{transient}}{V_{ref}} \right)^3}{\eta_w \eta_f} \quad (5)$$

where: $P_{transient}$, $V_{transient}$, and $t_{transient}$ are, respectively, the instantaneous power, speed, and draught at time t (all taken from Lloyd's Register of Ships, IHSF); P_{ref} is the reference power at speed V_{ref} and draught t_{ref} ; η_w is the modification of the propulsion efficiency due to weather; and η_f is the modification of the propulsion efficiency due to fouling.

This uses the Admiralty formula, which assumes that power is related to displacement to the power of 2/3.

If the ship is new, then $\eta_f = 1$. If the ship is steaming at the reference draught (t_{ref}), then $t_{transient} = t_{ref}$. For ideal sea and wind conditions, then $\eta_w = 1$. In these cases only, Equation (5) = Equation (3).

The second option involves applying the SENEM model [13], as defined by Equation (6), where the propulsion system efficiency, η_j , was considered as a variable value, and wind direction, wind speed, wave direction, and wave height were included. However, the influence of current was obviated by conducting round voyages and averaging the results for opposite directions.

This model takes into account and quantifies all the variables related to air and sea meteorological conditions, the state of maintenance of the hull and propeller, and the performance of the propulsion system. All of these variables have a direct influence on the power delivered by the main engines.

Because this new model significantly reduces the uncertainties that currently limit confidence in the emissions inventories of ships, its application is a novelty of this study (Equation (6)).

$$P_{transient} = \frac{P_{ref} \left(\frac{t_{transient}}{t_{ref}} \right)^{\left(\frac{2}{3}\right)} \left[\left(\frac{V_{transient} + \Delta V_{wind \text{ and } waves} + \Delta V_{fouling} \pm \Delta V_{current}}{V_{ref}} \right)^n \right]}{\eta_j} \quad (6)$$

where:

$\Delta V_{wind \text{ and } waves}$ = Speed loss due to wind and waves;

$\Delta V_{fouling}$ = Speed loss due to fouling;

$\Delta V_{current}$ Difference between speed on the surface and speed over the sea bottom;

η_j = Efficiency of the propulsion system.

The study was performed in two directions, both taking and not taking into account the meteorological conditions and influence of the propulsion system.

The SENEM model [13] uses the Kwon method to predict speed loss due to added resistance in abnormal weather conditions (irregular waves and wind). This model was applied to the same ships analyzed in this study in 2017, and a value of $\eta_w = 0.95$ was used for the worst weather conditions; this is the same value used to simulate bad weather conditions in this study.

For medium-sized, medium-speed ships such as the Ro-Pax ships in this study, we used $\eta = 3.5$ [22].

The value of η_j (propulsion system efficiency) can be calculated using 1 as a basic value, which corresponds with the maximum efficiency value—usually 60%. From the curve obtained from the supplier, the value of η_j depends on the speed of the ship.

Thus, η_j is the efficiency of the propulsion system (equation of the type $y = a + bx^2$, where y is the efficiency of the propulsion system and x is the speed of the ship).

Because the same ships were studied as in the SENEM model used for validating the model, and a value of $\eta_j = 0.85$ was used for the worst conditions (mode of maneuvering near port), the same value was used for this study.

In this method, the power will depend on η_j and $\frac{v_{transient}}{v_{ref}}$, and therefore, $P_{transient}$ will have a double dependence on the speed of the ship.

For this study, only the $\left(\frac{t_{transient}}{t_{ref}}\right)^{\frac{2}{3}}$ parameter was taken as a constant value.

The weather impact parameter aims to quantify the additional power requirements of the engine in realistic operating conditions. Based on other publications [23], a value of $\eta_w = 0.95$ was used to simulate bad weather conditions.

The frictional resistance of the hull depends on the wetted area of the hull and on the specific frictional resistance coefficient. Friction increases with fouling of the hull surface, e.g., due to the growth of algae, sea grass, barnacles, and other matter. An average increase in total resistance of 9% (constant over time) was applied for all ships [12]. Another study [24] showed that a daily consumption increase of 10% was induced. In Equation (6), a value of $\eta_f = 0.98$ was used.

Because all of the ships analyzed are propelled by a waterjet system, the effect of the propeller's fouling condition, defined in Equation (5), was not taken into account.

Finally, when all the efficiency parameters are defined, Equation (6) shows the global efficiency (η_g) for the worst weather, hull, and performance propulsion system conditions:

$$\eta_g = 0.85 \times 0.95 \times 0.98 = 0.79$$

The fuel consumption and emissions were calculated as a product of the number of round trips (2700 in this case), sailing time per round trip, engine size, engine load factor, and energy consumption/emission factor.

2.1.2. AE Power

The auxiliary power demands vary depending on the mode of operation (i.e., cruising, maneuvering, at berth).

Two ways were used to calculate the energy consumption and emissions for auxiliary engines.

Ships at Sea

When the ships are at sea, the power delivered by the AE depends on the type of ship and the navigation mode. For the case of fast ferries, Table 1 shows the delivered power values for each mode; the LF applied was obtained from the Starcrest Vessel Boarding Program [25].

Ships at Berth

In the case of ships moored at berth, the AE provides the energy they need for moving ramps inside the hold, the refrigeration of containers of goods, air conditioning of the passages, and interior lighting. In this case, energy was only required for interior lighting, and Equation (7) was used.

$$DE = BT \times (P_{delivered}) \times EF \quad (7)$$

where:

DE: Daily emissions (g);

BT: Berthing time (24 h);

$P_{delivered}$: Average power delivered by the AE for each ship (kW);

EF: Emission factor for the pollutant studied (g/kWh).

The emissions during the lockdown were calculated as the total emissions from six ships at berth per day multiplied by ninety days using the bottom-up method according to Equation (5), taking into account that the six ships were berthed for 24 h every day for 90 days. $P_{delivered}$ is described in Table 2 as Power(kW).

Table 2. Total emissions by day and during the COVID-19 lockdown (90 days) of each pollutant from the auxiliary engines (kg) of ships at berth in Algeciras Port.

Ship Type	Power (kW)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NM VOC	CO	SO _x	NO _x	PM
A	190 ¹	2959	0.036	0.132	0.042	0.061	10.48	47.65	1.6
	1440 ²	22,429	0.272	1	0.318	0.46	79.43	342.13	11.48
B	40 ¹	623	0.0075	0.027	0.009	0.0129	2.2	10	0.33
	1440 ²	22,428	0.27	0.972	0.324	0.46	79.2	360	11.88
C	42 ¹	654	0.008	0.029	0.0099	0.013	2.3	10.5	0.35
	1080 ²	16,808	0.2	0.745	0.254	0.33	59.11	269.8	9
D	45 ¹	701	0.0085	0.031	0.01	0.014	2.48	11.28	0.37
	1380 ²	21,493	0.26	0.95	0.30	0.429	76	346	11.34
E	42 ¹	654	0.008	0.029	0.0099	0.013	2.3	10.5	0.35
	1200 ²	18,704	0.228	0.83	0.283	0.37	65.8	300	10
F	40 ¹	623	0.0075	0.027	0.009	0.0129	2.2	10	0.33
	1260 ²	19,624	0.236	0.85	0.283	0.4	69.3	315	10.4
TOTAL Daily ₁		6214	0.0755	0.275	1.84	2.52	21.96	99.93	3.33
TOTAL Daily ₂		121,486	1.466	5.34	15	20.6	428.8	1932.9	64.1
TOTAL ¹		559,260	6.80	24.75	166.30	227.32	1976.4	8993.70	299.7
TOTAL ²		10,933,740	131.9	480.6	1350	1854	38,592	173,961	5769

¹ During the COVID-19 lockdown. ² Normal conditions.

For the second case—ships operating in waters around the Strait of Gibraltar—the SENEM model was applied through simulation.

2.2. Emission Factors

Finally, the total emissions (in g) of each pollutant of interest were obtained by multiplying the energy consumption (kWh) by the EF. Table 3 shows the values for all types of fuel used in these kinds of ships [26].

It is very important to take into account that while mass emissions tend to decrease as vessel speeds and engine loads decrease, emission factors increase. Thus, the EF is not a constant value because it depends on the main engine load factor; for ME load factors of less than 20%, Equation (8) (Table 4) was applied [10]:

$$y = a \times LF^{-x} + b \quad (8)$$

where:

y = emissions in g/kWh;

a = coefficient;

b = intercept;

x = exponent (negative).

Table 3. Typical emission factors for a range of engines and fuel types (g/kWh) (Goldsworthy and Galbally, 2011). While ships were at berth during the pandemic, only marine diesel oil (MDO) was used.

Engine Type	Fuel Type	EMISSION FACTORS (g/kWh)
-------------	-----------	--------------------------

		CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}
MSD Main	HFO	659.3	1.1	11.5	14	1.5	1.46
MSD AUX	HFO	702.6	1.1	12.3	14.7	1.5	1.46
MSD AUX	MDO	661.4	1.1	2.2	13.9	0.38	0.35

Table 4. Factors from Equation (6).

Pollutant	Exponent	Intercept (b)	Coefficient (a)
PM	1.5	0.25	0.0059
NO _x	1.5	10.45	0.1255
CO	1.0	0.15	0.8378
HC	1.5	0.39	0.0667

3. Results

The results were analyzed in two ways: ships at berth in the port of Algeciras and ships sailing through the Strait of Gibraltar in a “no pandemic” case.

In the first case, Table 2 shows the total daily emissions over the 90 days of the COVID-19 pandemic for all the pollutants studied, both while the ships were at berth in the port of Algeciras and under normal conditions (no pandemic) by using the data of the power delivered based on LF values from the Starcrest Vessel Boarding Program. The results for all the pollutants analyzed are based on the emission factor values from Table 5 [27].

Table 5. Emission factors in units of g/kWh (marine diesel oil used).

CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NMVOC	CO	SO _x	NO _x	PM
649	0.008	0.029	0.4	0.54	2.3	10.5	0.35

Figure 1 shows the actual power and energy delivered by the ME, which were obtained per round trip in cruising mode, the mode of maneuvering near port, and the mode of maneuvering into the port, respectively. Equation (5) was used.

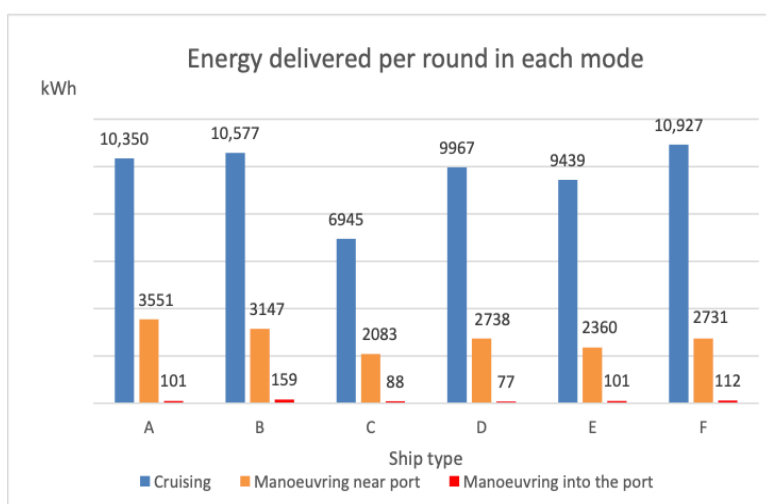


Figure 1. Energy delivered from the main engine (ME) (kWh) per round trip, and mode.

Figure 2 shows the energy consumed by the AE for all modes per round trip, taking into account the average for each navigation mode, with data from on board and Table 1.

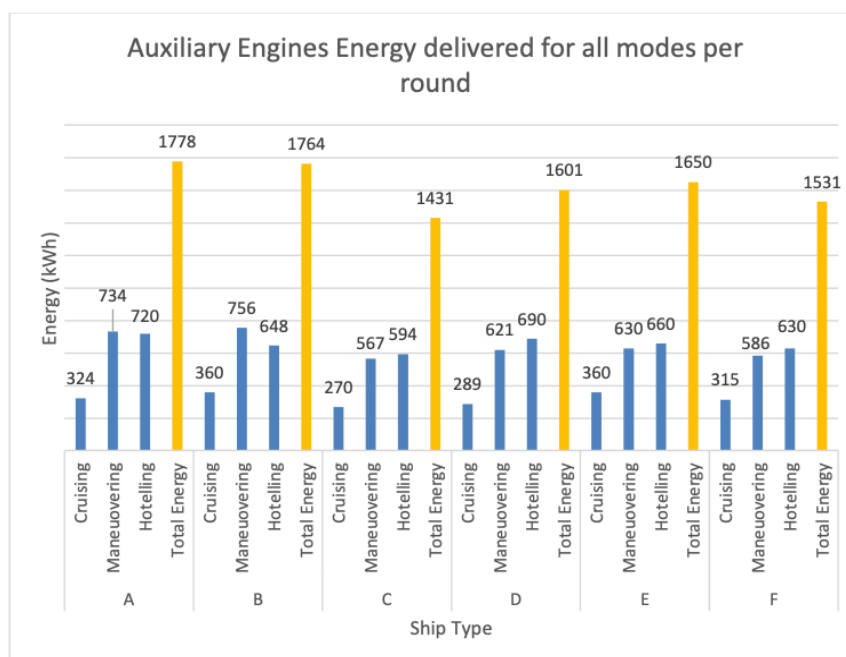


Figure 2. Energy delivered from the AE (kWh) per ship, round trip, and mode.

Figure 3 shows the total energy consumption per round trip for both the ME and AE.

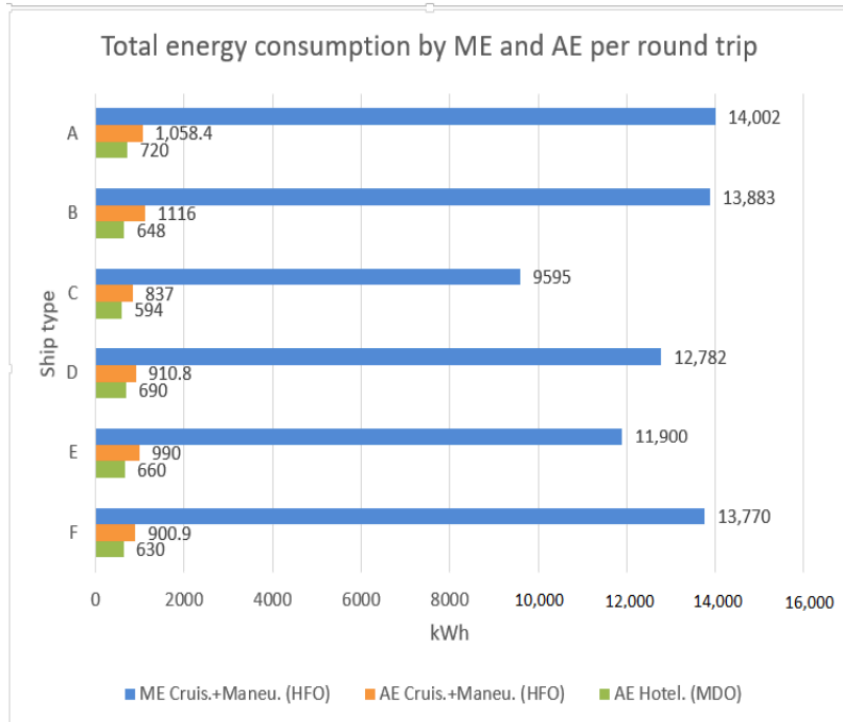


Figure 3. Total energy per round trip in calm conditions for the ME and AE (kWh).

Figure 4 shows the total energy consumption per round trip during the pandemic for heavy fuel oil (HFO) and marine diesel oil (MDO), calculated using Equation (5).

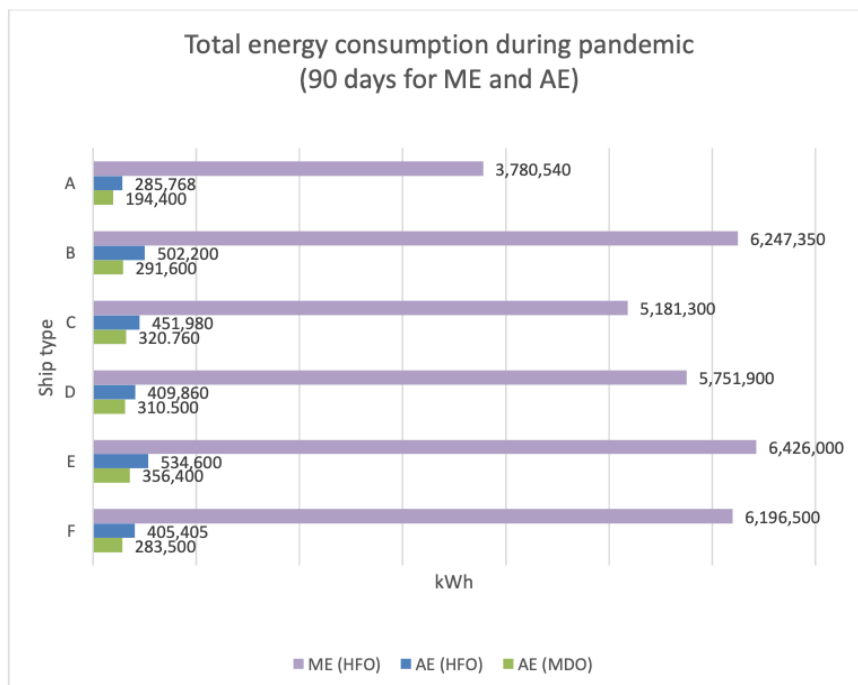


Figure 4. Total energy consumption during the pandemic (90 days) by ME and AE.

Figure 5 shows the total energy consumption during the same time for the ME and AE (kWh), taking into account the worst weather, hull, and performance propulsion system conditions. In this case, Equations (5) and (6) were used.

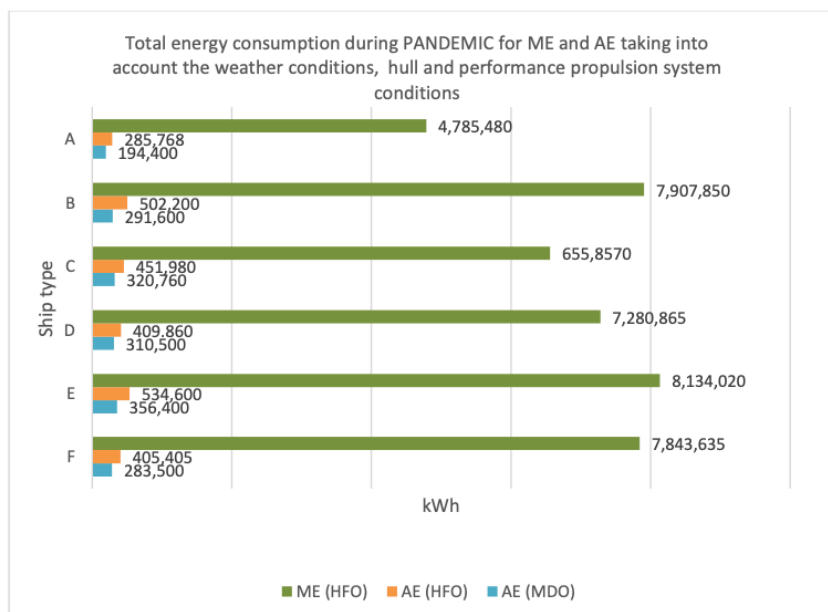


Figure 5. Total energy consumption during the pandemic for ME and AE taking into account the weather, hull, and performance propulsion system conditions”.

Table 6 shows the decrease in total emissions due to domestic shipping traffic not sailing around the waters of the Strait of Gibraltar during the 90 days of the pandemic under normal conditions.

Meanwhile, Table 7 shows the decrease in total emissions (tons) due to domestic shipping traffic not sailing around the waters of the Strait of Gibraltar during the 90 days of the pandemic, taking into account the worst weather, hull, and performance propulsion system conditions.

Table 6. Decrease in total emissions (tons) due to domestic shipping traffic not sailing around the waters of the Strait of Gibraltar during the pandemic (90 days).

TYPE	Fuel Type	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}
A	ME (HFO)	2492.5	4.2	43.5	52.9	5.7	5.5
	AE (HFO)	200.78	0.3	3.5	4.2	0.4	0.4
	AE (MDO)	128.9	0.2	0.4	2.7	0.1	0.1
B	ME (HFO)	4118.9	6.9	71.8	87.5	9.4	9.1
	AE (HFO)	352.8	0.6	6.2	7.4	0.8	0.7
	AE (MDO)	192.9	0.3	0.6	4.1	0.1	0.1
C	ME (HFO)	3416	5.7	59.6	72.5	7.8	7.6
	AE (HFO)	317.6	0.5	5.6	6.6	0.7	0.7
	AE (MDO)	212.2	0.4	0.7	4.5	0.1	0.1
D	ME (HFO)	3792.2	6.3	66.1	80.5	8.6	8.4
	AE (HFO)	288	0.5	5	6	0.6	0.6
	AE (MDO)	205.4	0.3	0.7	4.3	0.1	0.1
E	ME (HFO)	4236.7	7.1	73.9	90	9.6	9.4
	AE (HFO)	375.6	0.6	6.6	7.9	0.8	0.8
	AE (MDO)	235.7	0.4	0.8	5	0.1	0.1
F	ME (HFO)	4085.4	6.8	71.3	86.8	9.3	9

AE (HFO)	284.8	0.4	5	6	0.6	0.6
AE (MDO)	187.5	0.4	0.6	3.9	0.1	0.1
TOTAL ME	18,349.5	37	386.2	470.2	50.4	49
TOTAL AE	6773.9	4.9	35.7	62.5	4.5	4.4
TOTAL	25,123.4	41.9	421.9	532.7	54.9	53.4

Table 7. Decrease in total emissions (tons) due to domestic shipping traffic not sailing around waters of the Strait of Gibraltar during the pandemic (90 days), taking into account the worst weather, hull, and performance propulsion system conditions.

TYPE	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}
TOTAL ME	23,227.2	46.83	488.86	595.1	63.79	62
TOTAL AE	6773.9	4.9	35.7	62.5	4.5	4.4
TOTAL	30,001	51.73	524.56	657.6	68.29	66.4

Finally, Tables 8 and 9 compare the results of this study with others from the literature [16,17] for domestic passenger traffic only.

Table 8. Decreases in total emissions found in two published studies [16,17] and this paper (tons).

Publications	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀
Moreno 90 days	237,786	325.25	2456.5	6231.5	2010.25
Nunes 90 days	285,950	81.31	614.12	1557.87	502.56
COVID-19	30,001	51.73	524.56	657.6	68.22

Table 9. Results from two published studies [16,17] and this paper in the case of one year of the pandemic.

Publications	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀
Moreno (2015)	951,145	1301	9826	24,926	8041
Nunes (2017)	1,143,800	1969.4	9976	20,640	2597.2
COVID-19 (Simulated 2020)	120,004	206.92	2098.24	2630.4	273.16

4. Discussion

This article presents the results of the study that the authors performed in the port of Algeciras and the Strait of Gibraltar (Spain), which covered six Ro-Pax ferries propelled by waterjet systems operating over the course of 90 days. The total emissions from the Ro-Pax ships over 90 days of the COVID-19 pandemic were compared with those emitted under normal conditions.

The emission values from ships at sea decreased substantially during the COVID-19 pandemic. We calculated decreases of 10% for CO₂ compared with Nunes' study [17] and 12% compared with Moreno's study [16], both of which were conducted before the COVID-19 pandemic. For the remaining pollutants, the differences show similar values.

In the case of ships at berth, the differences are greater, with emissions up to 95% lower. This is because when ships are at berth, there is no energy consumption due to the movement of ramps, refrigeration of containers of goods, air conditioning of the passages, etc.; only interior lighting is used.

In the case of ships in all navigation modes, when the propulsion system efficiency, wind direction, wind speed, wave direction, and wave height were considered as variable values, the values found were up to 17% higher for most of the pollutants emitted compared with those under calm conditions. The authors' own model was applied for the first time in this study.

Taking into account all the international traffic around the Strait of Gibraltar, the results show a 12% drop in the pollutants emitted by ships as a result of six ships being docked. Meanwhile, considering all domestic traffic and not only passenger traffic, the decrease in emissions found was 51%.

A study from the European Maritime Safety Agency (EMSA) [28] showed a traffic density map for all the ships, tankers, cargo vessels, and passenger ships in European waters in October 2019 and October 2020. The main conclusion was that traffic in and around EU waters was not heavily affected, apart from the decrease in the number of passenger ships.

5. Conclusions

This study showed that in the port of Algeciras, there was no increase in emissions even though ships were continuously docked during the lockdown (90 days). This is because the energy required by their auxiliary engines is very low when the ships are at berth in comparison with when they are in an operating mode.

For the ships sailing in waters around the Strait of Gibraltar, the results obtained suggest that domestic traffic through the Strait of Gibraltar has great importance for both energy consumption by and emissions from maritime transport. As a result of only six Ro-Pax vessels being inactive, the emissions of some pollutants decreased by up to 12% when taking into consideration all the traffic around the Strait of Gibraltar.

Author Contributions: Methodology, V.D.-G.; writing—review and editing, J.M.-G.; resources, Y.A.-S. and F.C.-C.; original draft preparation R.R.-M., E.P.-V. and A.R.-S.; formal analysis S.S., R.A.O.N. and M.C.M.A.-F.

Funding: This research was funded by Consejería de Salud, Junta de Andalucía, Spain: 0094 2017.

Acknowledgments: This work was financially supported by: project UIDB/00511/2020 of the Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy – LEPABE - funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC) and project EMISSHIP PTDC/CTA-AMB/32201/2017, funded by FEDER funds through COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and by national funds (PIDDAC) through FCT/MCTES. Rafael A.O. Nunes thanks the individual research grant SFRH/BD/146159/2019, funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT). Sofia I.V. Sousa thanks the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) for the financial support of her work contract through the Scientific Employment Stimulus - Individual Call - CEECIND/02477/2017.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. BOE núm. 141, de 19 de mayo de 2020, Páginas 33496 a 33503. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. BOE-A-2020-5125. Available online: <https://www.boe.es/eli/es/o/2020/05/18/tma419> (accessed on 30 April 2020).
2. Teter, J. The Covid-19 Crisis and Clean Energy Progress. Tracking Transport. Tracking Clean Energy Progress. 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/the-covid-19-crisis-and-clean-energy-progress> (accessed on 24 June 2020).
3. Cucinotta, D.; Vanelli, M. WHO Declares COVID-19 a Pandemic. *Acta Biomed.* **2020**, *91*, 157–160. doi:10.23750/abm.v91i1.9397.3
4. Le Quéré, C.; Jackson, R.B.; Jones, M.W.; Smith, A.J.P.; Abernethy, S.; Andrew, R.M.; De-Gol, A.J.; Willis, D.R.; Shan, Y.; Canadell, J.G.; et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 647–653. doi:10.1038/s41558-020-0797-x.
5. Deniz, C.; Durmuşoğlu, Y. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey. *Sci. Total. Environ.* **2008**, *390*, 255–261. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.09.033.
6. World Health Organization. *Health Indicators of Sustainable Energy in the Context of the Rio+20 UN Conference on Sustainable Development. Initial Findings from a WHO Expert Consultation*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2012.
7. Penn, S.L.; Arunachalam, S.; Woody, M.C.; Heiger-Bernays, W.; Tripodis, Y.; Levy, J.I. Estimating State-Specific Contributions to PM 2.5 - and O₃ -Related Health Burden from Residential Combustion and Electricity Generating Unit Emissions in the United States. *Environ. Health Perspect.* **2017**, *125*, 324–332. doi:10.1289/ehp550.

8. Matthias, V.; Bewersdorff, I.; Aulinger, A.; Quante, M. The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. *Environ. Pollut.* **2010**, *158*, 2241–2250, doi:10.1016/j.envpol.2010.02.013.
9. Müller, D.; Uibel, S.; Takemura, M.; Groneberg, D.A.; Groneberg, D.A. Ships, ports and particulate air pollution - an analysis of recent studies. *J. Occup. Med. Toxicol.* **2011**, *6*, 31, doi:10.1186/1745-6673-6-31.
10. EPA-420-R-10-013. Proposal to Designate an Emission Control Area. 2010. Available online: <http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/ci/420r10013.pdf> (accessed on 15 April 2020).
11. Jalkanen, J.P.; Brink, A.; Kalli, J.; Pettersson, H.; Kukkonen, J.; Stipa, T. Modelling System for the Exhaust Emissions of Marine Traffic and its Application in the Baltic Sea Area. *Atmos. Chem. Phys.* **2009**, *9*, 9209–9223.
12. Smith, W.P.; Jalkanen, J.P.; Anderson, B.A.; Corbett, J.J.; Faber, J.; Hanayama, S.; O’Keeffe, E.; Parker, S.; Johansson, L.; Aldous, L.; et al. *Third IMO GHG Study*; International Maritime Organization (IMO): London, UK, June 2014.
13. Moreno-Gutiérrez, J.; Durán-Grados, V. Calculating ships’ real emissions of pollutants and greenhouse gases: Towards zero uncertainties. *Sci. Total Environ.* **2021**, *750*, 141471, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141471.
14. Endresen, Øyvind; Sjørgård, E.; Behrens, H.L.; Brett, P.O.; Isaksen, I.S.A. A historical reconstruction of ships’ fuel consumption and emissions. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **2007**, *112*, 301, doi:10.1029/2006jd007630.
15. European Climate Pact. Energetic Strategy 2030. Available online: <https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/pact.2020> (25 May 2020).
16. Moreno-Gutiérrez, J.; Calderay, F.; Saborido, N.; Boile, M.; Valero, R.R.; Durán-Grados, V. Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: A comparative analysis of current methods. *Energy* **2015**, *86*, 603–616, doi:10.1016/j.energy.2015.04.083.
17. Nunes, R.A.O.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Martins, F.G.; Calderay-Cayetano, F.; Durán-Grados, V.; Moreno-Gutiérrez, J.; Jalkanen, J.-P.; Hannuniemi, H.; Sousa, S. Shipping emissions in the Iberian Peninsula and the impacts on air quality. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **2020**, *20*, 9473–9489, doi:10.5194/acp-20-9473-2020.
18. Defra. *UK Ship Emissions Inventory*; Final Report November; Defra: Marsham Street, London, 2010.
19. U.S. EPA. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2012*; U.S. EPA: Washington, DC, USA, 2014.
20. Trozzi, C.; Lauretis, R. *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2013.
21. Eyring, V.; Köhler, H.W.; Van Aardenne, J.; Lauer, A. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **2005**, *110*, 110, doi:10.1029/2004jd005619.
22. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, Denmark. Basic Principles of Ship Propulsion. December 2011. Available online: <https://spain.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider10/sistemas-propulsivos-marinos/basic-principles-of-ship-propulsion.pdf?sfvrsn=2> (1 April 2020).
23. Durán-Grados, V.; Mejías, J.; Musina, L.; Moreno-Gutiérrez, J. The influence of the waterjet propulsion system on the ships’ energy consumption and emissions inventories. *Sci. Total Environ.* **2018**, *496–509*, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.291.
24. Luo, S.; Ma, N.; Hiraakawa, Y. Evaluation of resistance increase and speed loss of a ship in wind and waves. *J. Ocean Eng. Sci.* **2016**, *1*, 212–218, doi:10.1016/j.joes.2016.04.001.
25. Starcrest Consulting Group, LLC. *Port-Wide Baseline Air Emissions Inventory*; Starcrest Consulting Group, LLC.: Port of Los Angeles, CA, USA, 2005.
26. Goldsworthy, L.C.; Renilson, M.R. Ship Engine Exhaust Emission Estimates for Port of Brisbane. *Air Qual. Clim. Chang.* **2013**, *47*, 26–36.
27. ENTEC 2002 and IVL 2004 Auxiliary Engine Emission Factors. IVL. Methodology for Calculating Emissions from Ships: Update on Emission Factors 2004. https://www.researchgate.net/publication/237764562_Methodology_for_calculating_emissions_from_ship_s_1_Update_of_emission_factors (accessed on 10 December 2020).
28. EMSA. *COVID-19—Impact on Shipping*; European Maritime Safety Agency. Available online: <http://www.emsa.europa.eu> (accessed on 10 December 2020).

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ANEXO III

Artículo publicado



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data



Juan Moreno-Gutiérrez^{a,*}, Emilio Pájaro-Velázquez^a, Yolanda Amado-Sánchez^a, Rubén Rodríguez-Moreno^a, Fátima Calderay-Cayetano^b, Vanesa Durán-Grados^a

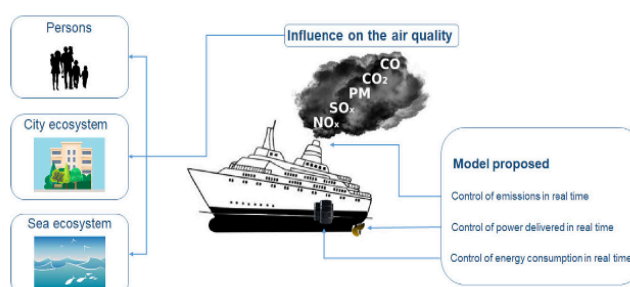
^a University College of Marine, Nautical and Radio-Electronic Engineering, Energy Efficiency in Maritime Transport Research Group, University of Cadiz, Campus de Excelencia Internacional del Mar, Spain

^b Superior College of Engineering, Energy Efficiency in Maritime Transport Research Group, University of Cadiz, Campus de Excelencia Internacional del Mar, Spain

HIGHLIGHTS

- Ships' energy and emission inventories are subject to many significant uncertainties.
- Models for calculating ship's energy and emissions in real-time have been proposed.
- Models for monitoring delivered power in real-time have been proposed.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 July 2018

Received in revised form 3 September 2018

Accepted 3 September 2018

Available online 05 September 2018

Editor: D. Barcelo

ABSTRACT

With the aim of more reliably measuring ships' fuel consumption and emissions several different estimation methods have been put forward and are in use but there is ongoing debate still on the best way to measure maritime emissions. Fuel and emissions monitoring are already a common practice in the shipping industry. But there are currently neither harmonised guidelines nor legal requirements that clearly define the method and the rules to follow to monitor on-board fuel consumption for each situation during navigation.

In this context, this article describes and compares four existing methods (EPA, IMO, Jalkanen and MAN) for calculating energy consumption and emissions, and presents a more realistic method, based on a case study. The purpose is to examine the differences between all of these methods, in order to propose the most suitable method

Abbreviations: AE, auxiliary engine; AIS, automatic identification system; Bottom-up, inventory methodology type; Cruise mode emissions, in the near-port analysis these are produced while the ship is within 25 nautical miles of the end of the SRZ lanes; Dwt, deadweight ton; EEA, European Environment Agency; EF, emission factor; ENTEC, Environmental Engineering Consultancy; EPA, Environmental Protection Agency (USA); GHG, greenhouse gas; HFO, heavy fuel oil; HOTELLING, this provisioning operation (also known as dwelling) takes place while the vessel is docked or anchored near a dock; HSD, high speed diesel (engine type); IHS, Register of Ships Directory; IMO, International Maritime Organization; LF, load factor (percentage of the engine's total MCR power); LRIT, long range identification and tracking of vessels; MANOEUVRING, these are operations carried out in close proximity to the dock; IN PORT (SRZ), Manoeuvring that occurs within Port at limited speed; MCR, maximum continuous rating; MDO, marine diesel oil; MEPC, Marine Environment Protection Committee (IMO); ME, main engine; MFO, medium fuel oil M; MRV, monitoring, reporting and verification emissions; MSD, medium speed diesel (engine type); MW, mega watts; nm, nautical mile; Noon Report, daily on-board data sheet; PM, particulate matter; ROB, fuel oil remaining; RoPax, ship type designed principally for freight vehicle transport (roll-on) but with accommodation for passengers; RoRo, roll-on roll-off vessels that are used to carry wheeled cargo; SFOC, specific fuel oil consumption; SRZ, speed-restricted zone; SSD, slow speed diesel (engine type); tonne, a metric unit of mass equal to 1000 kg, also known as a metric ton.

* Corresponding author.

E-mail address: juan.moreno@uca.es (J. Moreno-Gutiérrez).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>
0048-9697/© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

Eficiencia energética en el transporte marítimo. Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

576

J. Moreno-Gutiérrez et al. / Science of the Total Environment 650 (2019) 575–584

Keywords:
Shipping energy
Shipping emissions
Ro-Pax
Ship energy load factors
Emission factors

of obtaining the data needed for better energy management, and a method that can be applied to any type of ship. The case study was carried out on Ro-Pax ships, comparing these four different methods through the application of a bottom-up integrated system approach. The study describes in detail and applies the most complete methodology for calculating energy consumption and emissions during cruising, operating in a Speed Reduction Zone (SRZ), manoeuvring and berthing. Application of the new improved method proposed in this paper could be the first step in implementing operational measures for detecting both abnormal high emissions and abnormal fuel consumption. The application of this method does not, in itself, reduce fuel use or improve efficiency, but it should be the necessary first step to establish uniform operational measures that will improve the management of energy on board ship and monitor accurately the performance of the fleet.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Shipping-related emissions are one of the major contributors to global air pollution, especially in coastal areas (Viana et al., 2014). These emissions contribute significantly to air pollution in the vicinity of harbours (Eyring et al., 2010); another significant finding is that over 70% of total ship emissions can spread up to 400 km inland. They can also cause an increase in the levels and composition of both particulate and gaseous pollutants, as well as the formation of new particles, in densely populated regions (González et al., 2011).

It is estimated that particles emitted specifically by ships caused around 87,000 cardiopulmonary and lung-cancer deaths each year worldwide (Winebrake et al., 2009). This atmospheric pollution has particularly strong and consistent associations with both mortality and morbidity, and with respiratory infections and asthma in young children (WHO, 2012). Caiazzo et al. (2013) estimated that shipping contributed 3500 premature deaths from PM_{2.5} and O₃ pollution across the US in 2013, while Huan et al. (2016) estimated 14,500–37,500 premature deaths per year due to shipping across East Asia. The WHO in 2013 considered that the relationship between PM emitted as primary pollutants and deaths produced must be expressed as a supra-linear function, whereas other authors (Penn et al., 2017; Krewski et al., 2009 and Lepeule et al., 2012) assume this relationship to be a linear function.

In this study, the origin of these pollutants emitted is essentially the combustion of fuel by the ship's engines. A detailed analysis is made of four existing methods and a new method is proposed, that will provide the operators of a ship with quantified information on the pollutants emitted by the ship in real time, so that they may also be aware of the number of deaths that may be produced by this pollution.

The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Annex VI Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships (which includes 18 regulations, from application to fuel oil availability and quality), was established by the International Maritime Organization (IMO) as the global strategy for mitigating shipping emissions (Ling-Chin and Roskilly, 2016); it defines the methodology to be used for recording the energy and emissions inventories of ships. However, the issue of how best to calculate a ship's emission inventory is much debated, and contradictory papers have been published over the last ten years (Durán-Grados et al., 2018).

In the present study, the authors propose a new method based on the other four which removes all of these uncertainties, since it is based on a bottom-up method, it applies an original approach to estimating a ship's energy consumption and emissions from its operations each day during each voyage, using operational data, and it gives calculated emissions of greenhouse gases (GHG's) and particulate pollutants, instead of analyses carried out using calculations of generalised maritime activity for categories of ships. The proposed method will also be useful for application in the new concept of the **Monitoring, Reporting and Verification (MRV) of emissions** by Maritime Transport (MRV Shipping Regulation, 2015).

This proposed method removes the uncertainty attributable to the use of fuel oil consumption average values and represents a substantial improvement in the reliability and accuracy of aggregate data on shipping activity, energy demand and emissions. Four different methods and equations for calculating energy consumption (possibly using oil flowmeters by consumers) and emissions have been studied and compared, and the results are used to propose an original method that can be applied to all types of ships. The validity of fuel consumption should be compared on a periodic basis through comparison with the fuel figures derived from flowmeters (if available) and tank soundings. The ship operator's maintenance records should provide guidance on comparison frequency.

As an illustrative case study, the existing and proposed methods have been applied to a Ro-Pax ship operating in the waters of the Strait of Gibraltar (Spain), no shallow waters and no ECA (Environmental Control Area) transit.

The proposed models are based on theoretical emission factors like the other inventories published to date, but operators are able to perform on-board tests to calculate the deviation between the theoretical and actual emission factors. Furthermore the method proposed here calculates the fuel consumption for each category of ship's speed.

Given that the models of Krewski et al. (2009) and Lepeule et al. (2012) use a direct relationship between mortality and the precursor pollutants (NO_x, SO_x and PM), in tons, emitted by ships, each shipping zone and type of shipping activity requires careful analysis, because the emission impacts of specific ships and specific routes differ quite significantly and will depend on a range of factors: route distance, ship capacity, service speed, engine power, average work load, type of fuel used, and fuel consumption.

This clearly suggests that each type of maritime transport service has to be evaluated individually (Jalkanen et al., 2009); and that is the approach taken here.

In order to measure as precisely as possible the amount of pollutants emitted to the atmosphere and, given the proximity to the coastal area in which the pollutants are emitted (in the case study the ships always travel in fixed lanes, no further than 13 nm from each port), the results from applying the proposed methods may help to define the air quality model in the study area. This is because, in the case of Maritime Transport, such assessments are based on air quality dispersion models in which the amounts of primary pollutants (CO₂, NO_x, SO_x, CO and PM) that are emitted directly into the atmosphere are calculated by a bottom-up approach (inventories compiled from ship activity records and activity-based emission factors for different ship types); these data serve as the main input for the models (Matthias et al., 2010). The problem is that both air quality models and ships' emission inventories present many uncertainties. The method proposed in this study reduces scientific uncertainties in respect of emissions inventories and may help to define the air quality model in the study area more precisely.

Regarding our case study, the significance of this type of shipping activity in this area is clearly evident from the total fuel consumption by

maritime traffic in the Strait of Gibraltar: in 2007 it amounted to 290,000 t. Domestic traffic of Ro-Ro and Ro-Pax ferries accounted for 46% (134,810 t consumed) of this, and only while operating in cruising mode (Moreno-Gutiérrez et al., 2015).

Four energy and emission calculation methods were studied and compared for a series of complete individual voyages of a Ro-Pax ship in the Strait of Gibraltar, from leaving dock at the Port of Algeciras (Spain) to docking at the Port of Tangier (Morocco). The study took into account the ship's cruising speed, its reduced speed near to port, and the low-speed manoeuvring in port and berthing stages. The influences of currents, waves, wind, hull/propeller fouling, trim, cargo load and propulsion system efficiency (from the on-board database) were used for the application of the IMO method.

This could be the first step for monitoring accurately the performance of the fleet; it could, for instance, detect abnormal high emitters, thus providing information to the relevant authorities on the possible installation of equipment tampering and poor durability of pollution control systems fitted to the ship. This topic has been proposed by the European Commission for research in its H2020 projects.

2. Methodology

2.1. Description of the method

The so-called bottom-up, or activity-based method, was used in this study. The object of this method, applicable to all types of ship, is to estimate the emissions of each main pollutant by a particular ship, on a day-by-day basis, by accurately calculating its energy consumption. The method needs information on the ship's characteristics (vessel type and size, engine type, fuel type, total power installed and 100% MCR for main and auxiliary engines,) and movements, as well as the corresponding fuel consumption figures and emission factors. The approach allows many possible variants, mainly depending on how the set of inputs is obtained and what models or other assumptions are used (David Segersson, 2013). In this case study, only data from the Ro-Pax Noon Report completed on board was used, and no AIS data was used. To date all models of emissions inventories previously published have used the AIS system that has many uncertainties (Smith et al., 2014), Table 1.

The method proposed by the authors uses the Goldsworthy and Galbally (2011) method for calculating Emission Factors, the Jalkanen et al. (2009) calculation for Specific Fuel Oil Consumption, the Basic Principles of Ship Propulsion (2012) model for defining a ship's power and speed relationship, and the IMO method for the calculation of actual main engine power. This method guarantees the highest level of data consistency and tries to serve as a first step towards a regulation on emissions reduction and can only be guaranteed if emissions data is easy to collect, survey and verify.

The data for previous years are unreliable due to uncertainty stemming from the ship activity data, essentially because of the lack of

satellite AIS data. Therefore that activity data has not been used in this study, because better information is available from the ship's Noon Reports (Daily on-board data sheet), Table 1.

Three primary sources of emission can be found on a ship: the main engine (ME), the auxiliary engines (AE) and the thermal boilers. The emissions from the boilers are the least significant and depend heavily on their size and the extent of their use. On container vessels, boilers are usually used for auxiliary hotel loads, whereas on crude oil lightering vessels the boilers are used when discharging the crude oil. Given that an oil boiler is not used on board the ship in the case studied, only energy consumption and emissions from the main and auxiliary engines, are quantified in this study.

Energy consumption and emissions from the main propulsion engine(s) ME(s) vary as a function of the engine's rated power output, load factor and build year. The main engine power output and load factor vary over time as a result of the ship's operational mode (e.g. at berth, anchoring, manoeuvring, reduced speed mode, cruising mode) (Aldous et al., 2013).

The bottom-up model applied in this study calculates these specifics (main engine power output and load factor) for each operational mode of the ship and for each trip. Energy consumption and emissions by the AEs vary as a function of auxiliary power demand (typically changing with each vessel operating mode), auxiliary engine rated power output, load factor and the engine build year.

Because the voyages in both directions (opposing) were taking place over short periods of time, the wind direction, wind speed, wave direction and wave height were not taken into account.

This study first calculates sea transport emission factors for GHG and pollutants (CO₂, CO, NO_x, SO_x), and PM emissions, as well as fuel consumption. In this case, a specific Ro-Pax ferry serving the sea routes connecting mainland Southern Spain and Northern Africa was studied over a period of 2 months in 2017. It provided results from the application of four different methods (EPA, 2000; Smith et al., 2014; Basic Principles of Ship Propulsion, 2012 and Jalkanen et al., 2009). Based on these methods, a new method has been proposed by the authors, which is a combination of all four. The quantity of fuel consumed was compared with data from on-board records. Because the fuel consumption data is obtained from changes in tank levels, the results for the four methods show differences greater than 20% compared with the calculation using the new method proposed. Thereafter, the overall total levels of CO₂, CO, NO_x, SO_x and PM emissions and fuel consumption are calculated per voyage/trip.

The study was carried out on four different operational modes of the ship studied, for each complete voyage from/to each Port:

1. Cruising (for between 0.98 and 1.25 h, on-board database).
2. Slow steaming, in Speed Restriction Zones (1 mi at 12 knots, on-board database).
3. Manoeuvring into port (0.22 h at 9 knots, on-board database).

Table 1
Comparison between uncertainties from using the AIS system and the new method proposed.

Uncertainties, quoted from Third IMO GHG Study, 2014	Proposed model
The uncertainties (particularly AIS data) remain, particularly in the estimation of the total number of active ships and the allocation of ships or ship voyages between domestic and international shipping.	The use of the models proposed in this paper removes any uncertainty attributable to the use of average values from AIS data.
In cases where data from AIS are missing, values are estimated either from interpolation or by referencing another publicly available data source.	No missing data in this study
It has recognized several ships for which there is no corresponding IHSF and activity data. Ships from domestic traffic are included in all emissions, but with high uncertainty because their technical characteristics cannot be given.	This problem is not possible in this proposal because only on-board data are used
The environmental conditions are not reflected to their full extent in the AIS-based modelling. It fails to take into account that the fuel consumption and emissions can easily double or triple in strong wind/bad weather conditions.	All the models proposed here take into account weather conditions and the condition of the ship's hull and propeller (data from on-board).
Uncertainty level (10%) within the Monitoring Plan for fuel oil measurement by manual sounding	Not applicable in this study

Eficiencia energética en el transporte marítimo. Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

578

J. Moreno-Gutiérrez et al. / Science of the Total Environment 650 (2019) 575–584

4. Arrival at and departure from berth (0.083 h at 3.1% LF/0.083 h at 3.9% LF, respectively, on-board database).

Average time per voyage: 2 h 10 min
Average distance per voyage: 18.5 mi
Number of voyages analysed: 405
Number of voyages per year: 2,400

The on-board database (from the Noon Reports) includes the following parameters:

- ACTUAL SPEED FOR EACH MODE
- MAXIMUM DESIGN SPEED at 100% MCR: 19.2 knots
- MAXIMUM DRAUGHT FOR FULL LOAD [m]: 5.570 m
- DRAUGHT FOR EACH MODE [m]
- DWT: 4030 t
- VOYAGE DISTANCE SAILED
- SPECIFIC FUEL OIL CONSUMPTION (SFOC) BASE: 0.213 g/kWh and 0.210 g/kWh for RO and MDO respectively. Depending on the voyage stage, both values will be used as the base for the application of Eqs. (6) and (7).
- SPEED OVER GROUND FOR EACH MODE
- SPEED THROUGH THE WATER FOR EACH MODE
- TOTAL INSTALLED POWER Main engines (2 × 5850 kW, 100% MCR) and auxiliary engines (2500 kW, 100% MCR)
- TIME IN PORT
- TIME SAILING (Cruising, reduced speed, manoeuvring, arrival and departure)

TYPE OF FUEL FOR EACH SITUATION: as stated in the on-board design guide, the type of fuel used is RO for the main and auxiliary engines and MDO for the auxiliary engines (only in port). As stated in the on-board database, 1978 kg of HFO and 168.5 kg of MGO were consumed in each trip.

Statistical data values have been inserted in Tables 20 and 21. The sample size was 160.

The bottom-up method usually provides an initial per-ship estimation of observed activity, energy consumption and emissions, but only on ships that appear concurrently in both the IHSF and AIS databases. This method combines activity data (derived from AIS and LRIT raw data sources) and technical data (derived from IHS, see Eqs. (1) and (2)). This method has several uncertainties. Our main aim is to reduce these uncertainties by applying explicit quality control to calculate fuel use and emissions using the technical details of each specific vessel.

One significant uncertainty is the calculation of the LF of the ME (see Eq. (3)), a second concerns the equations used for calculating fuel consumption (see Eqs. (6) and (7)) and a third is the value of the EF (see Eq. (8)) used for calculating the total emissions per pollutant. Both parameters are taken as constant values in most previous studies but in actual fact, they both depend on the specific LF, of both the ME and AE.

One important contribution of the proposed method to reducing uncertainty is the direct observation of activity data for each individual vessel, e.g. speed and draught.

On this point, the power output of the main engines is dependent on the propulsion speed of the ship (Eq. (3)), under the assumption that friction parameters are ship-specific constants. It should be noted that this method only requires knowledge of two parameters: power and ship speed at 100% MCR from the on-board test. However, Jalkanen et al. (2009) also introduce a safety margin of 0.5 knots to account for ship speeds, as recorded in the AIS (see Eq. (4)), that sometimes exceed the stated maximum. In the study described here, it was not necessary to use the AIS data because the Noon Report was used, as already stated in this methodology section. The Noon Report data represent a low resolution dataset (the sampling frequency is approximately every 24 h) from which it is possible to extract the principal variables required to define a ship's performance in terms of fuel consumption. Furthermore, a ship's actual performance needs to be measured in order to assess the fuel savings that may be achieved from management and technological interventions (Trozzi and de Lauretis, 2013), Table 2.

The methodology used here calculates the total emissions and energy consumption by summing the emissions on a trip-by-trip basis. A single trip was considered to be from when the ship was at berth in the port of origin (A), up to the time of its departure from the port of destination (B). The energy consumption and the emissions are expressed as follows:

- During docking, manoeuvring, departure from port A
- During docking, manoeuvring, arrival in port B
- During manoeuvring into port A
- During manoeuvring into port B
- During slow steaming, in SRZ zone on leaving port A
- During slow steaming, in SRZ zone on approaching port B
- During cruising

The same sequence from Port B to Port A was also analysed.

2.2. General equations to use

The use of configurable expressions makes the emission calculations very flexible. For most users, the expressions already provided in the system will be the ones they use for the calculations. It should be noted that the methods currently used have been chosen based on the available input data.

Eqs. (1), (2) and (3) have been used in all the ship energy and emissions inventories published to date. This approach is consistent with the methodology proposed by the EEA (Trozzi and de Lauretis, 2013) and the methodology outlined by the U.S. EPA-420-R-10-013 (2010). Both methodologies usually require use of both the AIS system to calculate the activity time and the Lloyd's Register (IHS Fairplay) data for the ships' characteristics (Andersen et al., 2005).

In Eq. (1), ME signifies the Maximum Continuous Rating (MCR) for a main engine when an energy and emission inventory is applied, for a specific zone. This data is extracted from the IHS Fairplay for each ship. The problem lies in knowing or calculating the LF value. Although a ratio of 80% at sea to 20% while manoeuvring is common in the

Table 2
Comparison between all the methods.

Method	Power delivered	SFOC	Emission factor	Relation-ship between speed and power, n
EPA	$P_{transient} = P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n$	Constant value depending on the type of engine	ARB, ENTEC (2002)	Constant value, n = 3
IMO	$P_{transient} = \frac{P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^a}{\eta_{br} \eta_r}$	Variable (Eqs. (6) and (7))	IMO	Constant value, n = 3
Jalkanen	$P_{transient} = E_p * P_{installed} \left(\frac{V_{transient}}{V_{design} + V_{steer}} \right)^n$	Variable (Eqs. (6) and (7))	ENTEC (2002)	Constant value, n = 3
MAN	$P_{transient} = P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n$	Constant value depending on type of engine	NA	Variable depending on the type of ship
Proposed	$P_{transient} = \frac{P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^a}{\eta_{br} \eta_r}$	Variable (Eqs. (6) and (7))	Compilation of ARB, ENTEC (2002), EMEP/EEA and IPCC	Variable depending on the type of ship

literature [EMEP/EEA, 2016], in Eq. (3) most authors suggest that $n = 3$ be used for all types of ship and for all types of operating mode.

In a previous study (Basic Principles of Ship Propulsion, 2012), it suggested that the exponent “n” should be expressed as a variable value that depends on the type of ship when a propeller is used as the propulsion system. The use of Eq. (4) makes sense if the AIS system is used but it is not recommended when Noon Reports are used, given that ship speed is data collected on-board and in real time.

Eq. (5) from the Smith et al. (2014) introduces additional parameters (draught, propulsion efficiency due to weather, and the modification of propulsion efficiency due to fouling) for the calculation of the transient power when the ship is propelled by propellers, but it also uses the constant value of $n = 3$.

If more detailed information about a ship's characteristics is available, it is evident that more specific expressions that make use of this should be implemented in order to improve the calculations. An example of this would be to include dependency on engine load in emission factors for pollutants (Eq. (8)) and specific fuel consumption (Eqs. (6) and (7)), both of which are taken as constant values in the existing methods.

The method proposed in this paper uses Eq. (5), taking into account that “n” is a variable value which depends on the type of ship. All the variables shown in this equation can be taken from on-board data.

2.2.1. Calculation of energy consumption

$$Energy = \frac{D}{v} [(ME.LF_{ME}.SFOC) + (AE.LF_{AE}.SFOC)] \quad (1)$$

where:

- D (miles): Distance that the ship travels within the study area
- v (knots): Average speed of the ship
- Activity time: $\left(\frac{D}{v}\right)$ (hours)
- ME (kW): Maximum continuous rating (MCR) for a main engine.
- LF_{ME} (fraction): Load factor for a main engine as a fraction of the MCR
- AE(kW): Maximum continuous rating (MCR) for an auxiliary engine
- LF_{AE} (%): Load factor for an auxiliary engine as a fraction of the MCR

2.2.2. Calculation of total emissions

$$Emissions = [(ME.Energy).EF_{ME} + (AE.Energy).EF_{AE}] \quad (2)$$

where:

- ME Energy and AE Energy(kWh) : ME, LF_{ME} and AE, LF_{ME} from Eq. (1)
- EF_{ME} ($g[kWh]^{-1}$): Emission factor for a main engine, for the pollutant in question (varies by engine type and fuel consumed rather than by activity mode)
- EF_{AE} ($g[kWh]^{-1}$): Emission factor for an auxiliary engine, for the pollutant in question.

2.2.3. Calculation of load factors

The general equation for calculating the Main Engine Load factor is described in Eq. (3)

$$LF = \frac{P_{transient}}{P_1} P_{transient} = P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n \quad (3)$$

where:

- P_1 and V_1 are power and ship speed respectively at 100% MCR from the on-board test (Winebrake et al., 2009); $V_{transient}$ is actual ship speed; $P_{transient}$ is the instantaneous power for calculation.

$n =$ the constant ship speed coefficient and represents the relationship between speed and power. EPA-420-R-10-013 (2010) uses a constant value of $n = 3$ for all types of ships.

However, the relationship between a ship's power and speed often results in a higher power (n) than three. Usually, the relationship used for estimating the LF for MAN Diesel and Turbo MEs (2012) is as follows:

- For large, high-speed ships such as container vessels: $n = 4.0$.
- For medium-sized, medium-speed ships such as feeder container ships, reefers, Ro-Ro ships, etc.: $n = 3.5$.
- For low-speed ships such as tankers and bulk carriers: $n = 3.2$.

Since this study was designed for a Ro-Pax ship, a value of $n = 3.5$ is used.

2.2.4. Calculation of power transient

Jalkanen et al. (2009) proposes Eq. (4) to calculate the power transient of the main engines (STEAM method)

$$P_{transient} = \epsilon_p * P_{installed} \left(\frac{V_{transient}}{V_{design} + V_{safety}} \right)^3 \quad (4)$$

where:

- $P_{installed}$ is the total installed power (kW) of the main engine(s), and V_{design} and V_{safety} are the design speed and the safety margin (in m/s), respectively. The ϵ_p is assumed to be equal to 0.8, as the maximum continuous rating of the engine is thought to be 80% of the total installed main engine power (kW). In this equation, propeller efficiency is considered to be a constant, as well.

However, as can be deduced from Eqs. (3) and (4), the power that the propulsion engines have to develop does not depend solely on the speed, in addition to the transit speed there are other factors that influence the power that these engines must develop in order to achieve that speed. Logically these other factors also influence both the fuel consumption and the emissions released. These factors are those that increase the resistance of the vessel to movement through the water (Smith et al., 2014), i.e. the following three factors:

- Increased draft and displacement.
- Worsening of weather conditions.
- Worsening of hull and propeller roughness (i.e. fouling condition).

On this point, the Smith et al. (2014) proposes an Eq. (5) for the calculation of the power transient of main engines, as follows:

$$P_{transient} = \frac{P_1 \left(\frac{t_{transient}}{t_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n}{\eta_w \eta_f} \quad (5)$$

where:

- P_t , V_t and t_t are respectively the instantaneous (transient) power, speed and draught at time t ; P_1 , V_1 t_1 are ship power, ship speed and draught respectively at 100% MCR, from the on-board tests; η_w is the modification of propulsion efficiency due to weather; η_f is the modification of propulsion efficiency due to fouling; and n is an index that represents the relationship between speed and power, $n = 3$. This uses the Admiralty formula, which assumes that power is related to displacement to the power of 2/3.

Given that the difference between speed through the water and speed over ground were constant values, η_w was considered constant, as was the η_f value.

For the input values, this modelling approach uses the position reports generated on-board a ship each trip. The data from the 2011 reports was extracted. This area of the sea is well represented in this data.

The energy consumption and emissions figures presented in this paper are evaluated based on the four different models above.

2.2.5. Calculation of energy consumption

Eqs. (6) and (7) were applied in the calculation of Energy Consumption.

$$SFOC : SFOC_{Relative} \times SFOC_{base} \quad (6)$$

$$SFOC_{Relative} : 0.455 LF^2 - 0.71 LF + 1.28 \quad (7)$$

where:

- LF: Load Factor, a value from 0 to 1
- SFOC: Specific Fuel Oil Consumption
- SFOC_{base}: From design guide

2.2.6. Calculation of emission factors

Emission factors are used in conjunction with energy or fuel consumption to estimate emissions, and will vary by pollutant, engine type, duty cycle and fuel. Emission quantities are used to produce emission factors in g/kWh and/or grams of pollutant per gram of fuel consumed. The baseline fuel for producing the bottom-up emission factors is defined as HFO fuel and this has a sulphur content of 2.5%.

Internationally, there is no agreement about the values to apply to the emission factors. For example, IPCC (2006) recommends emission factors in its guidelines, the EU has the EMEP EEA (2016) data base emission factors. On the other hand, the Starcrest Consulting Group (2004), the European Parliament and Council (2010), Cooper and Gustafsson (2004) and the EPA (2000) have published other values to apply to the emission factors. A compilation of all of these (Goldsworthy and Galbally, 2011) is shown in Table 3 for its application in this study.

It is very important to note that the emission factor for each pollutant and engine type, expressed in g/kWh (see Table 3), takes a constant value when the ME loading is between 100% and 20%. For ME loadings of less than 20%, Eq. (8) was applied, as follows:

$$y = a(LF)^{-x} + b \quad (8)$$

where:

- y = emissions in g/kWh
- a = coefficient
- b = intercept
- x = exponent (negative)

3. Results and discussion

The fundamental objective of this study is to reduce as much as possible the uncertainties that will exist in the emissions inventories of

Table 3
Method proposed: Emissions (total and by operating mode) by Main Engines (kg) for each pollutant studied.

Mode	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}
Cruising	3771	8.62	65.60	113.1	9.372	9.12
Speed reduction	238	0.56	4.10	7.06	0.57	0.57
Manoeuvring	621.14	1.4	10.8	18.6	1.44	1.5
Arrival	18.6	0.26	0.32	1.57	0.197	0.19
Departure	22.86	0.266	0.397	1.54	0.18	0.17
At Berth	-	-	-	-	-	-
Total	4671.6	11.106	81.217	141.87	11.759	11.55

*Sample size: 160.

ships when they are calculated making use of the AIS for positioning (i.e. changes in ships' positions over a known time period) and a database of the characteristics of a ship's engines, including data of a ship's characteristics when those of the engines are not known. Both of these uncertainties are eliminated. However, there are other parameters employed in this study that, in addition, use values closer to reality, as can be observed in the results reflected in the tables.

In Eq. (1), which defines the energy consumption, there are two decisive factors: the Load Factor and the specific fuel consumption. Since the Load Factor of the Main Engines is related to the real instantaneous power developed by these engines, the most precise possible definition of this power will ensure that these calculations are as close as possible to the true values, because normally the emissions inventories attributed to maritime transport are based on mean values of these load factors.

For example, the Smith et al. (2014) utilizes a criterion to define the Load Factor for the main engines, in the following way:

Speed Mode

- Less than 1 knot At berth
- 1 knot to 3 knots Anchored
- Greater than 3 knots
 - and less than 20% MCR Manoeuvring
 - Between 20% MCR
 - and 65 % MCR Slow-steaming
 - Above 65 % MCR Normal cruising

With such wide margins as these, uncertainties in the values increase very significantly. For example, Table 10 (Supplementary material) gives values for the Main Engine's Load Factors ranging from 50 to 59.3% in the normal cruising operating mode: the Load Factor does not reach 65%. In the case of manoeuvring, values are between 8.9 and 9.3%, not coming close to 20% which is taken as the average value when the vessel is in the manoeuvring situation. These examples give a measure of the importance of try to get as close as possible to reality, and not resort to using average values. In the case of SFOC, the values defined in the Smith et al. (2014) (0.215 g/kWh) were practically the same as those employed in the present study. In this case, the SFOC (Table 10) was calculated by applying Eqs. (6) and (7), based on 0.213 g/kWh and 0.210 g/kWh for HFO and MDO values respectively. It can be seen that these values are variable depending on the load. The Load Factor values were calculated based on the actual ship speed.

It can be seen from the above that the results for each pollutant and each method shown in the tables and figures could vary significantly if the mean values defined in the Smith et al. (2014) were employed.

Tables 3 and 4 show the results for Main and Auxiliary Engines total emissions (kg) for each of the pollutants studied and for each of the methods, including the proposed method.

Table 4
Method proposed: emissions (total and by operating mode) by auxiliary engines (kg) for each pollutant studied (same as IMO method).

Mode	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	
Cruising (HFO)	285.7	0.45	5	5.97	0.61	0.6	
Speed reduction (HFO)	35.13	0.055	0.615	0.735	0.075	35.13	
Manoeuvring	163.68	0.272	0.54	3.44	0.094	0.086	
	HFO	173.88	0.26	3.04	3.64	0.37	0.36
Arrival	MDO	31.7	0.052	0.1	0.66	0.018	0.016
	HFO	33.67	0.052	0.59	0.7	0.072	0.069
Departure	MDO	30.88	0.051	0.1	0.65	0.017	0.016
	HFO	32.81	0.05	0.57	0.68	0.07	0.068
At berth (MDO)	413.37	0.68	1.37	8.68	0.23	0.21	
Total	1200.82	1.922	11.925	25.155	1.556	1.498	

*Sample size: 160.

Table 5

Specific fuel oil consumption by auxiliary engines (g/kWh), by operating mode, from each of the four previous methods analysed.

Mode	Auxiliary engines specific fuel oil consumption (g/kWh)							
	IMO		EPA		MAN		Jalkanen	
	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO
Cruising		248		210		210		248
SRZ		248		210		210		248
Manoeuvring	224	221	213	210	213	210	224	221
Arrival at berth	224	221	213	210	213	210	224	221
Depart. from berth	224	221	213	210	213	210	224	221
At berth		213.7		210		210		213.7

Tables 5 and 6 show the specific fuel oil consumption and the energy consumption respectively for the AE, based on the LF (average values) for each mode:

- Cruising and RSZ modes (HFO): 15% of maximum continuous rating (MCR).
- Manoeuvring, arrival and departure modes (MDO and HFO): 45% of MCR.
- At berth (MDO): 60% of MCR.

The difference between the results of the different methods is because the Smith et al. (2014) and Jalkanen et al. (2009) methods use Eqs. (6) and (7), while the EPA (2000) and MAN Diesel and Turbo (2012) methods use constant values for the SFOC.

Because the EFs have the same values for all methods, the results maintain the same relationship between Delivered Power and Energy Consumption. Table 7 shows the total Energy Consumption by Main and Auxiliary Engines. The results shown in this table could be substantially different if mean values had been used.

Tables 8 and 9 (Supplementary material) show the results of the studies, carried out by Goldsworthy and Galbally (2011), that define the EF values based on studies referenced in other articles (David Segersson, 2013). Since most previous authors have taken the SFOC as a constant value, and since the ship speed is taken from AIS data (with its inevitable uncertainties), it can be deduced that the calculation procedure proposed is more exact than other calculation methods using constant SFOC and Load factors.

Table 10 (supplementary material) show the Specific Fuel Oil Consumption obtained by applying the equations from each of the five methods analysed for Main Engines.

Table 11 (supplementary material) shows results from Eqs. (1)–(5), depending on the method applied. The biggest differences are seen in Cruising and RSZ modes. The lowest values correspond to the MAN and proposed methods, to which the same reasoning as for Table 6 can be applied.

Table 6

Energy consumption (kg of fuel) by auxiliary engines, by operating mode, from each of the four previous methods analysed.

Energy consumption by auxiliary engines (kg of fuel)					
MODE		IMO	EPA	MAN	Jalkanen
Cruising		96.85	81.82	81.82	96.85
SRZ		12.6	10.64	10.64	12.6
Manoeuvring	MDO	54.7	51.96	51.96	54.7
	HFO	55.48	52.7	52.7	55.48
Arrival berth	MDO	10.59	10.06	10.06	10.59
	HFO	10.74	10.20	10.20	10.74
Departure berth	MDO	10.32	9.80	9.80	10.32
	HFO	10.47	9.94	9.94	10.47
At berth, MDO (0.6 LF)		131.25	131.25	131.25	131.25
Total		337.52	368.37	368.37	337.52

*Sample size: 160.

Table 7

Total energy consumption (by main and auxiliary engines), by operating mode, from each of the five methods analysed.

Total energy consumption (kg of fuel)						
Mode		IMO	EPA	MAN	Jalkanen	Proposed method
Cruising		1394.35	1452.87	1348.73	1403.1	1366.75
SRZ		95.068	92.834	73.38	116.44	105.68
Manoeuvring	MDO	54.7	51.96	51.96	54.7	54.7
	HFO	169.6	156.06	123.26	172.02	169.6
Arrival berth	MDO	10.59	10.06	10.06	10.59	10.59
	HFO	18.32	16.23	16.23	18.32	18.32
Departure berth	MDO	10.32	9.8	9.8	10.32	10.32
	HFO	19.72	17.32	17.32	19.72	19.72
At berth, MDO (0.6 LF)		131.25	131.25	131.25	131.25	131.25
Total		1903.918	1938.384	1781.99	1936.46	1886.93

*Sample size: 160.

It can be seen that the ME power values on arrival in port and departure are consistent for all the methods. This is because constant LF values were used. However, these ME power values vary depending on which method is applied. In this case, the MAN method gives the lowest value. This is because the exponent $n = 3.5$ was used while the other methods used $n = 3$.

The proposed method shows the lowest value for cruising mode and this value is very similar to that used in the MAN model for total ME power. The small difference between the MAN Diesel and Turbo (2012) and the proposed methods may arise because the MAN Diesel and Turbo (2012) method does not take into account draught or propulsion efficiency (which depends on weather and fouling). The same reasoning can be used regarding the calculation of Energy Consumption. Figs. 1 and 2 show the results from Table 11.

Tables 12 to 19 (Supplementary material) show the results for Main and Auxiliary Engines total emissions (kg) for each of the pollutants studied and for each of the methods, including the proposed method. Tables 20 and 21 show the Statistical analysis of ME and AE energy consumption and emissions, respectively.

Only the AEs use MDO fuel, and MDO is consumed during approximately 44% of the trip time. The rest of the time (56%), HFO fuel is used. Graph 5 shows the comparison between emissions from the two fuels. Even though there is only a minimal difference in the periods of time when each fuel is used, the emissions of SO_x, PM₁₀ and PM_{2.5} are up to 400% higher when HFO is used (Figs. 3–5).

Currently, there are uncertainties in bottom-up calculations of energy use and emissions by the world fleet of ships. These uncertainties can affect the totals, the distributions among vessel categories and also the allocation of emissions between international and domestic shipping. One of this study's most important contributions to reducing uncertainty is the explicit quality control applied by calculating fuel use and emissions based on the vessel-specific on-board data (daily Noon Reports). This is superior to the calculation methods described in previous studies, which use average technical parameters. Another important contribution to the reduction of uncertainty is the direct observation of activity data for each individual vessel (i.e. speed, draught, etc.), aggregated per trip.

Other studies (Jalkanen et al., 2009; Smith et al., 2014 and Durán-Grados et al., 2018) have estimated greater uncertainty from the bottom-up method for previous years (2007, 2008 and 2009), with the difference between these uncertainty estimates being attributable predominantly to the change in AIS coverage over the period studied. In the proposed method the speed of the ship, distance travelled and time spent in each operating mode are measured and recorded on-board in real time; therefore the uncertainties arising from the use of the AIS system are also eliminated.

Another important contribution of this paper is that the analysis of the ME load factor, specific fuel oil consumption and emission factors

Eficiencia energética en el transporte marítimo.

Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

582

J. Moreno-Gutiérrez et al. / Science of the Total Environment 650 (2019) 575–584

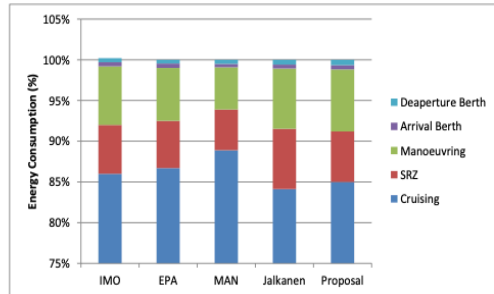


Fig. 1. Energy consumption by Main Engines, from each of the five methods: proportion of total accounted for by each operating mode (percent). Correction: Departure from berth, Arrival at berth.

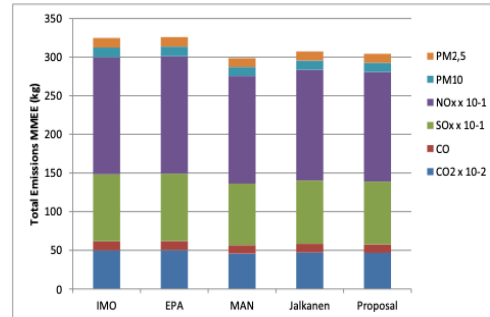


Fig. 3. Total emissions (kg) by Main Engines, from each of the methods analysed: proportion of total accounted for by each pollutant studied (percent).

is applicable to any type of ship. In this case study, they were applied to an actual Ro-Pax ship, whereas in previous studies these were taken as constant values. In this study it has been demonstrated that all these factors need to be taken into consideration as variables. We have also used the new IMO equation (Eq. (5)) for the calculation of the actual ME power, including three new parameters: displacement and propulsion efficiency (according to both weather and fouling conditions).

It can be seen that the results from the EPA and Jalkanen et al. (2009) methods are very similar but the results obtained by applying the proposed method should be considered as the closest to the true values.

In the first inventories produced, by the EPA (2000) and Smith et al. (2014) methods, the ME LF was like a third power relation between speed at 100% MCR and transient speed. The SFOC and EF were considered to be constant values, dependent only on the fuel type. Later, Jalkanen et al. (2009) added 0.5 knots to take into account the new safe transient speed value; and he applied a new model for calculating the SFOC as a variable value depending on the Engine Load. Then MAN Diesel and Turbo (2012) proposed different speed-power relation values for Load Factor calculations, depending on the type of ship. Lastly, the Smith et al. (2014) introduced three new factors that take into account the definition of the M.E power transient: displacement and propulsion efficiency allowing for both actual weather and the vessel's fouling condition. However, neither Jalkanen's safe speed value nor the different speed-power relation values proposed by MAN Diesel and Turbo (2012) were taken into account.

A new method that takes all the aforementioned parameters into account has been proposed here, thus producing a single equation that defines the transient Power.

The results from the method proposed in this paper are nearer to those of the IMO method than those of the MAN Diesel and Turbo (2012) method. This is because the effects of displacement and propulsion efficiency seem to be more important than the effects of the exponent of the relationship between speed and power.

Moreover, the substitution of this exponent ($n = 3$) from the Smith et al. (2014) equation for any of those proposed by MAN Diesel and Turbo (2012) ($n = 3.5$ for a Ro-Pax ship, in this case) is another very important contribution from this study. From the results of its application, it can be seen that, for the same ship speed as delivered by the engines, there are different values for load factors and power because these depend on draught, weather and fouling.

The results from the MAN Diesel and Turbo (2012) method are the lowest, mainly in the Manoeuvring and Cruising modes, and this is caused by the exponent (n) value being different from the value used in the other methods. The Jalkanen et al. (2009) method presents the highest values and this is caused by applying the safety speed coefficient.

Nevertheless, using the calculation procedures of any of the five methods analysed here, the energy consumption and emissions produced could be calculated for each of the ship operation phases. Based on this data, a simple and feasible algorithm could be introduced by operators in each ship and it could be used for estimating the two top priority control parameters on specific voyages: fuel consumption and emissions.

When using the EPA (2000) model, it can be seen that the load factors are from 50.6% (15.3 knots, 1154.5 kg of fuel/h) to 93.88% (18.8 knots, 2257.43 kg of fuel/h), for the ship operating in cruise

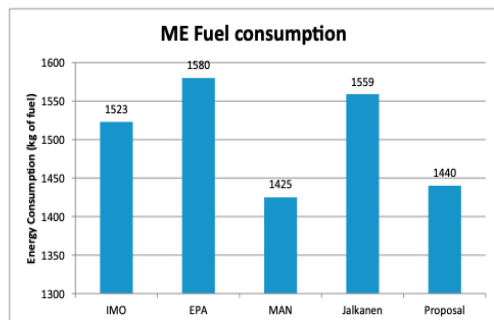


Fig. 2. Energy consumption by Main Engine (kg of fuel), from each of the five methods, for all operating modes.

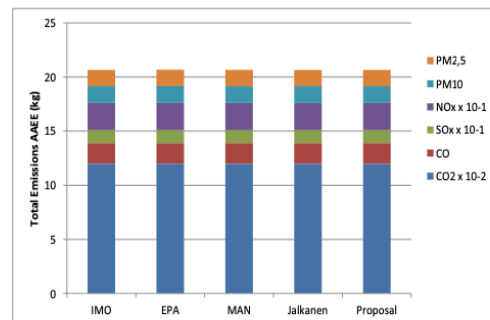


Fig. 4. Total emissions (kg) by Auxiliary Engines, from each of the methods analysed: proportion of total accounted for by each pollutant studied (percent).

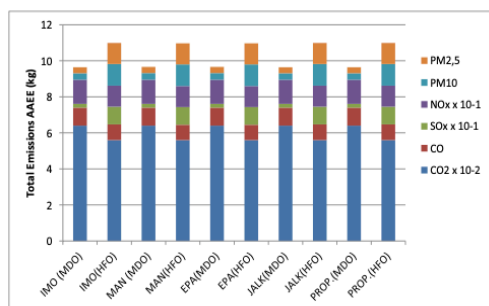


Fig. 5. Total emissions (kg) AE per pollutant and method studied and fuel used.

mode. When the speed is reduced by 3.5 knots, the ME fuel consumption is reduced by up to 50%. For the same case, when using the MAN Diesel and Turbo (2012), IMO and Jalkanen et al. (2009) models, the ME fuel consumption reductions are 46, 43 and 44% respectively. Hence, the data can be utilized and updated daily, instead of estimating a trip's fuel consumption using data from sea trials when the MEs are checked.

Finally, the presentation in this paper of the improved method proposed represents an opportunity for each ship operator to test it on their own fleet.

4. Conclusions

Where fuel economy, cost efficiency and environmental responsibility are top priorities, making the correct decision on the method for measuring ship performance is extremely important. Given that ship operators have considerable information about ship performance from the daily reports, the application of any of the alternative methods should be easy for their respective companies. Based on this comparison of the four existing methods, the authors have proposed a new method combining the best of each. The new method is illustrated for a particular case but is suitable for any ship operator to test on their own fleet.

The range of variation between each method found in the estimation of total energy consumption and emissions of all types of pollutants is from 9% to 10%. In the Smith et al. (2014), the most important sources of uncertainty are attributable to incomplete AIS coverage of a ship's activity and the discrepancies between the number of ships observed in the AIS data and the number of ships described as "in service" in the IHSF database. These sources are not used when this method is applied; hence the uncertainties are practically non-existent compared to those inherent in previous studies, in which AIS data were generally used.

Given that distance, time and speed in service have been taken into account in this study, the application in itself of any of the analysed methods does not reduce fuel use or improve efficiency. However, obtaining reliable and timely data should be the first step to implementing operational and/or technical measures with a view to controlling emissions of pollutants, in order to contribute reliable data to a database for monitoring the emission of greenhouse gases by all ships on international routes.

By applying any of these methods, but particularly the method proposed by the authors, the energy consumption and emissions produced for each operational phase of the ship can be calculated in real time by its operator. This data would give operators better control, and improve management of the energy used on board their ships.

Acknowledgements

This work was carried out under the Project titled: "La influencia del transporte marítimo sobre la salud humana: propuesta de un modelo de cálculo de predicción de muertes y hospitalizaciones anuales en la provincia de Cádiz". Reference PI 0094-2017. Consejería de Salud de la Junta de Andalucía. Project Co-financed by FEDER Funds.

Work under the project is also supported by the Master Plan for Spanish Ports 2015-EU-TM-0417 OPS,22 co-financed by the EU Connecting Europe Facility CEF -RET-T EU.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>.

References

- Aldous, L., Smith, T., Bucknall, R., 2013. Noon report data uncertainty. Low Carbon Shipping Conference, London, 2013.
- Andersen, P.A., Borrod, A., Blanchot, S.B., 2005. Evaluation of the service performance of ships (review). *Mar. Technol.* 42 (4), 177–183.
- Basic Principles of Ship Propulsion, 2012. MAN Diesel and TURBO.
- Caiazzo, F., Ashok, Akshay, Waitz, I.A., Yim, Steve H.L., Barrett, Steven R.H., 2013. Air pollution and early deaths in the United States. Part I: quantifying the impact of major sectors in 2005. *Atmos. Environ.* (ISSN: 1352-2310) 79, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.081>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013004548>.
- Cooper, D.A., Gustafsson, T., 2004. Methodology for calculating emissions from ship. SMHL, Norrköping.
- Durán-Grados, V., Mejías, J., Musina, L., Moreno-Gutiérrez, J., 2018. The influence of the waterjet propulsion system on the ships' energy consumption and emissions inventories. *Sci. Total Environ.* 631–632, 496–509.
- EMEP/EEA, 2016. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook.
- ENTEC, 2002. Final Report. Quantification of Ship Emissions.
- EPA, 2000. Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data. Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency (420-R-00-002).
- EPA-420-R-10-013, 2010. Proposal to Designate an Emission Control Area.
- European Parliament and Council, 2010. Article 4b of council directive/1020/EU.
- Eyring, V., Isaksen, I.S.A., Bernsten, T., Collins, W.J., Corbett, J.J., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J., Schlager, H., Stevenson, D.S., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping. *Atmos. Environ.* 44, 4735–4771.
- Goldsworthy, L., Galbally, I.E., 2011. Ship engine exhaust emissions in waters around Australia – an overview. *Air Qual. Clim. Chang.* (ISSN: 1836-5876) 45 (4), 24–32.
- González, Y., Rodríguez, S., Guerra, J.C., Trujillo, J.L., García, R., 2011. Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions. *Atmos. Environ.* 45 (28), 4907–4914.
- Huan, L., Mingliang, F., Xinxin, J., Shang, Y., Drew, S., Faluvegi, G., Shindell, C., He, K., 2016. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia. *Nat. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1038/nclimate3083>.
- IPCC Emission Factor Database (EFDB), 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jalkanen, J.P., Brink, A., Kalli, J., Pettersson, H., Kukkonen, J., Stipa, T., 2009. Modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 9209–9223.
- Krewski, D., Jerrett, M.R.T., Burnett, R.T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., 2009. Extended Follow-up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality. HEI Research Report Health Effects Institute, Boston, MA, p. 140.
- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., Schwartz, J., 2012. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environ. Health Perspect.* 120 (7), 965–970.
- Ling-Chin, J., Roskilly, A.P., 2016. A comparative life cycle assessment of marine power systems. *Energy Convers. Manag.* 127, 477–493.
- Lloyd's Register (IHS Fairplay) (n.d.).
- Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., Quante, M., 2010. The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. *Environ. Pollut.* 158 (6), 2241–2250.
- Moreno-Gutiérrez, J., Calderay Cayetano, F., Saborido, N., Boile, M., Rodríguez-Valero, R., Durán-Grados, C.V., 2015. Methodologies for estimating shipping emissions and energetic consumption: a comparative analysis of current methods. *Energy* 86 (15), 603–616.
- Penn, L.S., Arunachalam, S., Woody, M., Heiger-Bernays, W., Tripodis, Y., Levy, J.J., 2017. Estimating state-specific contributions to PM_{2.5} and O₃-related health burden from residential combustion and electricity generating unit emissions in the United States. *Environ. Health Perspect.* 125, 324–332. <https://doi.org/10.1289/EHP550>.
- Segerström, David, 2013. A dynamic model for shipping emissions. Adaptation of Airviro and application in the Baltic Sea. SMHL Meteorology, Vol. 153.
- Smith, T.W.P., Jalkanen, J.P., Anderson, B.A., Corbett, J.J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keefe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucei, C., Traut, M., Ertinger, S., Nelissen, D., Lee, D.S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J.J., Hoen, M., Chesworth, S., Pandey, A., 2014.

Eficiencia energética en el transporte marítimo. Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

584

J. Moreno-Gutiérrez et al. / Science of the Total Environment 650 (2019) 575–584

Third IMO GHG Study 2014. International Maritime Organization (IMO), London, UK (April 2015).
Starcrest consulting group, 2004. Port-wide Baseline Air Emissions Inventory. Port of Los Angeles.
The MRV Shipping Regulation, 2015. Regulation (EU) 2015/757 on Monitoring, Reporting and Verification of Carbon Dioxide Emissions From Maritime Transport and Amending Directive 2009/16/EC.
Trozzi, C., de Lauretis, R., 2013. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook. European Environment Agency.

Viana, M., Hammingh, Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlieger, I., Aardenne, J., 2014. Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmos. Environ.* 90, 96–105.
Winebrake, J.J., Corbet, J.J., Green, E.H., Lauer, A., Eyring, V., 2009. Mitigating the Health impacts of pollution from oceangoing shipping: an assessment of low-sulfur fuel mandates. *Environ. Sci. Technol.* 43 (13), 4776–4782.
World Health Organization, 2012. Health Indicators of Sustainable Energy in the Context of the Rio+20 UN Conference on Sustainable Development Initial Findings From a WHO Expert Consultation: 1718 May 2012.

ANEXO IV

CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DE LOS CONTAMINANTES Y SUS EFECTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

ÍNDICE

A.I.- Introducción

A.I.I- Contaminantes fotoquímicos

A.I.I.1.- Hidrocarburos no metano (HCNM)

A.I.I.2.- Oxidantes fotoquímicos. Ozono (O₃)

A.I.I.3.-Dióxido de azufre (SO₂)

A.I.I.4.- Monóxido de carbono (CO)

A.I.I.5.- Material particulado en suspensión (MP)

A.I.II.- Origen de la contaminación atmosférica

A.I.II.1.- Fuentes de emisión

A.I.II.2.- Focos antropogénicos de emisión

A.I.II.3.- Contaminantes emitidos por los vehículos automóviles

A.I.III.- Procesos involucrados en la contaminación del aire

A.I.III.1.- Fuente de emisión. Definiciones

A.I.III.2.- Propagación de los Contaminantes y Contaminación del Aire. Definiciones

A.I.III.2.1.- Correlación entre las Inmisiones y las Emisiones de Contaminantes

A.I.III.2.2.- Influencia de los procesos meteorológicos en la contaminación atmosférica

A.I.III.3.- Medición. Unidades de medición

A.I.III.3.1.- Medición

A.I.III.3.2.- Unidades de Medición

Tabla A.I.III.3.2.-: Unidades de Medición de Contaminantes

A.I.IV.- EFECTOS PRODUCIDOS POR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

A.I.IV.1.- Efectos sobre la salud humana

A.I.IV.2.- Efectos sobre las plantas

A.I.IV.3.- Efectos sobre los materiales

A.I.IV.4.- Efectos globales

A.I.IV.5.- Efectos sobre los ecosistemas (lluvias ácidas)

A.I.IV.6.- Efectos sobre el clima (efecto invernadero)

A.I.IV.7.- Efectos sobre la estratosfera

CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DE LOS CONTAMINANTES Y SUS EFECTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

INTRODUCCIÓN

Es reconocida la influencia que la contaminación atmosférica tiene sobre el deterioro de la salud humana, especialmente en las grandes ciudades, llegando en algunos casos a episodios críticos donde se observan síntomas respiratorios de tipo irritativo, fenómenos respiratorios de tipo obstructivo y una mortalidad más elevada que los promedios normales. Se ha establecido la estrecha relación de la contaminación atmosférica con alteraciones de la función respiratoria, con el transporte de oxígeno en el cuerpo, con enfermedades respiratorias cardiovasculares y dermatológicas y con la presencia de diversos y numerosos casos de cáncer. Existen varios factores a tener en cuenta para analizar los efectos sobre la salud, entre los que podemos citar los siguientes:

- Intensidad y composición de los contaminantes: No es lo mismo estar expuestos durante un período corto en concentraciones altas de contaminantes que un período largo a concentraciones bajas. Las variaciones de la intensidad de la concentración dependen no sólo de la emisión sino también de las condiciones meteorológicas y el relieve geográfico. Además, el tipo de contaminante es muy importante por sus diferentes efectos, por lo que los períodos de exposición cambian según se trate de uno u otro contaminante.

- El horario: Las concentraciones varían en general con respecto a la hora del día por variaciones en las emisiones y las condiciones meteorológicas locales. Para un flujo de emisión constante, la concentración de los contaminantes a nivel del suelo dependerá de las lluvias y de los vientos.

Los contaminantes que se producen directamente en algún proceso natural o debido a la actividad humana se denominan contaminantes primarios, o precursores. Si el tiempo de residencia de éstos en la atmósfera es suficiente, pueden participar en reacciones químicas y transformarse en otras sustancias contaminantes denominadas contaminantes secundarios. En algunos casos los contaminantes primarios no son dañinos, por ejemplo, el NO, y sí que lo son los secundarios, en este ejemplo el NO₂. Más adelante se puede encontrar una definición más detallada sobre los contaminantes primarios y los secundarios. La mayoría de los residuos o compuestos volátiles generados por el hombre sólo ascienden unos pocos centenares de metros en la atmósfera. En esta zona el aire que está en contacto con la superficie terrestre sufre una serie de turbulencias de forma que su movimiento afecta a los compuestos. Del conjunto de contaminantes atmosféricos que pueden afectar de una u otra forma al medio ambiente, solamente se miden para su control un grupo de ellos que se consideran fundamentales y que son los siguientes.

a) Contaminantes fotoquímicos:

- Hidrocarburos no metano (HCNM); contaminante primario.
- Óxidos de nitrógeno, (NO) contaminante primario, y (NO₂) contaminante secundario.
- Oxidantes fotoquímicos. Ozono (O₃); contaminante secundario.

b) Dióxido de azufre (SO₂); contaminante primario.

c) Monóxido de carbono (CO); contaminante primario.

d) Material particulado en suspensión con diámetro menor de 10 µm (MP₁₀).

- Contaminante primario y secundario. En casos particulares se mide, además, específicamente plomo (Pb).

Es de destacar que, al analizar los efectos de los contaminantes mencionados, es importante considerar las interacciones entre ellos y la influencia que la presencia de uno tiene sobre otros. Este apartado está dividido en cuatro partes:

1. Tipos de contaminantes
2. Origen de la contaminación atmosférica
3. Procesos involucrados en la contaminación del aire
4. Efectos producidos por la contaminación atmosférica

A.I.1- TIPOS DE CONTAMINANTES FOTOQUÍMICOS

A.I.1.1.- Hidrocarburos no metano (HCNM)

El metano no se considera un contaminante importante porque no reacciona apreciablemente para formar compuestos dañinos. La característica más importante de los demás hidrocarburos, desde el punto de vista de la contaminación, es su habilidad para reaccionar con otros compuestos produciendo contaminantes dañinos secundarios. El análisis del aire por contaminantes individuales de hidrocarburos no metano (HCNM) revela la presencia de numerosos compuestos diferentes, por lo que es muy difícil de especificar un grupo de características definidas de “hidrocarburos”.

Para nombrar algunos, dentro de los HC emitidos al aire por los procesos de combustión, se encuentran los HC alifáticos o aquellos que sólo tienen enlaces simples y las olefinas o hidrocarburos con uno o más enlaces dobles, además de otras sustancias orgánicas como aldehídos, cetonas, e hidrocarburos aromáticos policíclicos. Los métodos de referencia para la determinación de hidrocarburos definen como de interés a los compuestos que pasan a través de un filtro con una porosidad de 3 a 5mm y que produce una señal en un detector de llama ionizante⁽¹⁾.

Un resumen de las reacciones complejas por las que aparecen oxidantes a partir de HCNM es el siguiente. El punto de partida es el dióxido de nitrógeno (NO_2), un producto formado por oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) el cual es producido durante la combustión. En ausencia de hidrocarburos, el NO_2 es disociado por la luz solar produciendo NO y un átomo de oxígeno. Este último se combina con oxígeno molecular para dar ozono (O_3) el cual no se acumula puesto que se combina con el NO para producir nuevamente NO_2 . El proceso es continuo y se establece una concentración de equilibrio de cada especie. La concentración de oxidante fotoquímico aumenta cuando el estado de régimen del ciclo fotolítico del NO_2 es roto por los HCNM, que reaccionan con agentes oxidantes como radicales OH u oxígeno atómico para dar otras especies radicales, que reaccionan a su vez con el NO y desbalancean el ciclo.

La concentración de ozono aumenta al encontrar menor cantidad de NO libre para reaccionar. Una de las especies químicas que se origina en la reacción de los HCNM con el NO es el nitrato de peroxiacetilo (PAN), compuesto relativamente estable y de elevado poder oxidante. Es el responsable de la típica irritación en los ojos en situaciones de “smog”⁽²⁾ intenso. En general los HCNM no presentan efectos nocivos sobre la salud al nivel de concentraciones que se encuentran en el aire. Sin embargo, los hidrocarburos que tienen incorporado oxígeno a su estructura molecular, como en el caso de aldehídos, cetonas y algunos ácidos orgánicos sustituidos, por lo general son perjudiciales al ser humano. Las sustancias aromáticas como el benceno tienen alto poder cancerígeno, así como otras sustancias cíclicas con anillos bencénicos.

A.I.1.2.- Oxidantes fotoquímicos. Ozono (O₃)

Los oxidantes son definidos como las sustancias atmosféricas que reaccionan específicamente oxidando. El más abundante de esos oxidantes es el ozono (O₃). Por esta razón, el término oxidante y ozono son frecuentemente usados en forma indistinta. El ozono no es directamente emitido a la atmósfera, sino que es un contaminante secundario formado por una variedad de reactivos atmosférico. El ozono interacciona con el ambiente más que cualquier otro contaminante ambiental, reacciona con otros contaminantes, con vegetales, etc. y es fácilmente destruido en esas reacciones.

La reacción del ozono con NO causa que la concentración de O₃ en la cercanía de autopistas o caminos de gran circulación de vehículos sea mucho menor que el que se encuentra en otros lugares. La formación de oxidantes esta afectada por la intensidad y duración de la luz solar, la temperatura, y los procesos de emisión y dilución que afectan la concentración en la atmósfera de los otros participantes en las reacciones fotoquímicas. La relación entre las emisiones primarias de NO e HCNM y la subsiguiente formación de ozono atmosférico es difícil de cuantificar. La lenta formación y el transporte de contaminantes secundarios tienden a producir una gran separación, espacial y temporalmente, entre las principales fuentes de emisión y las áreas de elevada concentración de contaminantes oxidantes.

Existen pocas fuentes de producción primaria de ozono, usualmente vinculadas con descarga eléctrica. En general, no se observa contribución importante en la concentración urbana, excepto en las vecindades inmediata de donde se produce. El ozono puede también crecer en la superficie por el proveniente de la estratosfera donde es formado por foto disociación de oxígeno y recombinación a ozono. La acumulación de ozono ha sido frecuentemente observada dentro de la capa de inversión sobre áreas urbanas y rurales. Procesos de convección pueden traer esas capas elevadas a la altura de suelo.

Aparte de otros contaminantes, el índice de peligrosidad de una atmósfera urbana se acostumbra a medir en función de los niveles de ozono presente. Existe una cierta variación de los niveles de ozono en la atmósfera urbana durante el día, que refleja la actividad propia de la ciudad. Los niveles de ozono comienzan a aumentar por la mañana, en el inicio de la actividad urbana, alcanzándose las concentraciones máximas cerca del mediodía, un par de horas después de que se registren los niveles más altos de NO₂ y de hidrocarburos en la atmósfera. A partir mediodía la concentración de ozono disminuye a causa de ciertas reacciones químicas, como la transformación de NO a NO₂ y determinados hidrocarburos a aldehídos, en las que el ozono manifiesta su gran poder oxidante.

Los niveles más bajos de ozono se observan durante la noche, puesto que reacciona con el NO₂ presente en la atmósfera dando radicales NO₃ muy reactivos. Estos radicales oxidan el NO a NO₂ y se combinan con otros NO₂ para dar N₂O₅, inestable, que reacciona con el vapor de agua dando ácido nítrico, responsable de la acidez de las nieblas matutinas urbanas.

El ozono afecta a la salud humana a través de la alta reactividad que muestra en presencia de compuestos orgánicos con doble enlace, como por ejemplo proteínas y elementos constitutivos de las células. Esto conduce a transformaciones químicas que pueden dar lugar a mutaciones a nivel celular, cuando esta sustancia penetra en el organismo a través de las vías respiratorias. Es uno de los contaminantes de mayor estudio en el campo epidemiológico por sus efectos nocivos sobre la salud humana.

A.I.1.3.- Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre (SO₂) se genera por oxidación del azufre contenido en los combustibles al quemarse estos. Actualmente su nivel tiende a bajar dado que se exigen combustibles con bajo contenido de azufre. Como el SO₂ es soluble en agua, interacciona física y químicamente con la humedad ambiente, y reacciona fotoquímica y catalíticamente con otros componentes de la atmósfera. La cinética de las reacciones es compleja, no siendo entendida en todos los casos. El SO₂ puede ser catalíticamente oxidado a SO₃ en presencia de óxidos de nitrógeno. El SO₃ posteriormente convierte óxidos básicos a sulfato. La tasa de oxidación de SO₂ a sulfatos varía de 0,17 %/ hora a 50 %/ hora, dependiendo de la humedad relativa y la presencia y concentración relativa de otros contaminantes. La tasa es típicamente más rápida en zonas urbanas. El SO₂ se puede fotooxidado a ácido sulfúrico (H₂SO₄) en aerosol en la presencia de vapor de agua y más rápidamente cuando están presentes hidrocarburos, dióxido de nitrógeno o compuestos de hierro o de manganeso.

Debido a las interacciones complejas del SO₂ con otros contaminantes es muy difícil determinar el tiempo de residencia y la vida media. En general la vida media va de una hora a varios días. La vida media más corta es característica del SO₂ urbano donde existen muchos otros contaminantes. Un decaimiento exponencial con una vida media de tres horas es típico de una ciudad. Se ha encontrado que el océano es el mayor sumidero de SO₂. El dióxido de azufre, por su carácter ácido, tiene efectos irritativos sobre las vías respiratorias, creando problemas de bronquitis obstructiva. El SO₂ al encontrarse en presencia de partículas en suspensión, aumenta su agresividad. Su solubilidad en agua y posible transformación a ácido sulfúrico, así como su propio carácter ácido, permiten que origine problemas puntuales en regiones de alta sensibilidad del sistema respiratorio. La temperatura en un punto dado tiene un pequeño efecto directo sobre la concentración de SO₂. Sólo gradientes de temperatura, principalmente en el sentido vertical, tienen alguna influencia. Sin embargo, la temperatura ambiente puede influenciar la emisión de SO₂ (en realidad su producción), sobre todo cuando se queman combustibles para calefacción. También si la generación de electricidad es fundamentalmente térmica, los requisitos de refrigeración, en verano, influyen en la emisión de SO₂.

A.I.1.4.- Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) se produce por la oxidación incompleta del carbono en el proceso de combustión. En general, esto ocurre en los automotores, dado que en las industrias y en las centrales térmicas se controla que la oxidación sea total, generando CO₂ pues es la forma de obtener el mayor rendimiento térmico de los hidrocarburos, o sea hay un aspecto económico por medio; el CO₂ no es dañino para el ser humano, si bien produce otros efectos como el invernadero. La producción de CO₂ es inevitable, dado que es inherente al proceso mismo de oxidación del combustible, pero la generación de CO puede ser reducida al máximo con un control adecuado de la combustión. El monóxido de carbono actúa por asociación con la hemoglobina de la sangre, formando carboxihemoglobina, reduciendo considerablemente la oxigenación debido a que el CO es 210 veces más reactivo que el oxígeno con la hemoglobina. Por lo tanto, se observa una disminución en el transporte de oxígeno por la sangre hacia las células del cuerpo humano. Cuando la concentración de CO supera las 120 ppm, se puede producir pérdida de reflejos, dolores de cabeza, náuseas, vómitos, y si persiste puede llevar a la muerte.

A.I.I.5.- Material particulado en suspensión (MP)

El material particulado en suspensión (MP) como contaminante del aire incluye una amplia clase de sustancias líquidas o sólidas con una variedad de propiedades físicas y químicas. Una característica importante es su tamaño, dado que partículas grandes no son recogidas por el sistema respiratorio del ser humano por lo que no son consideradas dañinas a la salud. Las partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10mm, normalmente mencionada como MP₁₀, pueden penetrar las vías respiratorias y llegar a los pulmones, depositándose en las paredes alveolares. A causa de su irregularidad en forma, densidad, composición y estructura, el material particulado es caracterizado convenientemente por su diámetro aerodinámico equivalente. Algunas partículas teniendo la misma velocidad de caída son definidas como si se tratara del mismo diámetro aerodinámico equivalente, el cual por conveniencia se especifica como el diámetro de una esfera con densidad unidad que tiene esa velocidad de caída.

Cuando son considerados los efectos de las partículas sobre la visibilidad o la dispersión de la luz, puede ser necesario emplear una definición más relacionada con el tamaño físico real de las mismas. El principal daño a la salud del material particulado es debido a su deposición en el sistema respiratorio. Los aerosoles atmosféricos que contienen material con diámetro hasta 10mm varían en distribución de tamaño y composición química. Se pueden considerar tres tamaños:

Las partículas más pequeñas, con diámetro < 0,1mm, tienen vida corta y frecuentemente se observan como una clase distinta cerca de la fuente de combustión; se denominan modo núcleo. El modo núcleo pequeño (Aitken) crece rápidamente por coagulación en la clase superior. Las partículas de tamaño medio (diámetro de 0,1 a 2,5mm) se forman principalmente por coagulación y condensación de vapor sobre las partículas de modo núcleo.

Las partículas más grandes de modo tamaño grueso (diámetro >2,5mm) generalmente forman la mayoría de la masa e incluye partículas formadas por procesos antropogénicos y partículas de superficie. Las dos primeras se denominan partículas finas y las mayores partículas gruesas. Las partículas finas resultan principalmente de procesos de combustión, incluyendo la condensación y transformación atmosférica de gases de escape para formar MP. Las partículas finas están formadas por sulfatos, nitratos, carbonatos orgánicos, amonio y plomo, mientras que las partículas gruesas están constituidas normalmente por óxidos de silicio, hierro, aluminio, sal del mar, partículas de cubiertas de automotores, y partículas de plantas.

Las fuentes naturales de emisión de partículas son pulverización del mar, incendios, emanaciones biogénicas, y volcanes. La mayoría de las emisiones producidas por el hombre son fugas desde rutas o calles (pavimentadas o no), actividades de construcción, agricultura, actividades mineras e industriales. La mitad del material particulado urbano está formado por negro de grafito procedente de la combustión de carburantes fósiles, principalmente en automotores, sobre todo los que funcionan con motor diésel.

También contribuyen a su formación los calefactores domiciliarios, las centrales térmicas y las industrias que operan con fuel oil o carbón. Como mencionamos, las MP₁₀ pueden penetrar las vías respiratorias y llegar a los pulmones. La distinta solubilidad de las partículas, según su carga química, determinará su transferencia a la sangre. La deposición de partículas en el sistema respiratorio depende de tres fuerzas físicas:

-Fuerzas inerciales: Son las causales de deposición en la nasofaringe. La inercia es muy importante en los grandes conductos del sistema respiratorio, especialmente cuando se requiere respiración rápida forzada. Su importancia decrece cuanto más adentro del sistema respiratorio se encuentren las partículas.

-Sedimentación gravitacional: Es proporcional a la velocidad de deposición de la partícula y al tiempo disponible para sedimentar. Como la velocidad decrece en los conductos estrechos del sistema, el efecto gravitacional se ve aumentado.

-Difusión: En el caso de partículas finas, la fuerza más importante es la de difusión y conduce a una sedimentación o depósito en las paredes de los conductos finos del sistema, como es el espacio alveolar. Esta fuerza es una magnitud significativa para partículas de diámetro superior a 0,5 mm. La acidez inherente a las partículas urbanas puede provocar la irritación de las membranas mucosas y conducir a una constricción bronquial. La función irritante de las partículas no es función sólo de la naturaleza de las mismas, sino también de la facilidad de absorber o adsorber otras sustancias en la superficie de ellas, que en ciertas ocasiones da lugar al denominado sinergismo ⁽³⁾.

Un ejemplo típico se observa cuando las partículas se encuentran en presencia de SO₂ en el aire. Otro ejemplo, lo presentan los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) que en algunos casos no son agentes mutagénicos, pero que se comportan como tales cuando están en presencia de otros HAP. Otras sustancias que están presentes en el material particulado son el plomo, arsénico, cadmio, mercurio, ácido sulfúrico y sulfatos.

El plomo, emitido a causa de la combustión de gasolina que incorpora como aditivo tetraetilplomo u otros compuestos orgánicos de plomo, es una de las partículas metálicas que más presente se encuentra en la atmósfera urbana. El plomo en el interior del organismo interfiere en el proceso de maduración de las células rojas de la sangre, así como también induce la excreción, a través de la orina, de porfirinas, que son sustancias precursoras de la hemoglobina. Se acumula en los huesos y tejidos, produciendo alteraciones nerviosas y reducción de la función renal. Por esa razón se suele medir su concentración en aire por separado.

Las partículas sólidas en suspensión actúan como agentes de condensación del vapor de agua presente en la atmósfera. Por ello, el material particulado puede participar en procesos químicos que ocurren en la atmósfera urbana, actuando incluso de catalizadores. Por ejemplo, los óxidos de azufre y nitrógeno se transforman rápidamente a ácidos sulfúrico y nítrico, respectivamente, en la superficie de las partículas, las cuales actúan de catalizador del proceso.

El material particulado favorece así la formación de nieblas ácidas que acostumbran a estar presentes en los núcleos urbanos muy contaminados. Actualmente, la concentración de MP₁₀ se emplea como indicador de calidad de aire ambiente, en reemplazo del material particulado en suspensión total que se empleaba anteriormente.

A.I.2.- ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

A.I.2.1- Fuentes de emisión

Los contaminantes presentes en la atmósfera proceden de dos tipos de fuentes emisoras bien diferenciadas: las naturales y las antropogénicas. En el primer caso la presencia de contaminantes se debe a causas naturales, mientras que en el segundo tiene su origen en las actividades humanas. Las emisiones primarias originadas por los focos naturales provienen fundamentalmente de los volcanes, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos.

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

Los principales focos antropogénicos de emisiones primarias los podemos clasificar en:

Focos fijos	Industriales	Procesos industriales Instalaciones fijas de combustión
	Domésticos	Instalaciones de calefacción
Focos móviles	Vehículos automóviles	
	Aeronaves	
	Buques	
Focos compuestos	Aglomeraciones industriales	
	Áreas urbanas	

Si atendemos a la distribución espacial de la emisión de contaminantes, podemos clasificar los focos en: puntuales, tales como las chimeneas industriales aisladas; lineales, por ejemplo, las calles de una ciudad, las carreteras y autopistas; y planos, las aglomeraciones industriales y las áreas urbanas son los ejemplos más representativos.

En el cuadro siguiente se muestra la proporción entre las emisiones primarias naturales y antropogénicas para los distintos contaminantes.

Focos de emisión		
Contaminante	Antropogénicos %	Naturales %
Aerosoles	11.3	88.7
SO _x	42.9	57.1
CO	9.4	90.6
NO	11.3	88.7
HC	15.5	84.5

Las cifras anteriores muestran la gran importancia que, en globales, tienen las fuentes naturales de emisión de contaminantes antropogénicos, excepto en el caso de las emisiones de anhídrido sulfuroso en que casi se igualan ambas.

Atendiendo a la distribución espacial de estas emisiones se observa que en las regiones más industrializadas de Europa y Norteamérica las emisiones antropogénicas de SO₂ alcanzan proporciones muy superiores a las naturales. Así, en el Norte de Europa, las emisiones antropogénicas originan alrededor del 90% del azufre que está en circulación en la atmósfera.

Otra circunstancia a tener en cuenta es que los focos de emisión antropogénicos están concentrados, por lo general, en áreas urbanas e industriales. Este conjunto de circunstancias hace que la contribución de las emisiones antropogénicas al problema de la contaminación atmosférica a escala regional sea predominante.

A.I.2.2.- Focos antropogénicos de emisión. Contaminantes emitidos por los vehículos automóviles

Los principales focos de contaminación atmosférica de origen antropogénico son las chimeneas de las instalaciones de combustión para generación de calor y energía eléctrica, los tubos de escape de los vehículos automóviles, los escapes procedentes de las máquinas instaladas a bordo de buques y los procesos industriales.

En las últimas décadas, el automóvil ha aparecido de forma masiva en las ciudades, contribuyendo a incrementar los problemas de contaminación atmosférica como consecuencia de los gases contaminantes que se emiten por los tubos de escape. Los principales contaminantes lanzados por los automóviles son: monóxido y dióxido de carbono (CO) y (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), y compuestos de plomo.

No todos los vehículos lanzan los distintos tipos de contaminantes en las mismas proporciones; éstas dependerán del tipo de motor que se utilice. Los vehículos que emplean gasolina como carburante emiten principalmente monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos de plomo. La emisión de este último tipo de contaminante se debe a la presencia en algunos tipos de gasolina de tetraetilo de plomo, aditivo que se añade para aumentar su índice de octano.

Como anteriormente se dijo que los principales contaminantes emitidos por los vehículos que utilizan motores de ciclo diésel (camiones y autobuses, por ejemplo) son partículas sólidas en forma de hollín que dan lugar a los humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible. En este último caso, se encuentran los motores diésel que componen las plantas energéticas marinas y que han sido contemplados en esta tesis considerablemente en más detalle.

A.I.3.- PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Existe una relación causal entre las fuentes de emisión, la propagación de los contaminantes y la contaminación del aire. A fin de cuantificar cualquier relación entre ellos, se definen los conceptos básicos pertinentes. En términos generales se seguirán las definiciones dadas en la Organización Internacional de Normalización (ISO) ⁽⁴⁾.

A.I.3.1.- Fuente de emisión. Definiciones

ATMÓSFERA: La masa total de aire que circunda la tierra.

EMISIÓN: Es la transferencia o descarga de sustancias contaminantes del aire desde la fuente a la atmósfera libre. El punto o la superficie donde se efectúa la descarga se denomina "fuente". Este término se utiliza para describir la descarga y el caudal de esa descarga.

CONCENTRACIÓN DE LA EMISIÓN: Concentración de contaminantes del aire en una emisión en sus puntos de descarga.

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

FLUJO DE EMISIÓN: Caudal de emisión por unidad de área de la superficie apropiada de una fuente emisora.

CAUDAL DE EMISIÓN: Masa de contaminante transferida a la atmósfera por unidad de tiempo.

FACTOR DE EMISIÓN: Expresión de la razón del caudal en que se emite un contaminante del aire como resultado de una actividad, respecto del caudal de esa actividad. Por ejemplo: los kilogramos de dióxido de azufre emitidos por tonelada de acero producido.

NORMA DE EMISIÓN: Caudal de emisión especificado que tiene un estado legal. Se define frecuentemente en forma estadística fijando un límite al caudal de emisión. Se especifica en el caso de concentración el nivel de dilución u opacidad de referencia.

ALTURA EFICAZ DE CHIMENEA: Altura utilizada con la finalidad de calcular la dispersión de los gases emitidos por una chimenea y que difiere de la altura real de esa chimenea en una cantidad que depende de factores tales como la velocidad de salida, los efectos de flotación y la velocidad del viento; puede ser afectada por la topografía.

MUESTREO ISOCINÉTICO: Método de toma de muestra de material particulado o de metales en suspensión en una corriente de gas para determinar su concentración, de tal modo que la velocidad de muestreo (velocidad y dirección del gas entrando a la tobera o conducto de toma de muestra) sea la misma que la de la corriente gaseosa en el punto de muestreo. Para ello es necesario medir la velocidad del gas.

A.I.3.2.- Propagación de los Contaminantes y Contaminación del Aire. Definiciones:

TRANSMISIÓN: Describe fenómenos colectivos que afectan los contaminantes del aire en la atmósfera libre entre la fuente y el receptor. Son efectos combinados de transporte y reacciones atmosféricas sobre aquellos; incluyen todos los efectos de dinámica física como dilución del contaminante con aire, así como las reacciones físicas y químicas que pueden ocurrir.

AIRE AMBIENTE: Aire exterior al cual pueden estar expuestas personas, plantas, animales y materiales.

CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE: Estado del aire ambiente según lo indique su grado de contaminación.

NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE: Calidad del aire ambiente especificada, que posee un estado legal, frecuentemente definida en forma estadística por la fijación de un límite en la concentración de un contaminante del aire respecto de un período promedio especificado.

CONCENTRACIÓN DE FONDO NATURAL: Concentración de una especie dada en una masa de aire prístina en la cual las emisiones antropogénicas ⁽⁵⁾ son despreciables.

CONTAMINANTE DEL AIRE: Cualquier sustancia emitida a la atmósfera, por una actividad humana o por un proceso natural, que afecte al ser humano o al medio ambiente.

CONTAMINACIÓN DEL AIRE: La presencia habitual, en la atmósfera, de sustancias resultantes de la actividad humana o de procesos naturales, en concentración suficiente, durante un tiempo suficiente y en circunstancias tales como para afectar el confort, la salud o el bienestar de personas, o el medio ambiente.

MATERIA EN SUSPENSIÓN: Toda materia particulada que queda en la atmósfera o en una corriente de gas de chimenea durante largos períodos debido a que el tamaño de las partículas es demasiado pequeño para tener una velocidad de caída apreciable.

CONTAMINANTE PRIMARIO: Contaminante del aire emitido directamente por una fuente.

CONTAMINANTE SECUNDARIO: Contaminante que puede ser producido en la atmósfera por procesos físicos o químicos, a partir de contaminantes primarios u otras sustancias presentes como resultado de emisiones de fuentes estacionarias o móviles.

CONCENTRACIÓN A NIVEL DE SUELO: Cantidad de sólido, líquido o materia gaseosa por unidad de volumen de aire, generalmente medida a una altura especificada.

INMISIÓN: Es la transferencia de contaminantes del aire desde la atmósfera libre a un receptor tal como un ser humano, planta o edificio. La suma de las inmisiones en un intervalo de tiempo proporciona la dosis de inmisión, o sea la cantidad total de contaminantes del aire admitido, aspirado, absorbido o ingerido por parte del receptor. De acuerdo con esta definición, inmisión es tasa, medida o proporción de masa, u otra propiedad cuantificable determinada por unidad de intervalo de tiempo, la cual debe ser medida en lo posible en el receptor. Esto lleva a que debe conocerse la inmisión de un gran número de receptores diferentes.

Los estudios de la contaminación del aire se deben diseñar para medir la inmisión en receptores y los efectos posibles. Uno puede introducir un “receptor virtual” con superficie unidad y propiedades unidades y estudiar, para cada receptor, la posible inmisión como una función de espacio y tiempo. Un receptor virtual puede ser simulado por un sistema de medición especial o tener una correlación definida con una concentración a nivel de suelo. No tiene el mismo significado que concentración a nivel del suelo, pero tiene significado opuesto a emisión. Sin embargo, en muchas oportunidades se emplea el término inmisión en el mismo sentido que el de concentración a nivel del suelo.

DOSIS DE INMISIÓN: Integral del caudal de inmisión en el receptor durante un período de exposición.

FLUJO DE INMISIÓN: Caudal de inmisión por unidad de área de la superficie del receptor.

CAUDAL DE INMISIÓN: Masa de contaminantes transferida al receptor por unidad de tiempo.

MONITOREO: En un sentido amplio, este término designa las mediciones repetidas destinadas a seguir la evolución de un parámetro durante un intervalo de tiempo. Mientras que, en un sentido más restrictivo se aplica a la medida regular de niveles de contaminantes respecto de una norma, o para evaluar la eficacia de un sistema de regulación y de control.

A.I.3.3-. Correlación entre las Inmisiones y las Emisiones de Contaminantes

Desde los focos de contaminación se produce la mezcla y dilución de los contaminantes en el aire, dando lugar a una distribución de la concentración de los mismos, variable tanto en el espacio como en el tiempo. La cantidad de contaminantes presentes en la atmósfera vendrá determinada por la diferencia entre los lanzados y producidos en la misma y los que se eliminan a través de los

procesos de autodepuración por deposición, precipitación y absorción por el suelo, el agua y la vegetación. Estos procesos de autodepuración atmosférica pueden causar acumulaciones excesivas de contaminantes en otros medios (vegetación, suelos, lagos, etc.), incluso lejos del

punto de emisión del contaminante, como consecuencia del arrastre atmosférico producido por el viento.

En las áreas en que se dé una fuerte concentración de focos emisores de contaminantes pueden producirse episodios de fuerte contaminación local como consecuencia de la persistencia de situaciones meteorológicas adversas para la difusión de los contaminantes. Estos episodios se manifiestan con grandes aumentos de la concentración de contaminantes en un área más o menos extensa alrededor de focos contaminantes y pueden verse forzados por las especiales condiciones topográficas de la zona, o por la localización de barreras artificiales (edificios) que pueden favorecer la acumulación de contaminantes.

En otros casos los contaminantes pueden alcanzar bastante altura e introducirse en las masas de aire que forman las corrientes generales de vientos sobre la tierra, siendo arrastrados a muchos kilómetros de las fuentes de emisión.

A.I.3.4-. Influencia de los procesos meteorológicos en la contaminación atmosférica

La concentración de contaminantes a nivel del suelo varía como consecuencia del desequilibrio entre los índices de producción de contaminantes y los de dilución y desaparición de los mismos. Es decir, la concentración de contaminantes dependerá de la relación de fuerzas entre las fuentes contaminantes y las condiciones de auto depuración atmosférica. La importancia de las condiciones meteorológicas en el grado de contaminación atmosférica se reconoce observando las variaciones de la calidad del aire en una zona determinada de unos días a otros, aún cuando las emisiones permanecen prácticamente constantes.

Las principales variables meteorológicas a considerar por su influencia sobre la calidad del aire son:

- a) el transporte convectivo horizontal, que depende de las velocidades y direcciones del viento; y
- b) el transporte convectivo vertical, que depende de la estabilidad atmosférica y del fenómeno de la inversión térmica de las capas de la atmósfera.

Transporte convectivo horizontal. El viento, al transportar los contaminantes, produce su dispersión horizontal y determina la zona que va a estar expuesta a los mismos. Por lo general, una mayor velocidad del viento reducirá las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, ya que se producirá una mayor dilución y mezcla.

No obstante, pueden producirse circulaciones cerradas de viento, como en el caso de las brisas del mar y las de valle y montaña, en las que los contaminantes lanzados a la atmósfera se incorporan a la circulación del viento con lo que se produce una acumulación progresiva de contaminantes, que da lugar a un aumento de la concentración de los mismos en las zonas barridas por este tipo de vientos.

Efectos similares se producen cuando los vientos fuertes inciden perpendicularmente a las crestas montañosas, a un valle o sobre los edificios altos; en estas condiciones, los efectos aerodinámicos de estos obstáculos pueden tener consecuencias negativas para la dispersión de contaminantes, acumulándolos en determinadas zonas.

Transporte convectivo vertical. El principal factor que determina el grado de difusión vertical de contaminantes es la variación vertical de temperaturas en la atmósfera. Podemos determinar la

capacidad de difusión vertical de contaminantes comparando la variación vertical de temperaturas de un estrato de aire atmosférico con el gradiente vertical adiabático del aire, que corresponde a una variación de -1°C por cada 100 metros de altura.

De esta forma se obtienen tres clases diferentes de estabilidad atmosférica en el estrato, según que la variación de la temperatura con la altura sea mayor, igual o inferior que la correspondiente al gradiente vertical adiabático.

a) Si en la capa de aire la temperatura desciende con la altura bastante menos de un grado cada 100 metros, los movimientos verticales del aire están muy limitados por lo que hay poca o nula dispersión vertical de contaminantes. En estas condiciones se dice que la clase de estabilidad atmosférica es del tipo estable.

b) Cuando la temperatura del estrato desciende con la altura más de un grado cada 100 metros de altura, la estabilidad atmosférica será del tipo inestable y los movimientos verticales del aire están muy favorecidos difundiéndose los contaminantes verticalmente hasta donde alcance la inestabilidad.

c) Por último, tenemos el caso de la estratificación indiferente o nula, que se da cuando coinciden la variación de temperatura del estrato con el gradiente vertical adiabático. En estas condiciones la dispersión vertical de contaminantes no está limitada. Cuando la temperatura del aire aumenta con la altura, aparece el fenómeno de la inversión térmica. Este fenómeno produce una fuerte acción limitadora en la dispersión de contaminantes.

La inversión de la temperatura del aire se puede producir como consecuencia del enfriamiento del suelo, por la gran irradiación de calor que se produce en las noches despejadas. El aire se va enfriando progresivamente desde el suelo hacia arriba, produciendo una fuerte estabilidad atmosférica que impide la difusión vertical de los contaminantes. La inversión térmica se forma durante la noche y suele desaparecer progresivamente durante la mañana, cuando la radiación solar calienta de nuevo el suelo y éste a las capas de aire que están en contacto con él.

Existen otros tipos de inversiones que, generalmente, se producen a más altura y que actúan como una capa que limita la dispersión de contaminantes en sentido vertical, incrementando notablemente las concentraciones de contaminantes en los estratos de aire que quedan bajo ellos. Estos tipos de inversiones son las llamadas de subsistencia, que tienden a formarse en las áreas anticiclónicas, y las inversiones frontales, producidas por la superposición de una masa de aire cálido sobre una de aire más frío. Este último tipo de inversión suele tener por lo general una permanencia escasa. Un aspecto interesante de la contaminación atmosférica es la micro meteorología urbana.

Las grandes ciudades crean a su alrededor un microclima propio, el efecto «isla urbana de calor», produciendo un penacho térmico que tiene gran incidencia en la capacidad de difusión de los contaminantes urbanos. A menudo, da lugar a la circulación de vientos locales que elevan el aire caliente del centro de la ciudad, creando una corriente compensada de aire frío de la zona rural circundante que penetra en la zona urbana a niveles bajos.

Estas grandes ciudades alteran el clima urbano de muchas formas; por lo general la temperatura es superior, hay menos viento, menos precipitaciones en forma de nieve, si bien las precipitaciones totales son ligeramente superiores en la ciudad que en las zonas rurales circundantes. La radiación solar, y especialmente los rayos ultravioletas, es más reducida en la ciudad como consecuencia del efecto pantalla producido por la contaminación urbana.

Este incremento de la radiación produciría un aumento apreciable de casos de cáncer de piel en los seres humanos y efectos negativos sobre los organismos, al ser ciertos tipos de placton vegetal, animales invertebrados y algunos vertebrados en determinadas etapas de su ciclo vital, especialmente sensibles a la radiación ultravioleta.

A.I.3.5.- Medición

Las mediciones de los gases contaminantes en atmósfera se hacen según el tipo de sistema o método de medición. Para métodos discontinuos, generalmente manuales, se mide un tiempo dado, normalmente de 1 a 24 horas, según el contaminante y la norma correspondiente. Para métodos continuos o automáticos se mide en forma continua, registrando los datos cada minuto.

Para informar los valores se calculan las concentraciones en promedio por minuto, y a partir de éstos se calculan los promedios horarios. Con ellos se calculan los promedios móviles ⁽⁶⁾ dentro de las 24 horas, según el contaminante, informándose el valor máximo.

A.I.3.6.- Unidades de Medición

Las unidades de medición, según referencia ISO ⁽⁷⁾, se dan en la Tabla A.I.3.6. donde se diferencian las unidades de contaminantes gaseosos y material particulado en suspensión.

Tabla A.I.3.6.: Unidades de Medición de Contaminantes

<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Símbolo</i>
<i>Gases y Vapores</i>		
Fracción de volumen o de masa de los Principales constituyentes (por ejemplo nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono) en aire	Por ciento (en volumen) Por ciento (en masa)	% %
Fracción en volumen de gases contaminantes. Indica en volumen las partes de contaminante contenida en un millón de partes de atmósfera, siempre considerando a la temperatura de 25°C y 760 mm de presión.	Parte por millón (10 ⁻⁶)	ppm
Concentración en masa de contaminantes gaseosos ^(a)	Miligramo cúbico por metro cúbico Microgramo por metro cúbico Nanogramo por metro cúbico	mg/m ³ μg/m ³ ng/m ³
<i>Material Particulado</i>		
Concentración en masa de material particulado en suspensión	Miligramo por metro cúbico Microgramo por metro cúbico Nanogramo por metro cúbico	mg/m ³ μg/m ³ ng/m ³

(a) Cuando las concentraciones son expresadas en términos de masa por unidad de volumen, se deben dar la temperatura y la presión, así como la humedad.

A.I.4.- EFECTOS PRODUCIDOS POR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica afecta a millones de personas de todo el mundo, especialmente a aquellas que viven en los grandes núcleos urbanos y en áreas fuertemente industrializadas, con denso tráfico de vehículos. Las emanaciones de polvos y gases corrosivos deterioran el medio ambiente dando lugar a olores desagradables, pérdida de visibilidad y daños para la salud humana, para los cultivos y otras formas de vegetación y sobre los materiales de construcción. La contaminación atmosférica apareció primero como una molestia grave, pero posteriormente, se ha convertido en una amenaza para la calidad de la vida, ya que una contaminación excesiva puede poner en peligro la salud y llegar a convertir algunas zonas en lugares no aptos para ser normalmente habitados.

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen principalmente de la concentración de contaminantes, del tipo de contaminantes presentes, de tiempo de exposición y de las fluctuaciones temporales en las concentraciones de contaminantes, así como de la

sensibilidad de los receptores y los sinergismos entre contaminantes. Hay que tener muy en cuenta la graduación del efecto a medida que aumenta la concentración y el tiempo de exposición.

A.I.4.1.- Efectos sobre la salud humana

Las relaciones existentes entre las enfermedades humanas y la exposición a la contaminación no son sencillas ni se conocen con exactitud. No obstante, existen pruebas abundantes de que en general, las concentraciones elevadas de contaminantes en el aire son peligrosas para los seres humanos (y animales). Los efectos que producen sobre la salud se ponen claramente de manifiesto, como se ha observado en Londres, Nueva York y Osaka entre otras ciudades, por el aumento de la mortalidad, sobre todo en las personas de edad avanzada o en los individuos más sensibles por cualquier razón. Más difíciles de discernir son los efectos que, a largo plazo, pueden producir las exposiciones episódicas a elevadas concentraciones medias y bajas de contaminantes.

Se ha comprobado la relación existente entre la contaminación atmosférica, producida por partículas en suspensión y anhídrido sulfuroso, y la aparición de bronquitis crónica caracterizada por la producción de flemas, la exacerbación de catarrros y dificultades respiratorias tanto en los hombres como en las mujeres adultas. Se ha observado igualmente, que cuando las concentraciones tanto de SO_2 como de partículas en suspensión superan los 500 microgramos/metro cúbico de aire, como promedio de 24 horas, se produce un aumento de la mortalidad en la población en general, siendo los grupos más sensibles los individuos con procesos cardíacos o pulmonares. Con promedios diarios de 250 microgramos/metro cúbico de SO_2 y de humos se ha registrado el empeoramiento en los enfermos con afecciones pulmonares.

Es de destacar que las concentraciones de partículas en suspensión y de SO_2 que pueden provocar la aparición de efectos sobre la salud, pueden variar de un lugar a otro según cuáles sean las características físicas y químicas de las partículas, y en función de la presencia en el aire de otros contaminantes que puedan producir efectos sinérgicos con aquéllos. La presencia en el aire de elevadas concentraciones de monóxido de carbono (CO) representa una amenaza para la salud. El CO inhalado se combina con la hemoglobina de la sangre, dando lugar a la formación de carboxihemoglobina, lo que reduce la capacidad de la sangre para el transporte de oxígeno desde los pulmones hasta los tejidos.

Se ha comprobado que una saturación de carboxihemoglobina por encima del 10% puede provocar efectos sobre la función psicomotora que se manifiesta con síntomas de cansancio, cefaleas y alteraciones de la coordinación. Por encima del 5% de saturación se producen cambios funcionales cardíacos y pulmonares y se aumenta el umbral visual. No se han encontrado pruebas que indiquen efectos significativos con una concentración de carboxihemoglobina inferior al 2%. Los óxidos de nitrógeno, NO_x , son contaminantes igualmente peligrosos para la salud. La mayor parte de los estudios relativos a los efectos de los NO_x se han ocupado, sobre todo, del NO_2 ya que es el más tóxico. Los efectos producidos por el NO_2 sobre los animales y los seres humanos afectan, casi por entero, al tracto respiratorio. Se ha observado que una concentración media de 190 microgramos de NO_2 por metro cúbico de aire, superada el 40% de los días, aumenta la frecuencia de infecciones de las vías respiratorias en la población expuesta. Otros tipos de contaminantes que afectan a la salud humana son los oxidantes fotoquímicos. Se han realizado estudios epidemiológicos en otras ciudades y no se descubrió ningún aumento de mortalidad como consecuencia de episodios de contaminación fotoquímica, cuando las concentraciones de oxidantes variaban entre 0.5 y 0.9 partes por millón.

No obstante, se ha observado que los oxidantes fotoquímicos tienen efectos nocivos sobre la salud, produciendo irritación de los ojos y mucosas. Los oxidantes fotoquímicos afectan especialmente a las personas con afección asmática y bronca pulmonar, en los que se han

observado crisis asmáticas y disminución de la función pulmonar cuando las concentraciones atmosféricas de oxidantes eran superiores a 500 microgramos por metro cúbico de aire.

Los metales tóxicos presentes en el aire representan una amenaza para la salud humana cuando se inhalan en cantidades suficientes, debido a la tendencia que presenta el organismo a su acumulación. Por su importancia, destacaremos los efectos producidos por el plomo sobre la salud humana. Los compuestos inorgánicos del plomo atmosférico son absorbidos por los humanos, principalmente a través del sistema respiratorio, alcanzando el torrente sanguíneo aproximadamente el 35% del plomo inhalado por los pulmones. Una vez incorporado el plomo a la corriente sanguínea, una parte se almacena en los huesos y otra se expulsa por la orina, en una continua fase de renovación en el organismo.

A partir de ciertas cantidades puede producir efectos adversos en el comportamiento, afectan la inteligencia de los niños y ser causa de anormalidades en los fetos de madres gestantes. Los adultos, por lo general, son menos sensibles que los niños a los efectos del plomo, pero una acumulación excesiva en el organismo puede producir serios e irreversibles daños en su sistema nervioso.

A.I.4.2.- Efectos sobre las plantas

Las plantas muestran una especial sensibilidad a la mayor parte de los contaminantes del aire, y sufren daños significativos a concentraciones mucho más bajas que las necesarias para causar efectos perjudiciales sobre la salud humana y animal. Es muy difícil establecer valores límites de la contaminación atmosférica a partir de los cuales los efectos negativos se empiezan a manifestar, ya que estos dependen de la constitución de la planta y de la especie de que se trate, es decir, hay una especificidad de respuestas.

Por otra parte, los efectos producidos por la contaminación atmosférica se pueden manifestar por la alteración de diversos mecanismos vitales de las plantas. Así, las funciones metabólicas y los tejidos vegetales se pueden ver afectados como consecuencia de la acción de gases como el anhídrido sulfuroso, el monóxido de carbono y los compuestos de flúor. Los daños causados se manifiestan en forma de necrosis foliar en áreas localizadas que presentan un color marrón-rojizo-blanco, de clorosis, adquiriendo el tejido una coloración verde pálida o amarilla, o por la aparición de manchas puntuales necróticas. Si la acción del contaminante es muy fuerte puede llegar a paralizar el crecimiento de la planta.

Entre los distintos contaminantes que se presentan generalmente en el aire ambiente, el SO₂ es el que tiene mayor importancia debido a la gran toxicidad que tiene para la vegetación. Los daños producidos por el SO₂ a las plantas obedecen a la exposición a altas concentraciones durante periodos cortos; o por la exposición a concentraciones relativamente bajas durante largos periodos.

Los daños agudos se producen como consecuencia de exposiciones cortas a concentraciones elevadas. Exposiciones medias diarias de 130 microgramos de SO₂ por metro cúbico de aire durante el período de crecimiento, pueden causar daños en las coníferas más sensibles.

Estos daños se caracterizan por la aparición de necrosis apicales de color rojo o anaranjado. La exposición a menores concentraciones durante tiempos de exposición más largos ocasiona lesiones crónicas. Exposiciones medias anuales de anhídrido sulfuroso de 50 microgramos por

metro cúbico de aire pueden causar daños a especies forestales sensibles, estas se manifiestan por un gradual aumento del tono amarillo de la hoja que se va extendiendo desde la zona apical a la base de esta, causada por dificultades en el mecanismo sintetizador de la clorofila. En las plantas dañadas se encuentran grandes cantidades de sulfato en las hojas con síntomas crónicos.

Las brumas de ácido sulfúrico, causadas por la presencia en el aire de los óxidos de azufre, producen daños en las hojas, caracterizados por la aparición de manchas producidas por las gotas de ácido depositadas sobre las hojas humedecidas por el rocío o la niebla. Concentraciones relativamente bajas de SO_2 pueden causar daños importantes en la vegetación sensible, como consecuencia de la acción sinérgica de este contaminante con el ozono y los óxidos de nitrógeno, aunque estos se presenten en bajas concentraciones en el aire. El flúor y sus derivados son contaminantes del aire que se caracterizan por ser tóxicos en general para las plantas a muy pequeñas concentraciones.

La sensibilidad de las plantas a la acción del flúor varía, como en el caso del SO_2 , según las especies y las condiciones del medio, siendo especialmente sensibles a este contaminante las viñas y las plantaciones frutales, especialmente las de frutos con hueso (como el melocotón). En el medio forestal, las resinosas son las especies más sensibles al flúor, ya que al tener hojas perennes y tener el flúor un efecto acumulativo sobre los tejidos, se va almacenando hasta sobrepasar los umbrales de toxicidad, lo que da lugar a la aparición de necrosis que pueden llegar a producir la muerte de grandes masas forestales.

Un aspecto importante del efecto acumulativo del flúor es su transmisión a través de las cadenas alimentarias. El mecanismo es el siguiente: el flúor presente en el aire se acumula en los pastos y de éstos pasa a los animales, siendo los bovinos los más afectados. La acumulación del flúor en los tejidos puede causar la aparición de la fluorosis, enfermedad que se presenta sobre todo en el ganado vacuno.

Observaciones realizadas muestran que la ingestión de pastos puede ser tolerada sin efectos negativos, cuando su concentración en flúor no supera los 40 ppm como media durante todo el año. Se ha observado la aparición de lesiones visibles sobre las hojas después de una exposición durante un día a concentraciones de flúor en el aire de 3 a 10 microgramos por metro cúbico. Para concentraciones entre 0.5 y 3 microgramos/metro cúbico los efectos se manifiestan cuando transcurren períodos de exposición superiores a un mes.

Entre los óxidos de nitrógeno solo el NO_2 es tóxico para las plantas, a pequeñas concentraciones y largo tiempo de exposición. Los daños se manifiestan por la aparición de necrosis y clorosis de color negro o marrón rojizo en las hojas. Los sinergismos de NO_2 y SO_2 provocan a bajas concentraciones alteraciones en la vegetación. Este hecho se ha observado en las zonas urbanas.

La contaminación atmosférica fotoquímica produce daños en la vegetación a concentraciones que ya se están alcanzando en algunas ciudades. El ozono y el PAN son los principales causantes de estos daños. Las lesiones producidas por el ozono se manifiestan como manchas blancas o punteados claros sobre el haz de las hojas. Los daños producidos por los PAN se presentan como graves lesiones foliares caracterizadas por una tintura plateada o vidriosa en el envés de la hoja, así como por un ataque general en las hojas jóvenes.

La radiación gamma produce numerosos efectos biológicos sobre las plantas, incluyendo daños a los ácidos nucleicos, citocromos, mitocondria y membranas celulares. Una irradiación crónica en una amplia zona produce una disminución gradual de la diversidad de plantas. Poco a poco los bosques van muriendo, empezando por los árboles más sensibles como los pinos.

A.I.4.3.- Efectos sobre los materiales

Cada vez se está prestando más atención, tanto por sus repercusiones económicas como por los daños irreparables que causa sobre los objetos y los monumentos de alto valor histórico-artístico, a los efectos que la contaminación atmosférica produce sobre los materiales. La acción de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales puede manifestarse por la sedimentación de partículas sobre la superficie de los mismos, afeando su aspecto externo, o por ataque químico al reaccionar el contaminante con el material. Los SO_x causan daños a muchos tipos de materiales, bien directa o indirectamente. Un alto contenido de SO_x en el aire produce la aceleración de la corrosión de los metales tales como el acero al carbono, zinc, acero galvanizado, compuestos del cobre, níquel y aluminio. Esta aceleración se ve favorecida por la presencia de partículas depositadas por la humedad y por la temperatura.

En general, puede señalarse que la corrosividad de una atmósfera depende de condiciones meteorológicas y factores de contaminación. Se han observado correlaciones entre tasas de corrosión en metales y concentraciones de SO_2 en la atmósfera, dándose las tasas altas de corrosión más altas en zonas industrializadas. Las nieblas de ácido sulfúrico procedentes de la conversión catalítica del SO_2 a SO_3 en la atmósfera, atacan a los materiales de construcción como el mármol, la caliza y la argamasa, convirtiendo los carbonatos en sulfatos solubles en el agua de lluvia. Esto, unido a que el volumen específico de los sulfatos es mayor que el de los carbonatos, hace que en la piedra aparezcan escamas y se debilite mecánicamente.

Los compuestos de azufre pueden producir daños en pinturas plásticas, papel, fibras textiles y sobre los contactos eléctricos de los sistemas electrónicos, dando lugar a deficiencias en su funcionamiento. La acción de los oxidantes fotoquímicos se produce sobre todo en los cauchos y elastómeros en los que causan un rápido envejecimiento y agrietamiento. Los óxidos de nitrógeno decoloran y estropean las fibras textiles y los nitratos producen la corrosión de las aleaciones de cuproníquel.

A.I.4.4.- Efectos globales

Cada vez está más admitida la necesidad de realizar estudios sobre los posibles efectos que a largo plazo puede producir la contaminación atmosférica sobre los distintos ecosistemas, sobre el clima y sobre la estratosfera. Tanto las modificaciones de las características de los suelos, debidas al lavado de los elementos de este por las lluvias ácidas, como los cambios producidos en las grandes masas de agua por el aumento de la concentración de metales tóxicos, pueden tener consecuencias ecológicas irreversibles.

El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y de otros contaminantes en la atmósfera puede dar lugar a una elevación general de la temperatura del globo, por «efecto invernadero», que modificaría el régimen de lluvias, lo que produciría alteraciones sobre las tierras cultivables y la extensión de los desiertos.

Por otra parte, los sulfatos y las partículas finas que disminuyen la visibilidad pueden igualmente reducir la intensidad de la radiación solar. Los hidrocarburos halogenados y los óxidos de nitrógeno emitidos por los aviones supersónicos pueden provocar una disminución de ozono en la estratosfera con el consiguiente aumento de la radiación ultravioleta que llegaría a la Tierra.

A.I.4.5- Efectos sobre los ecosistemas (lluvias ácidas)

Los primeros efectos producidos por las precipitaciones ácidas se detectaron en cientos de lagos de Escandinavia, alrededor de los años 60. En la actualidad, más de 18.000 lagos están acidificados, en Suecia alrededor de 6.000 de ellos muestran graves daños sobre la biología

acuática, y unos 2.000 de los situados en la zona meridional y central han perdido sus poblaciones piscícolas. La acidificación de las aguas interiores tiene efectos muy graves sobre los ecosistemas acuáticos.

Se ha demostrado que todos los tipos de organismos integrantes de los ecosistemas de agua dulce son sensibles a la acidificación, produciéndose cambios en todos los niveles tróficos. La acidificación de los lagos y de las masas de agua se está extendiendo progresivamente cada vez a mayor número de países, afectando día a día a más extensas áreas.

Las zonas más propensas a la acidificación del agua tienen suelos ácidos de poca profundidad, superpuestos a rocas graníticas o son suelos arenosos muy erosionados. El aumento de la acidez del agua de los lagos y ríos provoca un fuerte aumento del contenido de iones aluminio disueltos en el agua. El ión aluminio es muy tóxico para la mayor parte de los organismos y se cree que la causa última de la muerte de las poblaciones de peces en los lagos acidificados se debe al envenenamiento por aluminio.

Otros metales tales como el cadmio, zinc y plomo tienen igualmente una mayor facilidad para disolverse, por lo que son más accesibles para los animales y plantas acuáticas. Los suelos presentan, por lo general, una mayor resistencia a la acidificación que el agua. No obstante, el grado de sensibilidad puede variar muy ampliamente de unas zonas a otras dependiendo, principalmente, del espesor de la capa de humus, de la consistencia del sustrato, así como del tipo de rocas y suelo. Uno de los efectos más importantes de la acidificación de los suelos es, probablemente, el incremento de la movilidad con las consiguientes pérdidas por lixiviación de ciertos cationes metálicos de carácter básico tales como el calcio, magnesio, potasio y aluminio.

En Europa Central, las altas deposiciones de compuestos de azufre y nitrógeno han producido graves daños sobre amplias áreas de suelo y bosques. El daño a los bosques probablemente ha sido causado por la acción combinada de ácidos y metales en el suelo y por las altas concentraciones de SO₂ presentes en el aire de estas zonas. La combinación de un bajo pH en el agua del suelo unido a la presencia de metales, principalmente aluminio, produce daños en las raíces de los árboles, a través de las cuales absorben gran cantidad de nutrientes. Este hecho produce una pérdida de vitalidad haciéndolos especialmente sensibles a las plagas.

A.I.4.6- Efectos sobre el clima (efecto invernadero)

Durante los últimos años se ha venido poniendo de manifiesto una preocupación reciente por los posibles efectos que sobre el clima pudiera causar el aumento progresivo de contaminantes en la atmósfera como consecuencia de las actividades humanas.

Observaciones realizadas en Suecia, Australia, Alaska y Hawai muestran que la concentración de CO₂, que oscilaba entre 265 y 290 ppm antes de los años cincuenta, llegó a ser de 330 ppm en 1976, aumentando a un ritmo de alrededor de 1 ppm en el curso de los últimos años. Se cree que el incremento de CO₂ en la atmósfera es debido a las alteraciones que las actividades humanas producen en el ciclo biogeoquímico del carbono ya que, por una parte, en la combustión de combustible fósiles y en los incendios forestales se producen grandes cantidades de CO₂, y por otra parte, estos mismos incendios y la tala progresiva de bosques, que produce una disminución de las masas forestales mundiales, la degradación del suelo y la creciente desertificación, producen una disminución de la tasa de la absorción total del CO₂ presente en la atmósfera por la vegetación.

El incremento de la concentración del CO₂ en la atmósfera puede alterar la temperatura de la Tierra debido a que el CO₂ es transparente a la radiación solar recibida del sol, dejándola pasar

libremente, pero absorbe la radiación infrarroja emitida desde la tierra. El efecto total es que cuanto mayor sea la concentración de CO₂ en la atmósfera, mayor es la cantidad de energía recibida por la Tierra desde el Sol que queda atrapada en la atmósfera en forma de calor. Este fenómeno que se conoce con el nombre de «efecto invernadero» produciría un recalentamiento de la atmósfera. Se ha estimado que, de duplicarse la concentración actual de CO₂ en la atmósfera, podría aumentar en dos o tres grados centígrados la temperatura de esta. En las zonas lluviosas se incrementarán las precipitaciones y las zonas áridas serán aún más áridas, mientras que los hielos polares comenzarán a derretirse.

Los sulfatos y las partículas finas presentes en la atmósfera pueden tener igualmente efectos sobre el clima. Las partículas finas tienen una doble acción sobre la radiación solar: por una parte, difunden la luz incidente y, por otra, absorben una parte de esta radiación, lo que produce un calentamiento de las partículas y la emisión de radiación infrarroja. Los efectos atmosféricos que producen dependerán de la altitud a que las partículas se encuentren. Las de baja altura disminuyen el flujo solar sobre el suelo, pero contribuyen a aumentar el efecto invernadero. A más alta temperatura, el efecto de barrera solar es preponderante, produciendo un enfriamiento de la baja atmósfera y un calentamiento en la estratosfera.

Las partículas pueden causar también efectos sobre el clima de forma indirecta al actuar como núcleos de condensación del vapor de agua y jugar éste un importante papel en los cambios de calor atmosférico. Otro tipo de contaminantes vertidos a la atmósfera que pueden afectar el clima son los clorofluorocarbonos, debido a su acción sobre la capa de ozono y a que, como ya se ha indicado anteriormente, el ozono es el principal absorbente de la radiación solar ultravioleta en la estratosfera, regulando la temperatura de la misma.

A.I.4.7.- Efectos sobre la estratosfera

La presencia en la estratosfera de determinados compuestos, especialmente los clorofluorocarbonos, puede provocar una disminución de la concentración de ozono en la estratosfera. La capa estratosférica de ozono protege la superficie de la tierra de una exposición excesiva a los rayos solares ultravioletas actuando como filtro. Una disminución sensible de esta capa protectora tendría efectos perjudiciales para la salud humana y para la biosfera.

BILIOGRAFÍA ANEXO IV

- (1) Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), 1973: Instrumentation for Environmental Monitoring. NSF Grant No. –AG-Laboratory, Berkeley, CA.
- (2) El término smog proviene de las palabras inglesas “smoke” (humo) y “fog” (niebla) y se emplea para describir el fenómeno en la ciudad debido al estancamiento de las masas de aire producido por la inversión térmica que incrementa los niveles de residuos.
- (3) Efecto sinérgico es el fenómeno que presentan algunas sustancias que al encontrarse en presencia de otras incrementan su agresividad frente al medio que las rodea.
- (4) International Organization for Standardization ISO Standard Compendium – Environment Air Quality, Edition 1994. ISO 4225:1994. Air Quality – General Aspects – Vocabulary

(5) Generada por el hombre.

(6) Los promedios se realizan tomando el número de horas consideradas, desplazando en una hora el tiempo de inicio (por ejemplo, para el CO se calculan los promedios móviles de 8 h. en forma corrida).

(7) ISO 4226:1993(E) International Standard. Air Quality - General aspect - Units of measurement.

ANEXO V

MARPOL ANEXO VI y CÓDIGO NO_x 2008 y DIRECTRICES PARA LA IMPLANTACIÓN

Edición de 2013

Suplemento

Septiembre 2015

Desde la publicación del *Anexo VI del Convenio MARPOL y el Código NO_x 2008 y Directrices para la implantación*, el Comité para la protección del medio marino (Comité MEPC) ha adoptado resoluciones que enmiendan tanto el Anexo VI del Convenio MARPOL como el Código técnico sobre los NO_x 2008. El presente suplemento contiene, en orden cronológico según su fecha de adopción, las enmiendas que han entrado o habrán entrado en vigor antes de la publicación de la próxima edición refundida.

Página	Resolución	Enmiendas	Aplicación
3	MEPC.247(66)	Anexo VI: enmiendas para conferir carácter obligatorio a la utilización del Código III	1 enero 2016
7	MEPC.251(66)	Anexo VI: reglas 2, 13, 19, 20 y 21; Suplemento del Certificado IAPP y Código técnico sobre los NO _x 2008: certificación de los motores de combustible mixto	1 septiembre 2015
19	MEPC.258(67)	Anexo VI: reglas 2 y 13 y Suplemento del Certificado IAPP	1 marzo 2016

RESOLUCIÓN MEPC.247(66) adoptada el 4 de abril de 2014

ENMIENDAS AL ANEXO DEL PROTOCOLO DE 1997 QUE ENMIENDA EL CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES, 1973, MODIFICADO POR EL PROTOCOLO DE 1978

(para conferir carácter obligatorio a la utilización del Código III)

EL COMITÉ DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO,

RECORDANDO el artículo 38 a) del Convenio constitutivo de la Organización Marítima Internacional, que trata de las funciones del Comité de protección del medio marino (el Comité) conferidas por los convenios internacionales relativos a la prevención y contención de la contaminación del mar ocasionada por los buques,

TOMANDO NOTA del artículo 16 del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973 (en adelante denominado "Convenio de 1973"), el artículo VI del Protocolo de 1978 relativo al Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973 (en adelante denominado "Protocolo de 1978"), y el artículo 4 del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 (en adelante denominado "Protocolo de 1997"), en los que conjuntamente se especifica el procedimiento para enmendar el Protocolo de 1997 y se confiere

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

al órgano pertinente de la Organización la función de examinar y adoptar enmiendas al Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997,

TOMANDO NOTA TAMBIÉN de que, en virtud del Protocolo de 1997, el Anexo VI, titulado "Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques" (en adelante denominado "Anexo VI"), se añadió al Convenio de 1973,

RECORDANDO que la Asamblea, en su vigésimo octavo periodo de sesiones ordinario, adoptó, mediante la resolución A.1070(28), el Código para la implantación de los instrumentos de la OMI (Código III),

HABIENDO EXAMINADO las propuestas de enmienda al Anexo VI del Convenio MARPOL para conferir carácter obligatorio a la utilización del Código III,

1 ADOPTA, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) d) del Convenio de 1973, las enmiendas al Anexo VI, cuyo texto figura en el anexo de la presente resolución;

2 DETERMINA que, de conformidad con lo dispuesto en la nueva regla 24 del Anexo VI, las palabras "debería/deberían" utilizadas en el Código III (anexo de la resolución A.1070(28)) se interpretarán con el significado de "deberá/deberán", excepto en lo que se refiere a los párrafos 29, 30, 31 y 32;

3 DETERMINA, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) f) iii) del Convenio de 1973, que las enmiendas se considerarán aceptadas el 1 de julio de 2015, salvo que, con anterioridad a esa fecha, un tercio cuando menos de las Partes, o aquellas partes cuyas flotas mercantes combinadas representen como mínimo el 50 % del tonelaje bruto de la flota mercante mundial, hayan notificado a la Organización que rechazan las enmiendas;

4 INVITA a las Partes a que tomen nota de que, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) g) ii) del Convenio de 1973, dichas enmiendas entrarán en vigor el 1 de enero de 2016, una vez aceptadas de conformidad con lo estipulado en el párrafo 2 anterior;

5 PIDE al Secretario General que, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) e) del Convenio de 1973, remita a todas las Partes en el Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997, copias certificadas de la presente resolución y del texto de las enmiendas que figura en el anexo;

6 PIDE ADEMÁS al Secretario General que remita copias de la presente resolución y de su anexo a los Miembros de la Organización que no son Partes en el Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997.

ANEXO
ENMIENDAS AL ANEXO VI DEL CONVENIO MARPOL

1 Se añade el siguiente texto al final de la regla 2:

"A los efectos del presente anexo:

44 Por *auditoría* se entiende el proceso sistemático, independiente y documentado para obtener pruebas de auditoría y evaluarlas objetivamente con el fin de determinar en qué medida se cumplen los criterios de auditoría.

45 Por *Plan de auditorías* se entiende el Plan de auditorías de los Estados Miembros de la OMI establecido por la Organización teniendo en cuenta las directrices elaboradas por la Organización.*

46 Por *Código para la implantación* se entiende el Código para la implantación de los instrumentos de la OMI (Código III), adoptado por la Organización mediante la resolución A.1070(28).

47 Por *norma de auditoría* se entiende el Código para la implantación.

* Véanse el Marco y los Procedimientos para el Plan de auditorías de los Estados Miembros de la OMI, adoptados mediante la resolución A.1067(28)." 2

Se añade el siguiente nuevo capítulo 5:

"Capítulo 5 – Verificación del cumplimiento de las disposiciones del presente anexo

Regla 24

Ámbito de aplicación

Las Partes utilizarán las disposiciones del Código para la implantación en el ejercicio de las obligaciones y responsabilidades que figuran en el presente anexo.

Regla 25

Verificación del cumplimiento

1) Cada Parte estará sujeta a auditorías periódicas por parte de la Organización de conformidad con la norma de auditoría para verificar el cumplimiento y la implantación del presente anexo.

2) El Secretario General de la Organización será el responsable de administrar el Plan de auditorías, basándose en las directrices elaboradas por la Organización.*

3) Cada Parte será responsable de facilitar la realización de las auditorías y la implantación de un programa de medidas para abordar las conclusiones, basándose en las directrices elaboradas por la Organización.*

4) La auditoría de todas las Partes:

.1 estará basada en un calendario general establecido por el Secretario General de la Organización, teniendo en cuenta las directrices elaboradas por la Organización;* y

.2 se realizará a intervalos periódicos, teniendo en cuenta las directrices elaboradas por la Organización.*

* Véanse el Marco y los Procedimientos para el Plan de auditorías de los Estados

Miembros de la OMI, adoptados mediante la resolución A.1067(28)."

RESOLUCIÓN MEPC.251(66) adoptada el 4 de abril de 2014

ENMIENDAS AL ANEXO DEL PROTOCOLO DE 1997 QUE ENMIENDA EL CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES, 1973, MODIFICADO POR EL PROTOCOLO DE 1978

(Enmiendas a las reglas 2, 13, 19, 20 y 21 y al Suplemento del Certificado IAPP del Anexo VI del Convenio MARPOL y certificación de los motores de combustible mixto en virtud del Código técnico sobre los NO_x 2008)

EL COMITÉ DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO,

RECORDANDO el artículo 38 a) del Convenio constitutivo de la Organización Marítima Internacional, que trata de las funciones del Comité de protección del medio marino conferidas por los convenios internacionales relativos a la prevención y contención de la contaminación del mar ocasionada por los buques,

TOMANDO NOTA del artículo 16 del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973 (en adelante denominado "Convenio de 1973"), el artículo VI del Protocolo de 1978 relativo al Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973 (en adelante denominado "Protocolo de 1978"), y el artículo 4 del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 (en adelante denominado "Protocolo de 1997"), en los que conjuntamente se especifica el procedimiento para enmendar el Protocolo de 1997 y se confiere al órgano pertinente de la Organización la función de examinar y adoptar enmiendas al Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997,

TOMANDO NOTA TAMBIÉN de que, en virtud del Protocolo de 1997, el Anexo VI, titulado "Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques" (en adelante denominado "Anexo VI"), se añadió al Convenio de 1973,

TOMANDO NOTA ADEMÁS de la regla 13 del Anexo VI, que confiere carácter obligatorio al Código técnico relativo al control de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores diésel marinos (Código técnico sobre los NO_x 2008) en virtud de dicho anexo,

TOMANDO NOTA TAMBIÉN de que el Anexo VI revisado, adoptado mediante la resolución MEPC.176(58), y el Código técnico sobre los NO_x 2008, adoptado mediante la resolución MEPC.177(58), entraron en vigor el 1 de julio de 2010,

HABIENDO EXAMINADO el proyecto de enmiendas al Anexo VI revisado y al Código técnico sobre los NO_x 2008,

1 ADOPTA, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) d) del Convenio de 1973, las enmiendas al Anexo VI y al Código técnico sobre los NO_x 2008, cuyo texto figura en el anexo de la presente resolución;

2 DETERMINA, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) f) iii) del Convenio de 1973, que las enmiendas se considerarán aceptadas el 1 de marzo de 2015, salvo que, con anterioridad a esa fecha, un tercio cuando menos de las Partes, o aquellas Partes cuyas flotas mercantes combinadas representen como mínimo el 50 % del arqueo bruto de la flota mercante mundial, hayan notificado a la Organización que rechazan las enmiendas;

3 INVITA a las Partes a que tomen nota de que, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) g) ii) del Convenio de 1973, dichas enmiendas entrarán en vigor el 1 de septiembre de 2015, una vez aceptadas de conformidad con lo estipulado en el párrafo 2 anterior;

4 PIDE al Secretario General que, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) e) del Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997, remita a todas las Partes en dicho convenio copias certificadas de la presente resolución y del texto de las enmiendas que figura en el anexo;

5 PIDE ADEMÁS al Secretario General que remita copias de la presente resolución y de su anexo a los Miembros de la Organización que no son Partes en el Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997.

ANEXO

ENMIENDAS AL ANEXO VI DEL CONVENIO MARPOL Y AL CÓDIGO TÉCNICO SOBRE LOS NO_x 2008

ENMIENDAS AL ANEXO VI DEL CONVENIO MARPOL

Capítulo 1 – Generalidades

Regla 2

Definiciones

1 Se enmienda el párrafo 26 del siguiente modo:

"26 Por *buque gasero* se entiende, a los efectos del capítulo 4 del presente anexo, un buque de carga, que no sea un buque para el transporte de GNL tal como se define en el párrafo 38 de la presente regla, construido o adaptado y utilizado para el transporte a granel de cualquier gas licuado."

2 Se añaden los siguientes párrafos nuevos 38 a 43 tras el párrafo 37 existente:

"38 Por *buque para el transporte de GNL* se entiende, a los efectos del capítulo 4 del presente anexo, un buque de carga construido o adaptado y utilizado para el transporte a granel de gas natural licuado (GNL).

39 Por *buque de pasaje dedicado a cruceros* se entiende, a los efectos del capítulo 4 del presente anexo, un buque de pasaje que no dispone de cubierta de carga, proyectado exclusivamente para el transporte comercial de pasajeros en alojamiento para pernoctar durante un viaje por mar.

40 Por *propulsión tradicional* se entiende, a los efectos del capítulo 4 del presente anexo, un sistema de propulsión en el que el motor alternativo de combustión interna principal es el motor primario y va acoplado a un eje de propulsión, ya sea directamente o a través de una caja de cambios.

41 Por *propulsión no tradicional* se entiende, a los efectos del capítulo 4 del presente anexo, un sistema de propulsión distinto a la propulsión tradicional, incluidos los sistemas de propulsión diésel-eléctrica, propulsión con turbina y propulsión híbrida.

42 Por *buque de carga con capacidad rompehielos* se entiende, a los efectos del capítulo 4 del presente anexo, un buque de carga que está proyectado para romper de manera independiente hielo plano a una velocidad de al menos 2 nudos cuando el espesor del hielo plano es igual o superior a 1 m y cuya resistencia a la flexión del hielo sea como mínimo de 500 kPa.

43 Por *buque entregado el 1 de septiembre de 2019 o posteriormente* se entiende:

.1 un buque cuyo contrato de construcción se formalice el 1 de septiembre de 2015 o posteriormente; o

.2 en ausencia de un contrato de construcción, un buque cuya quilla sea colocada o cuya construcción se halle en una fase equivalente de construcción el 1 de marzo de 2016 o posteriormente; o

.3 un buque cuya entrega se produzca el 1 de septiembre de 2019 o posteriormente."

Capítulo 2 – Reconocimiento, certificación y medios de control Regla 5

Reconocimientos

3 En la primera frase del párrafo 4.2 se sustituyen las palabras "un buque" por "un buque nuevo".

Capítulo 3 – Prescripciones para el control de las emisiones de los buques

Regla 13

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

4 Se enmienda el párrafo 2.2 de modo que diga:

"2.2 En el caso de una transformación importante que suponga la sustitución de un motor diésel marino por un motor diésel marino no idéntico o la instalación de un motor diésel marino adicional, se aplicarán las normas estipuladas en la presente regla en el momento de la sustitución o adición del motor. Por lo que respecta únicamente a los motores de sustitución, si no es posible que dicho motor de sustitución se ajuste a las normas indicadas en el apartado 5.1.1 de la presente regla (nivel III, según proceda), ese motor de sustitución habrá de ajustarse a las normas indicadas en el párrafo 4 de la presente regla (nivel II), teniendo en cuenta las directrices elaboradas por la Organización.*

Véanse las Directrices de 2013 previstas en la regla 13.2.2 del Anexo VI del Convenio MARPOL con respecto a los motores de sustitución no idénticos que no tienen que ajustarse al límite del nivel III, adoptadas por el MEPC mediante la resolución MEPC.230(65)."

5 Se enmiendan los párrafos 5.1 y 5.2 de modo que digan:

"Nivel III

5.1 A reserva de lo dispuesto en la regla 3 del presente anexo, en una zona de control de las emisiones designada para el control de los NO_x del nivel III en virtud del párrafo 6 de la presente regla, el funcionamiento de los motores diésel marinos instalados en buques:

.1 está prohibido, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno (calculada en forma de emisión total ponderada de NO₂) emitidos por el motor se encuentre dentro de los límites que figuran a continuación, siendo *n* el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal):

.1 3,4 g/kWh si *n* es inferior a 130 rpm;

.2 $9 \cdot n^{(-0,2)}$ g/kWh si n es igual o superior a 130 rpm pero inferior a 2.000 rpm;

.3 2,0 g/kWh si n es igual o superior a 2.000 rpm;

cuando:

.2 dicho buque ha sido construido el 1 de enero de 2016 o posteriormente y opere en la zona de control de las emisiones de Norteamérica o en la zona de control de las emisiones del mar Caribe de los Estados Unidos;

cuando:

.3 dicho buque opera en una zona de control de las emisiones designada para el control de los NO_x del nivel III en virtud del párrafo 6 de la presente regla que no es la zona de control de las emisiones descritas en el párrafo 5.1.2 de esta regla, y ha sido construido en la fecha de adopción de dicha zona de control de las emisiones o posteriormente, o en una fecha posterior que se especifique en la enmienda mediante la cual se designe la zona de control de las emisiones de NO_x del nivel III.

5.2 Las normas indicadas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla no se aplicarán:

.1 a los motores diésel marinos instalados en los buques que tengan una eslora (L), según se define ésta en la regla 1.19 del Anexo I del presente convenio, inferior a 24 m y que estén específicamente proyectados, y se utilicen exclusivamente, para fines recreativos; ni

.2 a los motores diésel marinos instalados en buques que tengan, según la placa de identificación, una potencia combinada de propulsión del motor diésel inferior a 750 kW, si se demuestra de manera satisfactoria a juicio de la Administración que el buque no puede cumplir las normas estipuladas en el párrafo 5.1.1 de la presente regla debido a limitaciones de proyecto o construcción del buque; ni

.3 a los motores diésel marinos instalados en buques construidos antes del 1 de enero de 2021 y de arqueo bruto inferior a 500 que tengan una eslora (L), según se define ésta en la regla 1.19 del Anexo I del presente convenio, igual o superior a 24 m y que estén específicamente proyectados, y se utilicen exclusivamente, para fines recreativos."

6 Se suprime el párrafo 10.

Capítulo 4 – Reglamento para la eficiencia técnica de los buques Regla 19

Ámbito de aplicación

7 Se añade el siguiente nuevo apartado 2.2:

"2 a los buques carentes de propulsión mecánica y a las plataformas, incluidas las IFPAD y UFA y las plataformas de perforación, independientemente de su propulsión."

8 El párrafo 3 se enmienda de modo que diga:

"3 Las reglas 20 y 21 del presente anexo no se aplicarán a los buques que tengan sistemas de propulsión no tradicional, con la salvedad de que las reglas 20 y 21 se aplicarán a los buques de pasaje dedicados a cruceros con propulsión no tradicional y a los buques para el transporte de GNL con propulsión tradicional o no tradicional, entregados el 1 de septiembre de 2019 o posteriormente, según se definen en el párrafo 43 de la regla 2. Las reglas 20 y 21 no se aplicarán a los buques de carga con capacidad rompehielos."

Regla 20

Índice de eficiencia energética de proyecto obtenido (EEDI obtenido)

9 Se sustituye el párrafo 1 por el siguiente:

"1 El EEDI obtenido se calculará para:

- .1 todo buque nuevo;
- .2 todo buque nuevo que haya sufrido una transformación importante; y
- .3 todo buque nuevo o existente que haya sufrido una transformación importante de tal magnitud que sea considerado por la Administración como un buque de nueva construcción,

que pertenezca a una o varias de las categorías enumeradas en las reglas 2.25 a 2.35, 2.38 y 2.39 del presente anexo. El EEDI obtenido será específico para cada buque, indicará el rendimiento estimado del buque en términos de eficiencia energética, e irá acompañado del expediente técnico del EEDI que contenga la información necesaria para el cálculo del EEDI obtenido y muestre el proceso de cálculo. La Administración o una organización debidamente autorizada por ella* verificará el EEDI obtenido basándose en el expediente técnico del EEDI.

Véase el Código para las organizaciones reconocidas (Código OR), adoptado mediante la resolución MEPC.237(65), según sea enmendado por la Organización."

Regla 21

EEDI prescrito

10 e sustituye el párrafo 1 por el siguiente:

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

"1 Para todo:

.1 buque nuevo;

.2 buque nuevo que haya sufrido una transformación importante; y

.3 buque nuevo o existente que haya sufrido una transformación importante de tal magnitud que sea considerado por la Administración como un buque de nueva construcción,

que pertenezca a una de las categorías definidas en las reglas 2.25 a 2.31, 2.33 a 2.35, 2.38 y 2.39 y al que sea aplicable el presente capítulo, el EEDI obtenido será como sigue:

EEDI obtenido \leq EEDI prescrito = $(1 - X/100) \times$ valor del nivel de referencia siendo X el factor de reducción especificado en el cuadro 1 para el EEDI prescrito en comparación con el nivel de referencia del EEDI."

11 En el cuadro 1 del párrafo 2 se añaden nuevas filas para los buques de carga rodada (buques para el transporte de vehículos), los buques para el transporte de GNL, los buques de pasaje dedicados a cruceros con propulsión no tradicional, los buques de carga rodada y los buques de pasaje de transbordo rodado, así como las marcas ** y *** y sus explicaciones, del siguiente modo:

“

Tipo de buque	Tamaño	Fase 0 1 enero 2013 a 31 dic. 2014	Fase 1 1 enero 2015 a 31 dic. 2019	Fase 2 1 enero 2020 a 31 dic. 2024	Fase 3 A partir del 1 enero 2025
Buque para el transporte de GNL ***	10 000 TPM o más	n/a	10**	20	30
Buque de carga rodada (buque para el transporte de vehículos)***	10 000 TPM o más	n/a	5**	15	30
Buque de carga rodada***	2 000 TPM o más	n/a	5**	20	30
	1 000-2 000 TPM	n/a	0-5**	0-20*	0-30*
Buque de pasaje de transbordo rodado***	1 000 TPM o más	n/a	5**	20	30
	250-1 000 TPM	n/a	0-5**	0-20*	0-30*
Buque de pasaje dedicado a cruceros*** con propulsión no tradicional	Arqueo bruto igual o superior a 85 000	n/a	5**	20	30
	Arqueo bruto entre 25 000 y 85 000	n/a	0-5**	0-20*	0-30*

*El factor de reducción se calculará por interpolación lineal entre los dos valores en función del tamaño del buque. El valor más bajo del factor de reducción se aplicará a los buques más pequeños.

**Para estos buques la fase 1 da comienzo el 1 de septiembre de 2015.

***Se aplica el factor de reducción a los buques entregados el 1 de septiembre de 2019 o posteriormente, tal como se definen en el párrafo 43 de la regla 2.

Nota: n/a significa que no se aplica ningún EEDI prescrito."

12 En el cuadro 2 del párrafo 3 se añaden nuevas filas para los buques de carga rodada (buques para el transporte de vehículos), los buques para el transporte de GNL, los buques de pasaje dedicados a cruceros con propulsión no tradicional, los buques de carga rodada y los buques de pasaje de transbordo rodado, del siguiente modo:

Tipo de buque definido en la regla 2	a	b	c
2.33 Buque de carga rodada (buque para el transporte de vehículos)	$(\text{TPM}/\text{AB})^{-0,7} \times 780,36$ donde $\text{TPM}/\text{AB} < 0,3$ 1 812,63 donde $\text{TPM}/\text{AB} \geq 0,3$	Peso muerto del buque	0,471
2.34 Buque de carga rodada	1 405,15	Peso muerto del buque	0,498
2.35 Buque de pasaje de transbordo rodado	752,16	Peso muerto del buque	0,381
2.38 Buque para el transporte de GNL	2 253,7	Peso muerto del buque	0,474
2.39 Buque de pasaje dedicado a cruceros con propulsión no tradicional	170,84	Arqueo bruto del buque	0,214

"

Apéndice I – Modelo de Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica (IAPP) (regla 8)

13 Se enmienda el pie de página del Suplemento del Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica (Certificado IAPP) de modo que diga:

"* Solamente se debe rellenar para los buques construidos el 1 de enero de 2016 o posteriormente, proyectados especialmente con fines de recreo, y utilizados únicamente a tal fin, a los cuales, de conformidad con las reglas 13.5.2.1 y 13.5.2.3, no se aplicará el límite de las emisiones de NO_x estipulado en la regla 13.5.1.1."

ENMIENDAS AL CÓDIGO TÉCNICO SOBRE LOS NO_x 2008

Abreviaturas, subíndices y símbolos

14 Se sustituye la tabla 4 por la siguiente:

"Tabla 4: Símbolos de la composición del combustible

Símbolo	Definición	Unidad
w_{ALF}^*	Contenido de H del combustible	% masa/masa
w_{BET}^*	Contenido de C del combustible	% masa/masa
w_{GAM}^*	Contenido de S del combustible	% masa/masa
w_{DEL}^*	Contenido de N del combustible	% masa/masa
w_{EPS}^*	Contenido de O del combustible	% masa/masa
α	Relación molar (H/C)	1

Subíndices "_G" denota la fracción de combustible gaseoso.

"_L" denota la fracción de combustible líquido."

Capítulo 1.- Generalidades

15 Se sustituye el párrafo 1.3.10 por el siguiente:

"1.3.10 *Motor diésel marino*: todo motor alternativo de combustión interna que funcione con combustible líquido o mixto, y al que se aplique la regla 13, incluidos los sistemas de sobrealimentación o mixtos, en caso de que se empleen.

Cuando esté previsto que el motor funcione normalmente en la modalidad de gas, es decir, siendo gas el combustible principal y con combustible líquido como combustible piloto o de equilibrio, las prescripciones de la regla 13 han de cumplirse únicamente para esa modalidad de funcionamiento. En caso de restricción en el suministro de gas debida a una avería, quedará exento el funcionamiento con combustible líquido puro durante el trayecto del buque hasta el siguiente puerto más apropiado para la reparación de dicha avería."

Capítulo 5 – Procedimientos para medir las emisiones de NO_x en un banco de pruebas

16 Se suprime el párrafo 5.3.4 existente y se añaden los siguientes nuevos párrafos 5.3.4, 5.3.5 y 5.3.6 a continuación del párrafo 5.3.3 existente:

"5.3.4 La selección del combustible gaseoso para las pruebas de combustible mixto depende del objetivo del ensayo. Si no se dispone de un combustible gaseoso normalizado apropiado, se utilizarán otros combustibles gaseosos con la aprobación de la Administración. Se tomará una muestra del combustible gaseoso durante la prueba del motor de referencia. Se analizará el combustible gaseoso a fin de obtener la composición y la especificación del combustible.

5.3.5 Se medirá la temperatura del combustible gaseoso y se registrará junto con la posición del punto de medición.

5.3.6 Se someterá a ensayo la modalidad de funcionamiento con gas de los motores de combustible mixto que utilicen combustible líquido como combustible piloto o de equilibrio utilizando la relación máxima entre el combustible líquido y el combustible gaseoso; por esta relación máxima se entiende el reglaje máximo líquido-gas certificado

para las distintas modalidades del ciclo de ensayos. La fracción líquida del combustible se ajustará a lo dispuesto en 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3."

17 Se añade la siguiente nueva oración al final del párrafo 5.12.3.3 existente:

"En el caso de que se utilice combustible mixto, los cálculos se efectuarán de conformidad con lo dispuesto en 5.12.3.1 a 5.12.3.3. No obstante, los valores de q_{mf} , w_{ALF} , w_{BET} , w_{DEL} , w_{EPS} y f_{fw} se calcularán de conformidad con la siguiente tabla:

Factores de la fórmula (6) (7) (8)	=	Fórmula para los factores
q_{mf}	=	$q_{mf_G} + q_{mf_L}$
w_{ALF}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{ALF_G} + q_{mf_L} \times w_{ALF_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$
w_{BET}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{BET_G} + q_{mf_L} \times w_{BET_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$
w_{DEL}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{DEL_G} + q_{mf_L} \times w_{DEL_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$
w_{EPS}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{EPS_G} + q_{mf_L} \times w_{EPS_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$

18 En el párrafo 5.12.5.1 se sustituye la tabla 5 por la siguiente:

"Tabla 5: Coeficiente u_{gas} y parámetros específicos del combustible para los gases de escape brutos

Gas	ρ_{gas} kg/m ³	NO _x	CO	HC	CO ₂	O ₂
		2,053	1,250	*	1,9636	1,4277
	ρ_{e}^{\dagger}	Coeficiente u_{gas}^{\ddagger}				
Combustible líquido**	1,2943	0,001586	0,000966	0,000479	0,001517	0,001103
Ester metílico de colza	1,2950	0,001585	0,000965	0,000536	0,001516	0,001102
Metanol	1,2610	0,001628	0,000991	0,001133	0,001557	0,001132
Etanol	1,2757	0,001609	0,000980	0,000805	0,001539	0,001119
Gas natural	1,2661	0,001621	0,000987	0,000558	0,001551	0,001128
Propano	1,2805	0,001603	0,000976	0,000512	0,001533	0,001115
Butano	1,2832	0,001600	0,000974	0,000505	0,001530	0,001113

*Depende del combustible.

**Derivado del petróleo.

$\dagger\rho_e$ es la densidad nominal del gas de escape.

‡A $\lambda = 2$, aire húmedo, 273 K, 101,3 kPa.

Los valores de u que figuran en la tabla 5 se basan en las propiedades ideales de los gases.

En las operaciones con varios tipos de combustible, el valor de u_{gas} que se utilice se determinará a partir de los valores aplicables a dichos combustibles, que se indican en la tabla *supra*, de acuerdo con la proporción de combustibles utilizada."

Capítulo 6 – Procedimientos para demostrar el cumplimiento de los límites de emisión de NO_x a bordo

19 Se sustituye el párrafo 6.3.1.4 por el siguiente texto:

"6.3.1.4 En la práctica, resulta a menudo imposible medir el consumo de fueloil una vez que el motor ha sido instalado a bordo de un buque. Para simplificar el procedimiento a bordo, se podrán aceptar los resultados de la medición del consumo de fueloil realizada para la certificación previa en el banco de pruebas. En tales casos, particularmente por cuanto respecta al funcionamiento con fueloil residual (fueloil de tipo RM con arreglo a la norma ISO 8217:2005) y el funcionamiento con combustible mixto, se efectuará un cálculo teniendo en cuenta el error estimado correspondiente. Dado que el caudal del fueloil utilizado para el cálculo (q_{mf}) debe estar relacionado con la composición del fueloil determinada a partir de las muestras de combustible tomadas durante el ensayo, la medición de q_{mf} en el banco de pruebas se corregirá para compensar cualquier diferencia entre los valores caloríficos netos de los fueloiles y gases utilizados en el banco de pruebas y los utilizados en el ensayo. Las consecuencias de tal error en las emisiones finales se calcularán y se consignarán con los resultados de la medición de las emisiones."

20 En el párrafo 6.3.2.1 se sustituye la tabla 6 por la siguiente:

"Tabla 6: Parámetros del motor que se han de medir y registrar

Símbolo	Parámetro	Unidad
H_a	Humedad absoluta (masa del contenido del agua del aire de admisión del motor en relación con la masa de aire seco)	g/kg
$n_{d,i}$	Régimen del motor (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	min ⁻¹
$n_{turb,i}$	Régimen de la turbosoplante (si procede) (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	min ⁻¹
P_b	Presión barométrica total (en ISO 3046-1:1995: $p_x = P_x$ = presión ambiente total en el local)	kPa
$P_{C,i}$	Presión del aire de carga después del enfriador del aire de carga (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	kPa
P_i	Potencia al freno (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	kW
$q_{mf,i}$	Fueloil (en el caso de los motores de combustible mixto, sería fueloil y gas) (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	kg/h
s_i	Posición del mando de alimentación de combustible (de cada cilindro, si procede) (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	
T_a	Temperatura del aire de admisión en la entrada de aire (en ISO 3046-1:1995: $T_x = TT_x$ = temperatura termodinámica ambiente del aire en el local)	K
$T_{SC,i}$	Temperatura del aire de carga después del enfriador del aire de carga (si procede) (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	K
T_{caclin}	Temperatura del enfriador del aire de carga en la admisión del refrigerante	°C
$T_{caclout}$	Temperatura del enfriador del aire de carga en la salida del refrigerante	°C
$T_{Exh,i}$	Temperatura de los gases de escape en el punto de muestreo (en la i -ésima modalidad durante el ciclo)	°C
T_{Fuel_L}	Temperatura del fueloil antes del motor	°C
T_{Sea}	Temperatura del agua de mar	°C
$T_{Fuel_G}^*$	Temperatura del combustible gaseoso antes del motor	°C

* Solamente para los motores de combustible mixto."

21 Se añade el siguiente nuevo párrafo 6.3.4.3 a continuación del párrafo 6.3.4.2 existente:

"6.3.4.3 En el caso de los motores de combustible mixto, el combustible gaseoso que se utilice será el combustible gaseoso disponible a bordo."

22 Se sustituye el párrafo 6.3.11.2 por el texto siguiente:

"6.3.11.2 Las emisiones de NO_x de un motor pueden variar según las características de encendido del fueloil y su contenido de nitrógeno. Si la información disponible sobre la influencia de las características de encendido en la formación de NO_x durante el proceso de combustión es insuficiente y el índice de conversión del nitrógeno del combustible depende también del rendimiento del motor, podrá concederse un margen del 10 % para las pruebas realizadas a bordo con fueloil de tipo RM (norma ISO 8217:2005), pero no se concederá ningún margen para la prueba a bordo previa a la certificación. Se analizarán el fueloil y el combustible

gaseoso utilizados a fin de determinar su contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y, en la medida estipulada en las normas ISO 8217:2005 e ISO 8178-5:2008, de cualquier otro componente que sea necesario para una especificación del fueloil y del combustible gaseoso."

23 En el párrafo 6.4.11.1 se sustituye la tabla 9 por la siguiente:

"Tabla 9: Parámetros predeterminados del fueloil

	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Oxígeno
	<i>W_{BET}</i>	<i>W_{ALF}</i>	<i>W_{DEL}</i>	<i>W_{EPS}</i>
Fueloil destilado (tipo DM, norma ISO 8217:2005)	86,2 %	13,6 %	0,0 %	0,0 %
Fueloil residual (tipo RM, norma ISO 8217:2005)	86,1 %	10,9 %	0,4 %	0,0 %
Gas natural	75,0 %	25,0 %	0,0 %	0,0 %

Para otros fueloiles, se utilizarán valores predeterminados aprobados por la Administración."

Apéndice VI – Cálculo del flujo másico de los gases de escape (método equilibrado de carbono)

24 Se añade el siguiente nuevo párrafo 2.5 después del párrafo 2.4 existente:

"2.5 Los parámetros q_{mf} , w_{ALF} , w_{BET} , w_{DEL} , w_{EPS} y f_{fd} de la fórmula (1), en el caso de motores de combustible mixto que funcionen en la modalidad de gas, se

Factores de la fórmula (1)		Fórmula para los factores
q_{mf}	=	$q_{mf_G} + q_{mf_L}$
w_{ALF}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{ALF_G} + q_{mf_L} \times w_{ALF_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$
w_{BET}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{BET_G} + q_{mf_L} \times w_{BET_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$
w_{DEL}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{DEL_G} + q_{mf_L} \times w_{DEL_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$
w_{EPS}	=	$\frac{q_{mf_G} \times w_{EPS_G} + q_{mf_L} \times w_{EPS_L}}{q_{mf_G} + q_{mf_L}}$

"

RESOLUCIÓN MEPC.258(67) adoptada el 17 de octubre de 2014

ENMIENDAS AL ANEXO DEL PROTOCOLO DE 1997 QUE ENMIENDA EL CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES, 1973, MODIFICADO POR EL PROTOCOLO DE 1978

Enmiendas al Anexo VI del Convenio MARPOL (Enmiendas a las reglas 2 y 13 y al Suplemento del Certificado IAPP)

EL COMITÉ DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO,

RECORDANDO el artículo 38 a) del Convenio constitutivo de la Organización Marítima Internacional, artículo que trata de las funciones del Comité de protección del medio marino conferidas por los convenios internacionales relativos a la prevención y contención de la contaminación del mar ocasionada por los buques,

TOMANDO NOTA del artículo 16 del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973 ("Convenio de 1973"), el artículo VI del Protocolo de 1978 relativo al Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973 ("Protocolo de 1978"), y el artículo 4 del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 ("Protocolo de 1997"), en los que conjuntamente se especifica el procedimiento para enmendar el Protocolo de 1997 y se confiere al órgano pertinente de la Organización la función de examinar y adoptar enmiendas al Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997,

TOMANDO NOTA TAMBIÉN de que, en virtud del Protocolo de 1997, el Anexo VI, titulado "Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques", se añadió al Convenio de 1973,

TOMANDO NOTA ADEMÁS de que el Anexo VI revisado se adoptó mediante la resolución MEPC.176(58) y entró en vigor el 1 de julio de 2010,

HABIENDO EXAMINADO los proyectos de enmienda al Anexo VI revisado relativos a los motores alimentados únicamente por combustibles gaseosos,

1 ADOPTA, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) d) del Convenio de 1973, las enmiendas al Anexo VI cuyo texto figura en el anexo de la presente resolución;

2 DECIDE, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) f) iii) del Convenio de 1973, que las enmiendas se considerarán aceptadas el 1 de septiembre de 2015, salvo que, con anterioridad a esa fecha, un tercio cuando menos de las Partes, o aquellas Partes cuyas flotas mercantes combinadas representen como mínimo el 50 % del tonelaje bruto de la flota mercante mundial, hayan notificado a la Organización que rechazan las enmiendas;

3 INVITA a las Partes a que tomen nota de que, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) g) ii) del Convenio de 1973, dichas enmiendas entrarán en vigor el 1 de marzo de 2016, una vez aceptadas de conformidad con lo estipulado en el párrafo 2 anterior;

4 PIDE al Secretario General que, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 16 2) e) del Convenio de 1973, remita a todas las Partes en el Convenio de 1973, modificado por los

Protocolos de 1978 y 1997, copias certificadas de la presente resolución y del texto de las enmiendas que figura en el anexo;

5 PIDE TAMBIÉN al Secretario General que remita copias de la presente resolución y de su anexo a los Miembros de la Organización que no son Partes en el Convenio de 1973, modificado por los Protocolos de 1978 y 1997.

ANEXO

ENMIENDAS AL ANEXO VI DEL CONVENIO MARPOL (Enmiendas a las reglas 2 y 13 y al apéndice I)

Anexo VI del Convenio MARPOL

Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques

Regla 2

Definiciones

Capítulo 1 Generalidades

- 1 Se sustituye la definición de "fueloil" en el párrafo 9 por la siguiente:

"Por *fueloil* se entiende cualquier combustible entregado y destinado a la combustión a fines de la propulsión o el funcionamiento a bordo del buque, incluidos los combustibles gaseosos, destilados o residuales."

- 2 Se sustituye la definición de "motor diésel marino" en el párrafo 14 por la siguiente:

"Por *motor diésel marino* se entiende todo motor alternativo de combustión interna que funcione con combustible líquido o mixto y al que se aplique la regla 13 del presente anexo, incluidos los sistemas de sobrealimentación o mixtos, en caso de que se empleen. Además, también se considerará un motor diésel marino todo motor de gas instalado en un buque construido el 1 de marzo de 2016 o posteriormente, o un motor de gas adicional o un motor de sustitución no idéntico instalado en esa fecha o posteriormente."

Capítulo

3

Prescripciones para el control de las emisiones de los buques

Regla 13

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

- 3 Se sustituye el párrafo 7.3 por el siguiente:

7.3 Por lo que respecta a los motores diésel marinos con una potencia de salida superior a 5.000 kW y una cilindrada igual o superior a 90 instalados en buques construidos el 1 de enero de 1990 o posteriormente, pero antes del 1 de enero de 2000, en el Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica correspondiente a un motor diésel marino al que se aplique lo dispuesto en el apartado 7.1 de la presente regla se incluirá una de las siguientes explicaciones:

-
- .1 que se ha aplicado un método aprobado con arreglo a lo dispuesto en el apartado 7.1.1 de la presente regla;
 - .2 que el motor se ha certificado con arreglo a lo dispuesto en el apartado 7.1.2 de la presente regla;
 - .3 que el método aprobado no está todavía disponible comercialmente, tal como se describe en el apartado 7.2 de la presente regla; o
 - .4 que un método aprobado no es aplicable."

Apéndice I
Modelo de Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica (Certificado IAPP) (regla 8)

Suplemento del Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica (Certificado IAPP)

4 Se sustituye la nota a pie de página correspondiente al párrafo 1.4 por la siguiente:

"* Solamente se debe rellenar para los buques construidos el 1 de enero de 2016 o posteriormente, proyectados especialmente con fines de recreo, y utilizados únicamente a tal fin, a los cuales, de conformidad con las reglas 13.5.2.1 o 13.5.2.3, no se aplicará el límite de las emisiones de NO_x estipulado en la regla 13.5.1.1."

5 Se sustituye el párrafo 2.2.1 por el siguiente:

"2.2.1 Los siguientes motores diésel marinos instalados en este buque son conformes a las prescripciones de la regla 13 que se indican:

Eficiencia energética en el transporte marítimo.
Influencia del estado funcional de los motores térmicos.

Regla aplicable del Anexo VI del Convenio MARPOL (NTC = Código técnico sobre los NO _x 2008) (AM = Método aprobado)		Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4	Motor 5	Motor 6
1	Fabricante y modelo						
2	Número de serie						
3	Utilización (ciclo o ciclos de ensayo aplicables – NTC 3.2)						
4	Potencia de salida (kW) (NTC 1.3.11)						
5	Régimen nominal (rpm) (NTC 1.3.12)						
6	Motor idéntico instalado el 1/1/2000 o posteriormente, exento en virtud de 13.1.1.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Fecha de instalación del motor idéntico (dd/mm/aaaa) en virtud de 13.1.1.2						
8a	Transformación importante (dd/mm/aaaa)	13.2.1.1 y 13.2.2					
8b		13.2.1.2 y 13.2.3					
8c		13.2.1.3 y 13.2.3					
9a	Nivel I	13.3		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9b		13.2.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9c		13.2.3.1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9d		13.2.3.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9e		13.7.1.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10a	Nivel II	13.4		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10b		13.2.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10c		13.2.2 (el nivel III no es posible)		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10d		13.2.3.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10e		13.5.2 (exenciones)		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10f		13.7.1.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11a	Nivel III (ECA-NO _x sólo)	13.5.1.1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11b		13.2.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11c		13.2.3.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11d		13.7.1.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	AM*	instalado		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13		no está disponible comercialmente en este reconocimiento		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14		no aplicable		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Véase la resolución MEPC.243(66): "Directrices de 2014 sobre el proceso del método aprobado."

6 Se sustituye el párrafo 2.5 por el siguiente:

2.5 Incineración a bordo (regla 16)

El buque tiene un incinerador:

.1 instalado el 1 de enero de 2000 o posteriormente que cumple lo prescrito en:

.1 la resolución MEPC.76(40), enmendada*

.2 la resolución MEPC.244(66)

.2 instalado antes del 1 de enero de 2000 que cumple lo prescrito en:

.1 la resolución MEPC.59(33), enmendada**

.2 la resolución MEPC.76(40), enmendada * "

*Enmendada por la resolución MEPC.93(45).

**Enmendada por la resolución MEPC.92(45).