

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

ESCUELA DE INGENIERÍAS MARINA, NAÚTICA Y
RADIOELECTRÓNICA – EIMANAR



FACTORES DE EMISIÓN PROCEDENTES DE LAS
PLANTAS ENERGÉTICAS EN EL TRANSPORTE
MARÍTIMO. REVISIÓN DE LOS VALORES BASADOS EN
PRUEBAS REALES A BORDO

TESIS DOCTORAL

RUBÉN RODRÍGUEZ MORENO

ENERO 2023



ESTA TESIS DOCTORAL HA SIDO DIRIGIDA POR LA
DOCTORA CRISTINA VANESSA DURÁN GRADOS

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.

PROGRAMA DE DOCTORADO: CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
MARINAS.

LÍNEA: EFICIENCIA ENERGÉTICA Y AMBIENTAL Y
MEJORAS TECNOLÓGICAS DE INSTALACIONES MARINAS.

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

HACE CONSTAR:

Que esta memoria, titulada “FACTORES DE EMISIÓN PROCEDENTES DE LAS PLANTAS ENERGÉTICAS EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. REVISIÓN DE LOS VALORES BASADOS EN PRUEBAS REALES A BORDO”, presentada por Don Rubén Rodríguez Moreno contempla su trabajo de Tesis Doctoral y, considerando que reúne todos los requisitos legales, autoriza su presentación y defensa para optar al grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real, de de 20__

Fdo.: Cristina Vanesa Durán Grados

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 “FACTORES DE EMISIÓN PROCEDENTES DE LAS PLANTAS ENERGÉTICAS EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. REVISIÓN DE LOS VALORES BASADOS EN PRUEBAS REALES A BORDO”, presentada por Don Rubén Rodríguez Moreno bajo la dirección de la Dra. Cristina Vanesa Durán Grados, reúne todos los requisitos legales para optar al grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real, de de 20 ____

Fdo.: Francisco Sánchez de la Flor

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer principalmente a mi directora de tesis, la Dra. Cristina Vanesa Durán Grados, su gran dedicación hacia mí durante el desarrollo de este trabajo, ofreciéndome en todo momento y de una forma totalmente desinteresada su tiempo, paciencia y comprensión.

También agradezco enormemente al Dr. Juan Moreno Gutiérrez su inestimable apoyo a lo largo de toda mi andadura académica e investigadora. Por su gran ayuda tanto en lo personal como en lo profesional, ya que sin ella no hubiera alcanzado este objetivo que culmina mi primer periodo como investigador.

No olvido a mis compañeros de grupo de investigación, por su desempeño y trabajo en este campo de estudio del cual queda mucho que explorar, estoy seguro que juntos seguiremos consiguiendo grandes cosas.

Y por último agradecer a mi familia y amigos todo el cariño recibido, especialmente a mi hija Lucía, mi razón de ser y la personita más importante de mi vida, a quien le dedico este trabajo de todo corazón. A mis padres Gonzalo y Margarita, por haberme dado tanto y hacer de mí la persona que soy. A mis hermanas Esther y Gema, gracias por estar siempre ahí cuando lo necesito, tanto en los momentos buenos como en los no tan buenos. Gracias a todos los amigos que han confiado siempre en mí, especialmente a José Luís, por darme tanto ánimo y brindarme tan buenos consejos.

RESUMEN

A día de hoy el mundo científico es conocedor del gran impacto medioambiental que suponen las emisiones contaminantes procedentes del tráfico marítimo, además de las gravísimas repercusiones que conllevan para la salud humana. Para poder cuantificar esta problemática, se precisa disponer de un procedimiento de medida lo más actualizado posible o, al menos, de un estudio que permita realizar un análisis comparativo que cuantifique las posibles desviaciones que pudieran existir.

Motivado por lo anterior, se ha desarrollado este trabajo de tesis doctoral para calcular los valores de los factores de emisión de los principales contaminantes procedentes de la planta energética de dos buques mercantes, todo ello a partir de mediciones a bordo y datos operacionales. Una vez calculados estos factores de emisión reales, se han comparado con los empleados hasta ahora por la comunidad científica internacional para su análisis. En este estudio se han utilizado equipos específicos de alta resolución que han permitido medir las emisiones gaseosas y material particulado en diferentes motores diésel marinos. Este equipamiento pertenece al grupo de investigación de “Eficiencia Energética en el Transporte Marítimo” dentro del cual se ha desarrollado esta tesis. Grupo que acumula una amplia experiencia en este campo, contrastada con diversos artículos publicados en revistas de alto índice de impacto empleando valores de factores de emisión publicados por otros autores, otro motivo más para contrastar los mismos con pruebas reales realizadas a bordo.

En este sentido cabe destacar que el total de emisiones procedentes de una máquina o motor térmico de la planta energética de un buque, es directamente proporcional a los factores de emisión de cada uno de los contaminantes que se forman en el proceso de combustión de la máquina en cuestión. Estos factores normalmente están definidos en unidades relacionadas, bien con el consumo de combustible, o bien con la energía consumida en kWh por cada máquina térmica en concreto. Por otro lado, los factores de emisión (valores estadísticos) dependen del tipo de máquina en la que se produce la combustión y del tipo de combustible empleado en la misma. Estos valores no han sido revisados desde hace décadas, lo cual puede ocasionar serias incertidumbres cuando se cuantifican los inventarios de emisiones. Máxime, si se tiene en cuenta que, de un tiempo a esta parte, se están empleando otros tipos de combustibles precisamente con el objetivo fundamental de disminuir dichas emisiones. Quiere esto decir, que son

combustibles cuyos factores de emisión son de un valor inferior al de los convencionales. Consecuentemente, disponer de unos factores de emisión actualizados ayudaría a disminuir el índice de incertidumbre y, además, permitiría avanzar en el campo de la investigación de la eficiencia energética en las instalaciones marinas/marítimas, objetivo fundamental del grupo de investigación que respalda este trabajo.

Debido básicamente a las modificaciones que están sufriendo actualmente los motores diésel instalados en los barcos, se puede sospechar que los factores de emisión utilizados en la actualidad también han podido sufrir algunos cambios en sus valores. Todo ello promovido y potenciado por la legislación existente actual, como es el caso de la regulación IMO Tier III (2016), la cual restringe aún más los límites de emisión en las zonas ECAs (Áreas de Control de Emisiones), pretendiendo reducir en un 80 % las emisiones de óxidos de nitrógeno en comparación con la regulación IMO Tier I en las mismas zonas, y limitando el contenido de azufre en el combustible en diferentes proporciones según el caso hasta un 0,1 %.

Como ya se ha comentado anteriormente, en esta memoria se han definido los valores de factores de emisión mediante mediciones reales a bordo para poder ser comparados con los ya conocidos. Actualmente existen estudios en los que los factores de emisión se definen por tipo de barco, pero no distinguen entre buques que transportan carga rodada (Ro-Ro), carga rodada y pasajeros (Ro-Pax) o buques tipo Ferry en general. En este trabajo la medición de emisiones se ha llevado a cabo en dos buques tipo Ro-Pax, por lo que se ha conseguido al mismo tiempo definir dichos valores de forma específica para este tipo de buques.

Las mediciones han sido realizadas durante diez días en cada buque, tanto en condición de navegación para motores principales, como atracado en puerto para motores auxiliares. En ambos casos las medidas se han registrado cada cinco minutos, lo que ha supuesto un total de 720 registros para los principales y más de 500 para los auxiliares.

Como bien expresa el título de esta tesis *“Factores de emisión procedentes de las plantas energéticas en el transporte marítimo. Revisión de los valores basados en pruebas reales a bordo”*, el principal objetivo de ésta es analizar y revisar los valores de los factores de emisión de los distintos contaminantes que emiten las instalaciones energéticas marítimas. El análisis desarrollado en este trabajo se ha enfocado en el cálculo de la masa de cada contaminante emitido a la atmósfera por unidad de energía, siendo

precisamente la energía el parámetro más dificultoso de determinar cuándo se analiza en tiempo real. En este sentido, se han empleado tres métodos distintos para el cálculo de la potencia desarrollada por los motores, como son las galgas extensiométricas, el modelo SENEM y el análisis de la carga en tiempo real.

Los resultados obtenidos muestran que en ningún caso los valores de los factores de emisión calculados han supuesto unas desviaciones superiores al 7 % con respecto a los utilizados actualmente por la comunidad científica para motores auxiliares y al 10 % para principales.

Palabras clave: Factores de Emisión, Eficiencia Energética, Gases de Escape, Emisiones Contaminantes, Transporte Marítimo, Ro-Pax, Estrecho de Gibraltar, Inventario de Emisiones.

ABSTRACT

Nowadays scientific community is aware of the substantial environmental impact that entails the pollutant emissions from shipping, in addition to the extremely significant consequences for the human health. With the aim of assessing this issue, it would be required to have an up-to-date measuring procedure or, at least, a research study that allows a comparative analysis to evaluate any potential deviations.

Based on the above, this PhD thesis has been developed to calculate the main pollutant emission factors coming from the power plant of two merchant ships, following the required onboard testing and operational parameters. Once these actual emission factors have been obtained, they have been compared to the ones used so far by the international scientific community for evaluation. For this, high resolution specific measuring equipment for gas emissions and particulate matter on different diesel marine engines have been used in this study. This equipment belongs to the "*Energy Efficiency in Maritime Transport*" research group, for which this PhD thesis has been prepared. This research group holds a wide experience in this field backed up by several papers published in journals of high impact index, using emission factors from other authors, which may be considered as another reason to compare and contrast with actual tests carried out onboard.

In this sense, it is worth highlighting that the total emissions from an engine in a ship power plant are directly proportional to the emission factors of each pollutant originated in the combustion process. These factors are usually defined in units related to either the fuel consumption or the consumed energy by each specific engine in kWh. On the other hand, the emission factors (statistics values) depend on the type of engine in which the combustion process takes place and the type of fuel that is used. These values have not been revised for decades, which may cause serious uncertainties when the emissions inventories are elaborated, especially considering that not long ago other type of fuels were used with the main objective of minimizing said emissions. This means that the emission factors of these fuels are lower than the ones for the conventional fuels. Therefore, using available up-to-date emission factors would help in reducing their uncertainty, in addition to further progressing with the energy efficiency research in the marine/maritime facilities which, at the same time, is the primary purpose of the research group that supports this study.

Due to the current adjustments being made on ships' diesel engines, it may be ascertained that the actual emission factors used today might have suffered some changes. All of this is promoted by the existing legislation, such as the IMO Tier III (2016) regulation, which restricts even more the emission limits in ECAs (Emission Control Areas). This intends to reduce the nitrogen oxide emissions in up to 80 % in comparison to the IMO Tier I regulation within the same areas, as well as limiting the fuel's sulphur content up to 0.1 %.

As already mentioned, the emission factors have been determined by means of actual onboard measurements in two different ships, and compared to the existing ones. At present, there are studies in which the emission factors are defined by ship type, but there is no distinction between ships carrying wheeled cargo (Ro-Ro), ships carrying wheeled cargo and passengers (Ro-Pax) or Ferry type ships in general. Therefore, for this study, the emissions measurements have been undertaken in two Ro-Pax type ships, so these values have also been determined specifically for this type of ships.

The measurements were made during ten days in each ship, both in sailing and berthing conditions for the main and auxiliary engines, respectively. In both cases, the measurements have been taken each five minutes, meaning a total of 720 records for the main engines and more than 500 records for the auxiliary ones.

As stated by title of this PhD thesis "*Emission Factors from Energy Facilities in the Maritime Transport. Review of the values based on actual onboard measurements*", its principal objective is to review and assess the different pollutant emission factors emitted by the maritime energy facilities. The analysis developed in this study focuses on the calculation of the mass of each pollutant per unit of energy that is emitted to the atmosphere, being the energy the most difficult parameter to obtain when it is measured in real time. In this regard, three different methods were used to estimate the engine power, like the strain gauges, the SENEM model and the engine load real-time-analysis.

The results obtained show that the calculated emission factors do not entail deviations above 7 % in relation to the ones currently used by the scientific community for auxiliary engines and above 10 % for the main engines in any case.

Key words: Emission Factors, Energy Efficiency, Exhaust Gases, Pollutants Emissions, Maritime Transport, Ro-Pax, Strait of Gibraltar, Emissions Inventory.

Índice General

Listado de Figuras	19
Listado de Gráficos	20
Listado de Tablas	21
Listado de Ecuaciones.....	23
Listado de Acrónimos	25
Capítulo 1	30
Introducción y justificación	30
Capítulo 2	40
Hipótesis y Objetivos	40
2.1. Hipótesis Planteadas.....	40
2.2. Objetivos	41
Capítulo 3	44
Antecedentes	44
Capítulo 4	74
Metodología	74
4.1. Equipos e instrumentos empleados	76
4.2. Ciclos de ensayo.....	84
4.3. Procedimiento de ensayo general.....	86
4.3.2. Cálculo de las emisiones gaseosas	96
4.4. Procedimiento de medición simplificado.....	104
4.4.1. cálculo de la potencia en tiempo real mediante modelo propuesto	111
Capítulo 5	116
Resultados	116
Capítulo 6	130
Discusión.....	130
Capítulo 7	143
Conclusiones	144
Referencias	147
Anexo I.....	158
Ensayo en Banco de Pruebas (MMPP)	158
Anexo II.....	164
Parámetros de Pruebas de Mar buque A	164

Anexo III	174
Informe Noon Report Buque A (MMPP)	174
Anexo IV.....	180
Contribuciones Científicas.....	180

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ruta marítima Algeciras-Tánger Med, Estrecho de Gibraltar (España)	74
Figura 2. Medición equipo Testo 350-MARITIME	78
Figura 3. Equipo Testo 350-MARITIME.....	78
Figura 4. Equipo HORIBA SLFA-610.....	79
Figura 5. Equipo ELPI+	81
Figura 6. Impactador equipo ELPI+	81
Figura 7. Sensores ultrasónicos Siemens.....	82
Figura 8. Caudalímetro SIEMENS SITRANS FST020	82
Figura 9. Sonda de medición de emisiones gaseosas	93
Figura 10. Sondas de medición	93
Figura 11. Detalle de partículas.....	94
Figura 12. Paquete de discos recolectores	94
Figura 13. Esquema de instalación para equipo de medición de material particulado..	94

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Límites de emisión NO _x (OMI).....	105
Gráfico 2. Límites de emisión de SO _x dentro y fuera de zonas ECA (IMO).....	106
Gráfico 3. Valor límite de Factores de Emisión NO _x Motores Principales.....	134
Gráfico 4. Factores de Emisión de NO _x (Motores Principales) y Normativa aplicable	135
Gráfico 5. Valor límite de Factores de Emisión NO _x Motores Auxiliares	136
Gráfico 6. Valor límite de Factores de Emisión SO _x Motores Principales.....	137
Gráfico 7. Valor límite de Factores de Emisión PM ₁₀ Motores Principales.....	139
Gráfico 8. Valor Límite de Factores de Emisión PM ₁₀ Motores Auxiliares	140
Gráfico 9. Comparativa de Factores de Emisión definidos este estudio MMPP.....	141
Gráfico 10. Comparativa de Factores de Emisión definidos en este estudio MMAA..	142

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Grado de incertidumbre relacionado con los factores de emisión.....	50
Tabla 2. Factores de emisión utilizando combustible residual.....	54
Tabla 3. Factores de emisión utilizando combustible ligero	54
Tabla 4. Zonas especiales de control de emisiones	66
Tabla 5. Límite de azufre en combustibles.....	68
Tabla 6. Límite de óxidos de nitrógeno.....	68
Tabla 7. Concentraciones de gas patrón para calibración del equipo.....	78
Tabla 8. Rangos de medición y exactitud del equipo TESTO 350-MARITIME	78
Tabla 9. Especificaciones técnicas HORIBA SLFA-6100.....	80
Tabla 10. Especificaciones técnicas ELPI+.....	82
Tabla 11. Datos técnicos caudalímetro SIEMENS SITRANS FST020	83
Tabla 12. Datos técnicos del equipo de medición HD2001.1 DELTA OHM.....	84
Tabla 13. Ciclo de ensayo para motores principales con un régimen constante	84
Tabla 14. Ciclo de ensayo para motores principales y auxiliares que trabajan a demanda de la hélice	84
Tabla 15. Ciclo de ensayo para motores auxiliares con un régimen constante	85
Tabla 16. Ciclo de ensayo para motores auxiliares con un régimen y carga variable....	85
Tabla 17. Pureza de los gases para puesta a cero del equipo analizador.....	95
Tabla 18. Coeficiente “U” para compuestos gaseosos para combustible líquido	103
Tabla 19. Potencias obtenidas para Motores Principales	118
Tabla 20. Flujo másico de gases de escape (Motor Principal de Estribor).....	119
Tabla 21. Flujo másico de gases de escape (Motor Principal de Babor).....	119
Tabla 22. Concentración de emisiones medidas (Motor Principal de Estribor).....	120
Tabla 23. Concentración de emisiones medidas (Motor Principal de Babor).....	120
Tabla 24. Valores de los Factores de Emisión de NO _x (Motor Principal de Estribor). 121	

Tabla 25. Valores de los Factores de Emisión de NO _x (Motor Principal de Babor) ...	121
Tabla 26. Valores de los Factores de Emisión de SO _x (Motor Principal de Estribor)..	122
Tabla 27. Valores de los Factores de Emisión de SO _x (Motor Principal de Babor).....	122
Tabla 28. Factores de Emisión de Material Particulado (Motor Principal de Estribor)	123
Tabla 29. Factores de Emisión de Material Particulado (Motor Principal de Babor) ..	123
Tabla 30. Flujo másico de gases de escape (Motor Auxiliar N.º 1)	124
Tabla 31. Flujo másico de gases de escape (Motor Auxiliar N.º 2)	124
Tabla 32. Concentración de emisiones medidas (Motor Auxiliar N.º 1)	124
Tabla 33. Concentración de emisiones medidas (Motor Auxiliar N.º 2)	125
Tabla 34. Valores de los Factores de Emisión de NO _x (Motor Auxiliar N.º 1).....	125
Tabla 35. Valores de los Factores de Emisión de NO _x (Motor Auxiliar N.º 2)	125
Tabla 36. Valores de los Factores de Emisión de SO _x (Motor Auxiliar N.º 1).....	126
Tabla 37. Valores de los Factores de Emisión de SO _x (Motor Auxiliar N.º 2).....	126
Tabla 38. Factores de Emisión de Material Particulado (Motor Auxiliar N.º 1).....	127
Tabla 39. Factores de Emisión de Material Particulado (Motor Auxiliar N.º 2).....	127
Tabla 40. Resumen de los valores de Factores de Emisión (g/kWh)	131
Tabla 41. Límites de factores de emisión por contaminante y tipo de motor (g/kWh)	132
Tabla 42. Resumen de Factores de Emisión establecidos por normativa (g/kWh).....	133
Tabla 43. Factores de Emisión definidos en este estudio (g/kWh)	141

LISTADO DE ECUACIONES

1. Cálculo de las emisiones portuarias.....	51
2. Cálculo de las emisiones en navegación.....	52
3. Cálculo de las emisiones totales por contaminante por tipo de combustible	55
4. Cálculo de las emisiones totales por contaminante, tipo de combustible y tipo de motor	55
5. Emisiones totales de un buque por viaje	57
6. Emisión de cada contaminante basada en el consumo de combustible.....	57
7. Emisión de cada contaminante basada en la potencia, factor de carga y tiempo	58
8. Presión atmosférica en seco.....	87
9. Presión de saturación de vapor del aire de admisión.....	87
10. Factor de las condiciones de ensayo para motores de aspiración natural.....	88
11. Factor de las condiciones de ensayo para motores sobrealimentados	88
12. Flujo másico de gases de escape en base húmeda mediante caudalímetros.....	90
13. Flujo másico de gases de escape en base húmeda mediante balance de carbono	90
14. Factor específico del combustible en base seca.....	91
15. Factor de carbono	91
16. Concentración de gas contaminante expresada en porcentaje en base seca	97
17. Concentración de gas contaminante expresada en partes por millón en base seca ..	97
18. Concentración de gas contaminante expresada base húmeda	98
19. Factor de corrección para la conversión de los gases de escape medidos en base seca a base húmeda para una combustión completa (método 1).....	98
20. Factor de corrección para la conversión de los gases de escape medidos en base seca a base húmeda para una combustión completa (método 2).....	98
21. Factor específico del combustible en base húmeda.....	99
22. Humedad absoluta del aire de admisión.....	99
23. Factor de corrección para la conversión de los gases de escape medidos en base seca a base húmeda para una combustión incompleta.....	100

24. Relación molar hidrógeno-carbono	101
25. Concentración de hidrógeno molecular en el gas de escape en base seca.....	101
26. Factor de humedad del aire de admisión	101
27. Factor de corrección de humedad para NO _x	102
28. Factor de corrección de humedad para NO _x con enfriador de aire de carga	102
29. Caudal másico de emisión de NO _x	103
30. Caudal másico de emisión del resto de compuestos gaseosos.....	103
31. Emisión específica del compuesto gaseoso	104
32. Caudal másico de gases de escape en base húmeda (ecuación simplificada)	110
33. Potencia desarrollada por un motor principal en navegación.....	112
34. Pérdida de velocidad debido a la resistencia de las olas y el viento.....	114

LISTADO DE ACRÓNIMOS

<i>Acrónimo</i>	<i>Definición</i>	<i>Traducción en inglés (si procede)</i>
AC	Corriente eléctrica alterna	Alternating current
AEIG	Guía de Inventario de Emisiones de contaminantes Atmosféricos	Atmospheric Emission Inventory Guidebook
AIS	Sistema de Identificación Automática	Automatic Identification System
AMVER	Sistema automatizado de rescate de buques por asistencia mutua	Automated Mutual-Assistance Vessel Rescue
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales	American Society for Testing and Materials
Bottom-up	Metodología basada en la actividad	
°C	Grado Celsius, unidad de temperatura	
CO	Monóxido de Carbono	
CO ₂	Dióxido de carbono	
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles	Volatile Organic Compound (VOC)
DBDS	Disulfido de dibutilo	Butyl disulfide
DEFRA	Departamento de Medio Ambiente, alimentación y Asuntos Rurales	Department for Environment, Food & Rural Affairs
DPF	Filtros de partículas diésel	Diesel Particle Filter
DOC	Catalizador de oxidación diésel	Diesel Oxidation Catalyst
ECA	Áreas de control de emisiones	Emission Control Areas
EDXRF	Técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva	Energy Dispersive X-ray Fluorescence
EEA	Agencia Europea del Medio Ambiente	European Environmental Agency
EGR	Recirculación de los Gases de Escape	Exhaust Gas Recirculation
EIAPP	Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación del Aire	Engine International Air Pollution Prevention certificate
EMEP	Programa de monitorización y evaluación europeo	European Monitoring and Evaluation Programme
FO	Combustible residual	Fuel Oil
g	Gramo, unidad de masa	
GT	Tonelaje bruto	Gross Tonnage
g/kWh	Gramos por kilovatios-hora	
h	Hora, unidad de tiempo	
HC	Hidrocarburos sin quemar	Unburned hydrocarbons
H ₂	Molécula de hidrógeno	
H ₂ O	Fórmula del agua	
hPa	Hectopascal, unidad de presión	
GT	Turbina de gas	Gas Turbine
GEI	Gases de efecto invernadero	Greenhouse Gas (GHG)

GNL	Gas Natural Licuado	Liquefied Natural Gas (LNG)
HSD	Motor diésel de alta velocidad	High Speed Diesel
Hz	Hercio, unidad de frecuencia	
ICOADS	El conjunto internacional integral de datos oceánicos y atmosféricos	International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	Organización Internacional de Estandarización	International Organization for Standardization
IVL	Instituto Sueco de Investigación Ambiental	Swedish Environmental Research Institute
JIS	Normas Industriales Japonesas	Japanese Industrial Standards
keV	kilo-electronvoltios, unidad de energía	
kg	Kilogramo, unidad de masa	
km	Kilómetro, unidad de longitud	
kW	Kilovatio, unidad de potencia	
kWh	Kilovatio-hora, unidad de Energía	
LRIT	Sistema de identificación y seguimiento de largo alcance	Long-Range Identification and Tracking
mA	Miliamperio, unidad de intensidad de corriente eléctrica	
m	Metro, unidad de longitud	
m ³	Metro cúbico, unidad de volumen	
m/m	Masa/masa, concentración	
MARPOL	Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques	
MCR	Régimen Máximo Continuo (referente a la potencia)	Maximum Continuous Rating
MDO	Combustible Destilado Marino	Marine Diesel Oil
MDS	Motor diésel de media velocidad	Medium Speed Diesel
MEPC	Comité de Protección del Medio Marino	Marine Environment Protection Committee
MGO	Gas-Oil Marino	Marine Gas-Oil
min ⁻¹	Revoluciones por minuto	
ml	Mililitro, unidad de volumen	
mm	Milímetro, unidad de longitud	
MMAA	Motores Auxiliares	
MMPP	Motores Principales	
NM VOC	Compuestos orgánicos volátiles distintos al metano	Non-methane volatile organic compounds
MRV	Sistema de monitorización, notificación y verificación para grandes buques	Measurement, Reporting and Verification
MIU	Unidad de Inteligencia Marina del Lloyd's	Marine Intelligence Unit
NECA	Zonas de Control de Emisiones de NO _x	Nitrogen Emission Control Area
NH ₃	Amoniaco	

nm	Nanómetro, unidad de longitud del Sistema Internacional de Unidades	
NO	Monóxido de Nitrógeno	
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno	
NO _x	Óxidos de nitrógeno	
N ₂	Nitrógeno molecular	
OMI	Organización Marítima Internacional	International Maritime Organization (IMO)
O ₃	Ozono	
PM	Material particulado	Particulate Matter
PM ₁₀	Material Particulado de menos de 10 micras de diámetro	
PM _{2,5}	Material Particulado de menos de 2,5 micras de diámetro	
ppm	Concentración en partes por millón	Parts per million
RO	Combustible Residual	Residual Oil
Ro-Pax	Buque que transporta más de 12 pasajeros y carga rodada	Passenger ship with roll-on roll-off cargo space.
Ro-Ro	Buque que transporta carga rodada	Roll On-Roll off ship
Scrubber	Sistema de lavado de gases de escape para la eliminación de azufre	
SECA	Zonas de Control de Emisiones de SO _x	Sulfur Emission Control Areas
SENEM	Modelo de eficiencia energética para buques (cálculo de la potencia en tiempo real)	Ship's Energy Efficiency Model
SFC	Consumo específico de combustible	Specific Fuel Consumption
SMED	Metodología Sueca para Datos Ambientales	Swedish Methodology for Environmental Data
SNCR	Reducción catalítica no selectiva	Selective Non-Catalytic Reduction
SRC	Reducción Catalítica Selectiva	Selective Catalytic Reduction
STEAM	Modelo ambiental de cálculo de emisiones del tráfico de barcos	Ship Traffic Emission Assessment Model
STEEM	Modelo ambiental de energía de tráfico de barcos	Ship Traffic, Energy, and Environment Model
SO _x	Óxidos de azufre	
ST	Turbina de vapor	Steam Turbine
SSD	Motor diésel de baja velocidad	Slow Speed Diesel
t	Tonelada, unidad de masa	
UE	Unión Europea	
V	Voltio, unidad de medida del potencial eléctrico	
VA	Voltiamperio, unidad de medida de la potencia aparente de un circuito eléctrico	
vol.%	Tanto por ciento en volumen	
W	Vatio, unidad de medida de la potencia eléctrica	
µm	Micrómetro, unidad de longitud del Sistema Internacional de Unidades	

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (OMI), el transporte marítimo representa el modo más eficiente en términos de uso de energía por tonelada de carga transportada cubriendo más del 80 % del volumen del comercio mundial y, aunque aún sigue siendo considerado uno de los modos de transporte menos perjudiciales para el medio ambiente, se caracteriza por su alta contribución a la contaminación atmosférica mediante la emisión de contaminantes nocivos tales como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) y compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de la combustión que tiene lugar en las distintas máquinas térmicas.

Las emisiones de CO₂ contribuyen significativamente al efecto del calentamiento global, mientras que las emisiones de NO_x, SO_x, PM y COV tienen un impacto negativo principalmente sobre la salud humana. Entre los años 2007-2012, a nivel mundial, el transporte marítimo contabilizó un 15 % de las emisiones anuales de NO_x, un 13 % de las de SO_x y un 3 % de CO₂. A nivel europeo, en el año 2013, los resultados fueron de un 18 % de emisiones de NO_x, un 18 % de SO_x y un 11 % de material particulado menor a 2,5 micras de diámetro (PM_{2,5}) (Smith et al., 2015).

Estas emisiones procedentes de las máquinas térmicas instaladas en los buques alcanzan niveles muy preocupantes en las rutas marítimas más transitadas, como son algunas zonas de costa de la Península Ibérica y especialmente el Estrecho de Gibraltar. Además, concentradas en las zonas costeras y puertos, se dispersan por el efecto de las distintas corrientes de aire produciendo efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, incluso a cientos de kilómetros de su foco de emisión. Se estima que el 70 % de las emisiones procedentes de los buques pueden viajar por el aire, tierra adentro, hasta 400 km de distancia de su foco de emisión inicial (Eyring et al., 2010).

Debido principalmente al aumento del tráfico marítimo, las emisiones que provienen de este medio de transporte también han aumentado durante los últimos años, siendo responsable de casi el 3 % del total de los gases de efecto invernadero (GEI) en el 2018, previéndose un aumento de entre el 90-130 % del total de estas emisiones para el año 2050 respecto al 2008 (Faber et al., 2021).

Las emisiones del tráfico marítimo contribuyen de una forma muy sustancial a empeorar la polución del aire de ciudades costeras y cercanas a los principales puertos, zonas donde existe un tráfico marítimo considerable, incrementando de una forma muy importante las concentraciones de los niveles de contaminantes, como es el caso de los SO_x, NO_x, y partículas ultra finas (PM₁₀, PM_{2,5}), en estas últimas, las concentraciones locales pueden verse incrementadas entre un 20 % y un 30 % debido a la influencia de dichas emisiones (EEA, 2013). Gran parte de la población europea vive en zonas urbanas donde los límites de calidad del aire se encuentran muy por encima de los valores aceptables.

La contaminación atmosférica no debe tratarse como un problema a un nivel localizado, se debe abordar desde un punto de vista global y de cooperación internacional. Los contaminantes emitidos en un país pueden transportarse por la atmósfera y reducir la calidad del aire de otros países. La exposición humana a estos contaminantes produce unos efectos de gravedad variable, desde afecciones que afectan al sistema respiratorio, hasta incluso la muerte. Se sabe que alrededor del 90 % de la población residente en la Unión Europea (UE) en zonas urbanas, se encuentra expuesta a unos niveles altos de concentraciones de contaminantes atmosféricos muy nocivos para la salud. Como dato, la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) estima que las partículas finas de tamaño

igual o inferior a 2,5 micras (PM_{2,5}) presentes en la atmósfera, pueden reducir en más de ocho meses la esperanza de vida de la población expuesta a ellas.

Es de vital relevancia tomar conciencia de la importancia de controlar las emisiones procedentes de las plantas energéticas marinas, principalmente de las compuestas por motores diésel, que son las máquinas térmicas más utilizadas para transformar la energía química del combustible en energía mecánica a bordo de los buques. En muchos casos, las emisiones contaminantes de estos buques son sustancialmente más elevadas que las emitidas por las instalaciones de la industria terrestre, donde ya cuentan con distintas medidas de control para estos niveles de emisión. Por tanto, es hora de pensar en diferentes estrategias para determinar medidas que nos permitan cuantificar y minimizar dichas emisiones atmosféricas tan peligrosas para la salud humana y para el medio ambiente. De forma global, se han propuesto y puesto a prueba diferentes estrategias para mitigar las emisiones provenientes del tráfico marítimo. Se han realizado múltiples estudios que relacionan los beneficios medioambientales a la hora de emplear dichas medidas en lo que se refiere a reducciones de emisiones marinas, y el impacto que tendrían sobre factores como la eficiencia o la repercusión en los costes. Estas estrategias pueden ser, por ejemplo, el empleo de combustibles de bajo contenido en azufre, utilización de sistemas scrubber (“lavado de gases de escape”), empleo de combustibles alternativos, filtros de partículas...etc (Wang & Corbett, 2007).

Como consecuencia de la implantación de un marco regulatorio de emisiones cada vez más estricto, se están dando pasos decisivos en este sector para reducir drásticamente la huella ambiental mediante la aplicación de nuevas tecnologías, tales como las empleadas para la reducción de emisiones de NO_x (inyección de agua, recirculación de gases de escape (EGR), enfriamiento del aire de admisión, modificación del mapa de inyección del combustible, uso de catalizadores...), la reducción de los óxidos de azufre mediante el uso de desulfuradores, o incluso el mayor uso de nuevos combustibles de bajo contenido en azufre y, más recientemente, el uso de combustibles alternativos (es decir, GNL, metanol, amoníaco (NH₃), etc.) seguido de todas las modificaciones del motor que puedan requerir para que estos combustibles puedan ser empleados.

En este sentido, se ponen en marcha varias directivas nacionales e internacionales para limitar las emisiones de los buques. Como ejemplo de ello, en la 72.^a reunión del Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) celebrada en el año 2018, la OMI

adoptó unos requisitos más estrictos destinados a reducir las emisiones anuales en al menos un 50 % para el año 2050. Por otro lado, la OMI también estableció reducir las emisiones de CO₂ de los buques comerciales un 40 % para el año 2030 y un 70 % para el 2050, en comparación con lo emitido en el 2008 (IMO, 2018).

En esta misma línea, la Comisión Europea aprobó un paquete de medidas sobre clima y energía (2030 Framework for Climate and Energy) marcando el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en al menos un 40 % respecto a los niveles presentados en el año 1990. Esto supuso un gran avance y sentó las bases para que posteriormente el Parlamento y el Consejo Europeo llegaran a un acuerdo, a finales del año 2014, para crear una legislación que estableciera un sistema de monitorización, notificación y verificación (MRV) para grandes buques (más de 5.000 toneladas brutas) a partir del 1 de enero 2018.

Para la prevención de los efectos que pueden tener estas emisiones procedentes de los buques en el medio ambiente y en la salud humana, el Anexo VI MARPOL establece unas Áreas de Control de Emisiones (Emission Control Areas ECAs) en zonas donde se considera que la exposición a dichas emisiones es importante, las cuales precisan de un sistema de prevención donde se controlarán las emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno y de óxidos de azufre. De la misma manera, se incluyen límites de contenido de azufre en el combustible y se establecen zonas especiales de control de emisiones de SO_x y NO_x (zonas SECAs para el control de SO_x y zonas NECAs para el control de los óxidos de nitrógeno). Estas áreas de control de emisiones comprenden como zona SECA al mar Báltico, Mar del Norte, el Canal de la Mancha y las aguas que bañan las costas de Estados Unidos y Canadá, estableciéndose como zona NECA el área de Norte América. Estados Unidos propuso una enmienda al Anexo VI del Convenio MARPOL para designar nuevas zonas adyacentes a las costas del Estado Libre Asociado de Puerto Rico y de las Islas Vírgenes de los Estados Unidos, como Áreas de Control de Emisiones (ECA), para el control de óxido de nitrógeno (NO_x) y de óxidos de azufre (SO_x), así como del material particulado (PM) emitido a la atmósfera.

Como dato significativo, en las áreas de control de emisiones NECAs, se establece que los motores diésel marinos que operen en estas zonas deberán cumplir con el límite

de emisiones de NO_x más estricto, cuando estén instalados en buques construidos después del 1 de enero de 2021.

Respecto a los SO_x, la OMI dispuso que los buques que operasen en áreas especiales ECAs a partir del año 2015, tendrían que consumir un combustible con una fracción máxima de azufre inferior al 0,1 %, frente al límite del 1 % vigente hasta el año 2014. El azufre en combustible fuera de estas zonas se limitó inicialmente al 3,5 % para ser reducido al 0,5 % después del año 2020. La normativa Europea UE 2005/33/CE sobre las emisiones de azufre incorpora todo lo regulado por la OMI, pero además, exige desde el año 2010 que todos los buques atracados en puerto utilicen combustibles con un contenido inferior al 0,1 %.

Las emisiones de NO_x contribuyen a la formación de smog fotoquímico, el cual lleva el ozono (O₃) a niveles críticos y a la formación de compuestos orgánicos peligrosos. Además, el ozono es un gas peligroso para la salud humana y cuando se encuentra en la parte de la atmósfera inferior, es un gas de efecto invernadero. También se sabe que el SO₂ presente en las emisiones, cuando se encuentra en concentraciones lo suficientemente elevadas, puede afectar directamente a la correcta función pulmonar. Las emisiones de SO_x y NO_x afectan a la calidad del aire e influyen contribuyendo a la formación de la lluvia ácida, además de promover la formación de partículas finas (PM_{2,5}) (Bilsback et al., 2020).

Tras la combustión en el motor, el azufre contenido en el combustible se convierte en dióxido de azufre (SO₂) y una pequeña parte en trióxido de azufre (SO₃), lo que lleva a la formación de ácido sulfúrico y pequeñas partículas de sulfatos, los cuales son emitidos directamente como emisiones en forma de aerosoles de partículas finas, produciendo graves problemas para la salud (WHO, 2000).

La relación entre las emisiones de SO_x y el contenido de azufre en los combustibles, se encuentra definida mediante ecuaciones empíricas que fueron probadas en su tiempo. Debido a los avances en técnicas de medición, es posible que con los nuevos equipos surgidos de un tiempo relativamente cercano a nuestros días, dicha relación podría haber sufrido cambios.

Para cuantificar las emisiones producidas por los buques, generalmente se emplean factores de emisión que datan del año 2002 (ENTEC, 2002) basados en datos de

emisiones medidos por Lloyd Register a principios de los años 90. Estos factores de emisión son relativos a los NO_x, SO_x, CO₂, COV y PM para cinco tipos de máquinas térmicas: motor diésel de baja velocidad (SSD), motor diésel de media velocidad (MDS), motor diésel de alta velocidad (HSD), turbina de vapor (ST) y turbina de gas (GT); y se encuentran definidos para tres tipos de combustibles: residual (RO), combustible destilado marino (MDO) y gasóleo marino (MGO).

Estos factores de emisión de ENTEC (2002), son adoptados en estudios posteriores por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), para elaborar la Guía de Inventario de Emisiones de contaminantes Atmosféricos de EMEP / EEA (AEIG), donde se incorporan parámetros adicionales para mejorar el nivel de detalle de los factores de emisión, haciendo distinción entre el tipo de buque objeto de estudio y su tonelaje (Trozzi & De Lauretis, 2016). También son utilizados por otros autores que aplican modificaciones sobre ellos, utilizando diferentes factores de carga tanto para motores principales como auxiliares (Tzannatos, 2010). Existen también otros trabajos de investigación donde se utilizan estos factores de emisión de ENTEC aplicando un factor de corrección para bajas cargas, ya que por debajo del 20 % es donde los factores de emisión presentan una mayor variación (Yau et al., 2012; Ng et al., 2013).

El cálculo para el control de las emisiones está basado en el consumo de energía y en los diferentes inventarios de emisiones existentes (métodos bottom-up y/o top-down), sobre los cuales se ha discutido mucho en diferentes artículos de impacto y donde se presentan múltiples contradicciones. Las diferentes condiciones de operación de un buque y los distintos sistemas de propulsión que pueden conformar su planta energética, tienen unos efectos directos sobre las emisiones producidas. Conocer esta información es crucial para determinar los inventarios de emisiones actuales y futuros. Las metodologías de cálculo actual se realizan asumiendo que el rendimiento del sistema energético del buque es constante, no teniendo en cuenta las modificaciones, regulaciones y medidas introducidas para la reducción de emisiones contaminantes.

La metodología basada en la actividad, también conocida como “bottom-up”, utiliza los datos operacionales del propio buque para el cálculo de las emisiones. Esto implica el uso de factores de emisión específicos vinculados a la actividad que esté desarrollando el propio buque, donde el factor de emisión es un valor representativo que

intenta relacionar la cantidad de contaminante emitida, con el estado operativo de los motores durante esa actividad. Los métodos “bottom-up”, estiman las tasas de emisión durante las diferentes actividades específicas desarrolladas (estancia en puerto, maniobras y navegación) derivadas del producto de un factor de emisión por la producción de energía del motor o el consumo de combustible.

Sin embargo, todavía hay una incertidumbre significativa en estos cálculos debido a la calidad de los datos empleados, tales como los factores de carga, el tipo de combustible o los datos de consumo, ya que generalmente se utilizan valores promedio conocidos según el tipo de embarcación objeto de estudio. Concretamente, se estima que las incertidumbres para los factores de emisión se encuentran generalmente entre el 20 y el 50 % para los diferentes contaminantes (Cooper & Gustafsson, 2004), mientras que las incertidumbres derivadas de los diferentes errores cometidos en la recopilación de datos y detalles procedentes del tráfico marítimo se podrían encontrar en torno al 30 % sobre las emisiones estimadas (Broome et al., 2016; Merico et al., 2016).

Como ya se ha mencionado, la polución procedente de las emisiones marinas depende también del consumo de combustible del buque, que a su vez varía según la carga a la que están sometidos los motores. Además, la formación de emisiones de NO_x está relacionada principalmente con el aumento de temperatura y la duración del proceso de combustión. La formación de monóxido de carbono (CO) y su presencia en las emisiones, no depende en exclusiva de la carga del motor, sino que también depende del gradiente de potencia requerido, es decir, si se produce un aumento de la velocidad del buque, puede provocar una combustión incompleta en el motor y, por tanto, un aumento de las emisiones de monóxido de carbono (CO) (Jalkanen et al., 2012)

Cabe destacar que el factor de potencia tiene una influencia directa sobre el cálculo de consumo de energía y sobre los inventarios de emisiones. Por ejemplo, durante las operaciones de maniobra de un buque, las emisiones producidas durante la estancia en puerto a un factor de carga bajo y variable, cobran gran importancia debido a la proximidad del foco de emisión a la zona de costa. Debido a la variabilidad del factor de carga, dependiendo de la actividad desarrollada por el buque, se suelen identificar tres modos de operación: en navegación (donde el factor de carga se supone al 80 %), maniobra (donde las emisiones de los motores principales son dominantes produciéndose a bajas cargas variables) y en puerto (donde los motores principales están parados).

Existen estudios, como el realizado en el Mar Báltico, que emplean un valor de carga constante para el rendimiento del sistema de propulsión (Jalkanen et al., 2009).

Generalmente, los cálculos que se vienen empleando para confeccionar los diferentes inventarios de emisiones, se han desarrollado utilizando factores teóricos de emisión que, como se ha dicho anteriormente, fueron definidos hace casi dos décadas. En esta memoria se pretende comprobar la veracidad del valor de estos factores mediante pruebas “in situ” y empleando los equipos que exigen las diferentes normativas.

Para cuantificar la contribución real del transporte marítimo a los inventarios de emisiones actuales y comprobar la variación que puedan presentar con respecto a los ya conocidos, se hace necesario calcular factores de emisión fiables y diversos.

En este contexto, el presente trabajo desarrolla un nuevo conjunto de factores de emisión para barcos basado en pruebas y mediciones a bordo de dos buques que navegan en una de las principales rutas marítimas más transitadas, como es el Estrecho de Gibraltar.

Para el análisis de las emisiones se utilizará un equipo de medición portátil de gases de escape específico para motores diésel marinos, modelo Testo 350-MARITIME, cumpliendo con el método de verificación a bordo según MARPOL 73/78 Anexo VI, Código Técnico del NO_x y la directriz MEPC 103(49). Con este equipo se analizarán los componentes gaseosos de las emisiones tales como CO₂, CO, O₂, NO_x y SO₂. De esta forma, se adoptan las directrices para el procedimiento de comprobación a bordo de las emisiones de contaminantes mediante el método de medición recogido en el Código Técnico de los NO_x. En dichas directrices, concretamente las definidas en el apartado “1. EQUIPOS”, se describen las características y especificaciones que deben cumplir los equipos destinados a realizar la medición de las emisiones de los gases de escape del motor instalado a bordo, dependiendo del tipo de gas a medir, así como la metodología a emplear para llevarlas a cabo. Para la medición de partículas se utilizará el equipo de medida de material particulado ELPI+ con un rango de medida en tiempo real de 6nm-10 μm.

Además del material particulado, este estudio se centrará en la obtención y análisis del contenido de NO_x y SO₂, principales gases causantes de la lluvia ácida. El primero

(NO_x) dependerá principalmente de la temperatura a la que se produce la combustión, y el segundo (SO_x) del contenido de azufre en el combustible empleado.

Dicho lo anterior, en referencia a las pruebas que se realizarán en varios motores utilizando combustibles con diferente contenido de azufre, éstos serán analizados mediante ensayos de laboratorio con el equipo analizador modelo HORIBA SLFA-6100, basado en la técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) y que cumple con las normas JIS K2541, JIS B7995, ISO 8754 y ASTM-D4294. Para la toma de muestras y análisis del combustible, se tendrá en cuenta la regulación 14 del Anexo IV del Convenio MARPOL que trata sobre el control de las emisiones de óxidos de azufre y partículas procedentes de los buques, además de la regulación 18 que trata sobre la calidad y el procedimiento de toma de muestras del combustible.

CAPÍTULO 2

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPÓTESIS PLANTEADAS

1. Existe cierto grado de incertidumbre tanto en los valores de los factores de emisión utilizados por la comunidad científica internacional de los distintos contaminantes como en el cálculo de la potencia en tiempo real empleado para ello.
2. Además, estos factores de emisión dependen del modo de operación en el que se encuentre el buque en cada momento (Moreno-Gutiérrez & Durán-Grados, 2021).
3. Muchas de estas incertidumbres también están relacionadas con la dificultad de diferenciar el tipo de combustible empleado cuando el barco se encuentra en tráfico internacional de cuando se encuentra en tráfico doméstico. (Durán-Grados et al., 2022; Moreno-Gutierrez et al., 2019).

Tal y como se demuestra en este trabajo de tesis doctoral, puede ser viable técnicamente el estudio y cuantificación de los factores de emisión de NO_x , SO_x y PM en

diferentes situaciones de operación y para diferentes tipos de combustible, al objeto de comprobar los valores de dichos factores de emisión y realizar un análisis comparativo con los que se emplean actualmente para cuantificar los inventarios de emisiones.

2.2. OBJETIVOS

Con el fin de abordar las afirmaciones planteadas en la hipótesis y teniendo en cuenta que el objetivo principal de este trabajo es cuantificar los valores de los factores de emisión en g/kWh de los contaminantes anteriormente relacionados procedentes de los motores térmicos que forman parte de las plantas energéticas marinas, y al objeto de realizar un análisis comparativo de los mismos con los valores teóricos utilizados actualmente por la comunidad científica internacional, se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Medición mediante pruebas en laboratorio del contenido de azufre masa/masa (m/m) en el combustible.
2. Medición del contenido de SO_x, NO_x, CO₂, PM y CO en los escapes de los motores mediante equipos embarcados para distintas cargas y diferentes tipos de combustibles, tanto para motores principales como auxiliares.
3. Cálculo de la potencia desarrollada tanto por los motores principales como auxiliares, medida en tiempo real y en simultáneo con las mediciones definidas en objetivo específico 2.
4. Análisis de resultados y definición de los valores de los factores de emisión obtenidos.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES

Las emisiones procedentes del transporte marítimo constituyen una parte significativa de las totales emitidas a la atmósfera, afectando directamente a la calidad del aire, al cambio climático y a la salud humana. Por ello es necesario actuar diseñando y aplicando herramientas que permitan cuantificar y ubicar geográficamente tales emisiones, de forma que puedan desarrollarse políticas de eficiencia que tengan como finalidad limitarlas y reducirlas.

Los inventarios de emisiones son unas herramientas importantes para identificar la fuente de contaminantes y poder cuantificar la carga de contaminación en un área definida en un momento determinado, constituyendo una gran base científica para elaborar la normativa que ayude a limitar las emisiones procedentes de los barcos. Se suelen calcular en base a los buques de los que se dispone de información completa, es decir, tanto de sus propios datos estáticos, normalmente obtenidos de bases de datos como la de Lloyd's (potencia instalada del motor principal, potencia instalada del motor auxiliar, potencia instalada de la caldera y velocidad máxima de diseño), como de sus datos dinámicos registrados en sistemas de identificación automática AIS (posición del barco, velocidad, rumbo y estado de las condiciones de la navegación) (Huang et al., 2020; Weng et al., 2020). Los barcos que no cuentan con estos datos de forma completa son ignorados,

de forma que las emisiones emitidas por ellos tampoco se contabilizan, introduciendo así una incertidumbre en los inventarios de emisiones.

Los métodos top-down y bottom-up son los dos enfoques más empleados a la hora de desarrollar cualquier estudio de inventario de emisiones marinas y estudios de consumos energéticos procedentes de los barcos, el nivel de precisión logrado depende del enfoque y fuente de información utilizada.

En el caso de la metodología top-down, inicialmente adoptada en los primeros estudios, las emisiones totales son calculadas sin tener en cuenta las características propias de los buques (Corbett & Fischbeck, 1997; Corbett et al., 1999; Skjølsvik et al., 2000; Endresen et al., 2007). En este tipo de estudios se parte de datos globales que posteriormente son estudiados y analizados para posteriormente estimar estadísticamente las emisiones correspondientes. Uno de los enfoques utilizados en esta metodología para crear inventarios de emisiones se basa en el uso del combustible, donde las emisiones procedentes de los buques se calculan en función del consumo total y los factores de emisión asociados al mismo. Aplicando diferentes factores de emisión a diferentes tipos de combustible, distintos tipos de motores y diferentes fases de navegación, estos estudios proporcionan una estimación de las emisiones a nivel global en base al combustible total utilizado. Este enfoque proporciona unos resultados relativamente precisos de los inventarios de emisiones de los buques a escala mundial, sin embargo, subestiman los resultados a escala local (Wang et al., 2007a). Es por ello, que los resultados derivados de esta metodología fueron posteriormente considerados poco fiables, aunque estos primeros estudios proporcionaron información muy relevante sobre la magnitud del impacto de las emisiones del transporte marítimo sobre el medio ambiente. También evidenció el problema de la incertidumbre que trae consigo esta metodología, aunque por otro lado sirvió para atraer la atención científica sobre este problema durante los siguientes años.

Otro enfoque utilizado dentro de la metodología top-down para realizar el cálculo de inventario de emisiones, es el basado en el tipo de carga transportada y el volumen que ocupa dentro del barco. Este método facilita su aplicación debido a la mayor accesibilidad que se tiene a los datos de carga necesarios para realizar los cálculos de emisiones. Sin embargo, sólo permite estimar las emisiones de los buques de carga, lo que dificulta

realizar el cálculo total de emisiones e introduce incertidumbres significativas. Como ejemplo, esta metodología basada en el comercio se utilizó en Asia para calcular las emisiones de SO₂ emitidas por los buques que navegaban allí entre los años 1988 y 1995 (Streets et al., 2000).

La metodología bottom-up es empleada en estudios posteriores para el cálculo de emisiones basándose en la propia actividad desarrollada por los barcos, considera tanto el tiempo de operación como la potencia del motor principal y del motor auxiliar, el factor de carga, la potencia máxima continua, el consumo específico de combustible, el factor de emisión de cada motor en cada fase de navegación, y el arqueo bruto por tipo de buque (Weng et al., 2020; Zhang et al., 2019). A lo largo de los años, numerosos estudios han empleado la metodología bottom-up para el cálculo de las emisiones en diferentes rutas marítimas, algunos basados en los datos de movimiento de la base de datos del Lloyd's MIU (Marine Intelligence Unit) (Faber et al., 2009; ENTEC, 2005). Ambos estudios, ENTEC (2005) y Faber et al. (2009) se aplican al área europea, pero en el caso del segundo, conscientes de las limitaciones que tienen los datos empleados procedentes del Lloyd's MIU, realiza una comparativa entre las emisiones globales obtenidas y las proporcionadas por la Organización Marítima Internacional en el año 2009. Luego utilizan la relación obtenida en esa comparativa para realizar una corrección de sus propios resultados.

Dos de los principales métodos que vienen siendo utilizados para la confección de inventarios de emisiones bajo el enfoque bottom-up en países de Europa, América del Norte y Asia, son el modelo ambiental de cálculo de emisiones del tráfico marítimo (STEAM) y modelo ambiental de energía de tráfico de barcos (STEEM). Ambos modelos utilizan un método basado en fuentes de datos que describen no solo la actividad marítima global (a través del Sistema de Identificación Automática (AIS) para rastrear por satélite las posiciones de todos los barcos en operación), sino también las características técnicas de cada barco registrado. El método STEEM se construyó como un inventario de emisiones de barcos bottom-up que combina las características de los barcos incluyendo la potencia del motor, el período de operación (tiempo de operación en mar abierto, cerca del puerto y en el puerto), y factores de emisión basados en la actividad que proporciona información acerca de las variaciones en las emisiones según el tipo de embarcación (EPA, 2015).

El sistema de identificación automática (AIS) es una herramienta muy importante y comúnmente utilizada en la metodología bottom-up. El sistema AIS fue introducido por la OMI a través del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS), quedando establecido en el año 1990 y requiriéndose su instalación en todos los barcos con un tonelaje superior a 300 toneladas brutas cuando realicen trayectos internacionales. Este sistema de transpondedor de transmisión a bordo emite continuamente los datos de actividad del barco actualizados, mostrando la identidad del buque, tipo de embarcación, eslora, manga, posición, rumbo, velocidad, calado y el estado de navegación entre otros. Los datos AIS permiten el desarrollo de los inventarios de emisiones de barcos con alta resolución temporal. El uso de datos AIS durante un período determinado de tiempo, permite realizar estimaciones más precisas sobre las actividades de los buques y mejorar la confiabilidad de las estimaciones de emisiones y consumo de combustible (Faber et al., 2021).

Existen otras fuentes de información alternativas al sistema AIS para poder obtener los datos sobre la actividad de los buques, aunque puedan ser algo más limitadas, también han sido utilizadas en diversos estudios destinados a la caracterización espacial de las emisiones:

- El sistema de identificación y seguimiento de largo alcance (LRIT) permite la identificación y el seguimiento globales de los buques, establecido como sistema internacional por la OMI de acuerdo a la regla V/19-1 del Convenio SOLAS de 1974. Se aplica a todos los buques de pasaje, buques de carga de 300 toneladas de arqueo bruto o más y unidades móviles de perforación en alta mar que realizan viajes internacionales.
- El conjunto internacional integral de datos oceánicos y atmosféricos (ICOADS) informa de las posiciones registradas voluntariamente por los buques y proporciona datos sobre diferentes variables meteorológicas. La información es de acceso libre y dispone de más de 455 millones de informes marinos que contienen los datos proporcionados por barcos, boyas, plataformas costeras e instrumentos oceanográficos (Freeman et al., 2017).
- El sistema automatizado de rescate de buques por asistencia mutua (AMVER) es una iniciativa de cobertura mundial utilizada por las

autoridades de búsqueda y rescate, como la Guardia Costera de Estados Unidos, para que los buques reporten voluntariamente sus posiciones y así poder brindarles asistencia en caso de peligro en la mar.

El estudio de Jalkanen et al. (2009) es el primero que propuso un modelo STEAM utilizando la metodología bottom-up para calcular las emisiones de escape de los barcos en función de los datos AIS. En este estudio se introdujeron dos nuevas características no tenidas en cuenta hasta ahora de forma simultánea, por un lado, las actividades de cada barco estudiado se recopilaban en tiempo real utilizando datos AIS y, por otro lado, se tuvo en cuenta el efecto que tienen las olas sobre el aumento del consumo de combustible y por consiguiente en las emisiones producidas. El modelo STEAM fue aplicable para el cálculo de las emisiones de NO_x, SO_x y CO₂ y presentaba algunas limitaciones como la referente a determinar los factores de emisión de NO_x, basándose en la velocidad del cigüeñal (min⁻¹) y la curva IMO que limita los NO_x en función del tipo de motor (MARPOL, Anexo VI), subestimando los buques que llevan instalados motores más antiguos. Además, en este modelo tampoco se tuvo en cuenta el cambio que experimentan los factores de emisión en función de la variación de la carga del motor, sabiendo que estos factores de emisión pueden ser mayores para los motores que funcionan con cargas bajas, siendo las maniobras en puerto el caso más representativo de ello.

Posteriormente surge un nuevo método para la evaluación de las emisiones procedentes del tráfico marítimo que viene a actualizar y complementar al método STEAM. Se trata del modelo denominado STEAM2, el cual viene a tener en cuenta la influencia de la carga del motor y el contenido de azufre en el combustible en las emisiones producidas. Este nuevo modelo aborda también una extensión en los contaminantes estudiados, teniendo en cuenta ahora las partículas y el monóxido de carbono en sus cálculos (Jalkanen et al., 2012).

Estos modelos fueron mejorados posteriormente por el modelo SENEM, éste tiene en cuenta más factores que los dos anteriores y por tanto proporciona resultados más precisos con un menor grado de incertidumbre. Entre los nuevos factores que incorpora y cuantifica en sus cálculos, se encuentran todas las variables relacionadas con las condiciones meteorológicas del aire y del mar, el estado de mantenimiento del casco y la

hélice, así como el rendimiento del sistema de propulsión (Moreno-Gutiérrez & Durán-Grados, 2021).

A lo largo de los años, se han desarrollado numerosos estudios que se han basado en las metodologías anteriormente descritas para confeccionar diferentes inventarios de emisiones y consumos energéticos del transporte marítimo. Estos estudios comúnmente relacionan los factores de emisión con la energía producida por el motor (g/kWh) o en otros casos los relacionan con la cantidad de combustible consumido (kg/t), mientras que, en unos pocos estudios menos representativos, los factores de emisión se expresan en relación a la unidad de distancia navegada. En todos ellos, los factores de emisión se distinguen relacionándolos con el tipo de motor y el tipo de combustible utilizado. La utilización de los factores de emisión en función del combustible consumido, únicamente se debería emplear cuando la información sobre el consumo de combustible para cada buque/motor esté disponible, de lo contrario se deberían emplear los factores de emisión basados en la energía producida.

Los inventarios actuales deben revisar los factores de emisión que emplean para desarrollar sus estudios, ya que generalmente proporcionan sobreestimaciones o subestimaciones. Existe la necesidad de considerar mediciones más relevantes que mejoren la precisión de los modelos de predicción de emisiones. También existe la necesidad de considerar diferentes enfoques matemáticos para encontrar mejores formas de administrar los muchos parámetros cambiantes del consumo de combustible y las especificaciones del motor que se utilizan para estimar las emisiones (Jahangiri et al., 2018).

Uno de los primeros estudios realizados sobre inventario de emisiones más relevantes y de trascendencia internacional, es el de ENTEC (2002). Los factores de emisión utilizados en este estudio se basaban en datos de actividad de buques recopilados en la base de datos de los servicios de ingeniería del Lloyd's Register y en mediciones realizadas por el Instituto Sueco de Investigación Ambiental (IVL). El conjunto de datos del Lloyd's Register fue recopilado entre los años 1990 – 1995 cubriendo la flota internacional, siendo uno de los objetivos de esta tesis precisamente actualizar estos valores, mientras que los datos del IVL se centraron en la flota sueca, aunque estos últimos se tomaron posteriormente en diferentes estudios que cubrían determinadas rutas

completas de buques, como por ejemplo el realizado por Cooper (2001). De esta forma, los estudios y mediciones realizadas por el IVL venían a complementar y reducir la incertidumbre que ocasionaba muchas veces la falta de información en la base de datos del Lloyd's Register. No obstante, el IVL reconoció una serie de factores que contribuyen a las incertidumbres finales en las cifras presentadas (ENTEC, 2010):

- El número y la representatividad de las mediciones utilizadas para determinar los factores de emisión en comparación con el número total y tipos de motores marinos en uso (incertidumbres de medición que varían según las diferentes técnicas empleadas).
- Realizar suposiciones al asignar los factores de emisión para una determinada actividad sin tener en cuenta, por ejemplo, las variaciones de carga de los motores principales en maniobra o su rendimiento tras su arranque en frío.

ENTEC (2002) proporciona en su estudio una estimación del porcentaje de incertidumbre que presentan los factores de emisión empleados para el cálculo de las emisiones de NO_x, SO_x, compuestos orgánicos volátiles distintos al metano (NMVOC), partículas (PM) y consumo específico de combustible (SFC). De acuerdo con ENTEC 2002, estas incertidumbres se han estimado en el intervalo de confianza del 95 % con un porcentaje relativo de los factores de emisión en g/kWh o kg/t.

TABLA 1. GRADO DE INCERTIDUMBRE RELACIONADO CON LOS FACTORES DE EMISIÓN (ENTEC, 2002)

Parámetro	Navegación	Maniobra	En puerto
NO _x	± 20 %	± 40 %	± 30 %
SO _x	± 10 %	± 30 %	± 20 %
NMVOC	± 25 %	± 50 %	± 40 %
PM	± 25 %	± 50 %	± 40 %
SFC	± 10 %	± 30 %	± 20 %

Por ejemplo, si el factor de emisión de NO_x tiene asignada una incertidumbre del 20 % en navegación, el 95 % de las emisiones estarán comprendidas dentro de ese ± 20 % de los factores asignados. Gran parte de las incertidumbres generadas a partir de los datos de actividad de los buques utilizadas para estimar las emisiones procedentes del tráfico marítimo, están relacionadas con la dificultad de cuantificar con exactitud el consumo de combustible a partir de los diferentes conjuntos y bases de datos existentes.

Así pues, es muy complicado distinguir entre el consumo de combustible nacional e internacional, ya que la incertidumbre varía mucho de un país a otro y es difícil generalizar. Si contamos con datos completos, la incertidumbre puede ser baja (digamos en torno al 5 %), mientras que, para estimaciones o bases de datos incompletas, las incertidumbres pueden ser considerables (supongamos en torno al 50 %) (EMEP/EEA, 2019).

ENTEC (2010) fue el último estudio de investigación proporcionado por Entec ltd. para el Departamento de Medio Ambiente, alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA) que pretende desarrollar un conjunto de datos detallado de emisiones de barcos de Reino Unido. Este estudio es una continuación de los estudios de ENTEC (2002), ENTEC (2005) y ENTEC (2007). ENTEC (2010) se basó en datos de los movimientos de buques que datan del año 2007 tales como la potencia instalada del motor, el tipo de combustible consumido, la velocidad del barco, la distancia recorrida, el tiempo de permanencia en puerto y las tecnologías de reducción de emisiones instaladas. Los datos de actividad sobre el movimiento de los buques fueron proporcionados para este estudio por la Unidad de Inteligencia Marina del Lloyd's (MIU), quién utilizó datos AIS para complementar la información no registrada en las estadísticas de llegadas a puerto. Para la realización del estudio se contemplaron tres tipos de actividades diferentes, donde la ecuación para el cálculo de emisiones referente a la actividad de navegación está separada de la ecuación para las actividades de maniobra y estancia en puerto.

Las siguientes ecuaciones que se representan son aplicables para determinar las emisiones portuarias y en navegación de acuerdo al estudio ENTEC (2010):

Cálculo de las emisiones portuarias (maniobra y estancia en puerto):

$$E_{in\ port} = T * [(ME * LF_{ME}) * EF + (AE * LF_{AE}) * EF]$$

1

Donde:

$E_{in\ port}$: Emisiones portuarias por embarcación, en gramos (g);

T : Tiempo promedio de atraque/maniobras por escala, en horas (h);

ME : Potencia 100 % MCR (Maximun Continuous Rating) del motor principal, en kilovatios (kW);

- EF*: Factores de emisión asignados a cada embarcación para navegación dependiendo de cada tipo de combustible y velocidad del motor, en gramos por kilovatio hora (g/kWh).
- LF_{ME}*: Factor de carga promedio del motor principal en atraque/maniobra, como porcentaje de la potencia del motor principal (%);
- AE*: Potencia 100 % MCR del motor auxiliar, en kilovatios (kW);
- LF_{AE}*: Factor de carga medio del motor principal en atraque/maniobra, como porcentaje de la potencia del motor principal (%);
- EF*: Factores de emisión asignados a cada embarcación para atraque/maniobra dependiendo de cada tipo de combustible y velocidad del motor, en gramos por kilovatio hora (g/kWh).

Cálculo de las emisiones en navegación para cada buque en movimiento:

$$E_{at\ sea} = \frac{D}{V} * [(ME * LF_{ME}) * EF + (AE * LF_{AE}) * EF]$$

2

Donde:

- E_{at sea}*: Emisiones en navegación por embarcación, en gramos (g);
- V*: Velocidad media del buque, en kilómetros por hora (km/h)
- D*: Distancia recorrida por el buque en la ruta asumida, en kilómetros (km)
- ME*: Potencia 100 % MCR del motor principal, en kilovatios (kW);
- LF_{ME}*: Factor de carga promedio del motor principal en navegación, como porcentaje de la potencia del motor principal (%);
- AE*: potencia 100 % MCR del motor auxiliar, en kilovatios (kW);
- LF_{AE}*: Factor de carga medio del motor principal en navegación, como porcentaje de la potencia del motor principal (%);
- EF*: Factores de emisión asignados a cada embarcación para navegación dependiendo de cada tipo de combustible y velocidad del motor, en gramos por kilovatio hora (g/kWh).

Los factores de emisión de ENTEC (2010) se basan en factores de emisión del año 2000 (ENTE C 2002) revisados y actualizados en relación a datos estadísticos del año 2007 para adaptarlos a la nueva reglamentación del Anexo VI de MARPOL revisado. Estos factores de emisión se relacionan con cinco tipos de motor para diferentes tipos de combustible, distinguiendo entre motores de baja velocidad (entre 60 y 300 min^{-1}), velocidad media (entre 300 y 1.000 min^{-1}) y velocidad alta (entre 1.000 y 3.000 min^{-1}), donde la velocidad del motor está referida a la velocidad de giro del cigüeñal en revoluciones por minuto (min^{-1}).

Estudios actuales siguen contemplando la utilización de los factores de emisión de ENTEC, debido al hecho de que en la literatura nueva solamente se proporcionan factores de emisión actualizados para NO_x , NMVOC y PM (Bacalja et al., 2020; Ekmekçioğlu et al., 2020).

Por otro lado, estudios posteriores reseñables como el de EMEP/EEA (Trozzi & De Lauretis, 2016) han proporcionado una guía general para el control de las emisiones de buques en la Unión Europea, ofreciendo métodos de estimación para desarrollar inventarios de emisiones en tres niveles de sofisticación de acuerdo a los datos de partida con los que contemos. De este modo, se incorporan tres pautas de diferente complejidad para el cálculo de las emisiones de los buques en base a cada uno de estos tres niveles. Respecto a los niveles 1 y 2, éstos requieren menos información detallada y son más adecuados para cuantificar las emisiones de gases a nivel nacional o global debido a su practicidad. Los dos primeros niveles utilizan las ventas de combustible como parámetro principal de indicador de actividad. La metodología de nivel 3 está basada en los datos sobre el movimiento de los buques, así como en la información técnica de los mismos. Este nivel basado en la actividad puede proporcionar resultados más detallados y específicos. Por este motivo, esta metodología es aplicable a las áreas portuarias más localizadas.

El empleo del enfoque de nivel 1, presentado en EMEP/EEA y utilizado para el cálculo de emisiones, está basado en la premisa de que se disponga de los datos de las cantidades de combustible vendidas para las actividades del tráfico marítimo, además de que estén disponibles por tipo de combustible. Este enfoque utiliza factores de emisión para cada contaminante relacionado con el tipo de combustible empleado. Como ya se ha

mencionado anteriormente, algunos factores de emisión dependen de la calidad del combustible utilizado, es el caso de los SO_x, donde se incluye un parámetro adicional dependiente del contenido de azufre en combustible.

A continuación, se presentan los factores de emisión empleados en este estudio de EMEP/EEA para el cálculo de las emisiones de buques con la metodología de nivel 1 para los contaminantes más representativos tanto para combustible residual como para combustible ligero datados de los años 1995 y 2007.

TABLA 2. FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO COMBUSTIBLE RESIDUAL (TROZZI & DE LAURETIS, 2016)

Nive I: Factores de emisión (kg/tonelada de combustible)		
Combustible: Fuel Oil (FO)		
Contaminante	Factor de Emisión	Referencia
NO _x	79,3	Entec (2007)
CO	7,4	Lloyd's Register (1995)
NMVOC	2,7	Entec (2007)
SO _x	20 x S (*)	Lloyd's Register (1995)
PM ₁₀	6,2	Entec (2007)
PM _{2,5}	5,6	Entec (2007)
Nota (*): S = Porcentaje de azufre contenido en el combustible		

TABLA 3. FACTORES DE EMISIÓN UTILIZANDO COMBUSTIBLE LIGERO (TROZZI & DE LAURETIS, 2016)

Nive I: Factores de emisión (kg/tonelada de combustible)		
Combustible: Marine Diesel Oil (MDO) / Marine Gas Oil (MGO)		
Contaminante	Factor de Emisión	Referencia
NO _x	78,5	Entec (2007)
CO	7,4	Lloyd's Register (1995)
NMVOC	2,8	Entec (2007)
SO _x	20 x S (*)	Lloyd's Register (1995)
PM ₁₀	1,5	Entec (2007)
PM _{2,5}	1,4	Entec (2007)
Nota (*): S = Porcentaje de azufre contenido en combustible		

El enfoque de nivel 1 utiliza el siguiente algoritmo para el cálculo de las emisiones totales de un determinado contaminante:

$$E_i = \sum_m (FC_m * FC_{i,m})$$

3

Donde:

E_i : emisiones de contaminante, en kilogramos (kg);

FC_m : masa de combustible por tipo de combustible (m) vendido en el país para navegación, en toneladas (t);

$FC_{i,m}$: factor de emisión del contaminante (i) en función del tipo de combustible (m), en kilogramos de contaminante por tonelada de combustible consumido (kg/t);

m : tipo de combustible (FO, MDO, MGO, gasolina);

i : tipo de contaminante.

El enfoque de nivel 2 de EMEP/EEA, al igual que el de nivel 1, emplea el consumo de combustible diferenciándolo por tipo, pero además requiere de datos más específicos sobre la proporción de combustible utilizado por cada tipo de motor (alta, media y baja velocidad). Esta metodología de nivel 2 emplea el siguiente algoritmo:

$$E_i = \sum_m \left(\sum_j FC_{m,j} * FC_{i,m,j} \right)$$

4

Donde:

E_i : emisiones de contaminante, en toneladas (t);

$FC_{m,j}$: masa de combustible usado por tipo de combustible (m) y por tipo de motor (j), en toneladas (t);

$FC_{m,j}$: factor de emisión del contaminante (i) en función del tipo de combustible (m) por tipo de motor (j), en kilogramos de contaminante por tonelada de combustible consumido (kg/t);

m: tipo de combustible (FO, MDO/MGO, gasolina);

i: tipo de contaminante:

j: tipo de motor (alta, media o baja velocidad diésel, turbinas de gas y turbina de vapor).

Los factores de emisión presentados en esta metodología de nivel 2 son expresados también en kilogramos por consumo de combustible, a partir de los factores de emisión de ENTEC (2007) y ENTEC (2002) calculados utilizando consumos específicos de cada tipo de motor para cada tipo de combustible. En concreto, los factores de emisión correspondientes a los NO_x utilizados en este estudio y para este nivel 2, datan de los años 2000, 2005 y 2010. Los factores de emisión del año 2000 (ENTEC, 2002) son representativos para la flota de buques antes de la aplicación del Código Técnico de control de NO_x de la OMI, mientras que los valores de los factores de emisión de los años 2005 y 2010 se han obtenido aplicando una reducción sobre ellos del 3,4 y 6,8 % respectivamente, para ajustarlos a valores más acordes a las especificaciones técnicas de los motores marinos introducidos en esos años (ENTEC, 2007). Estas reducciones aplicadas en porcentajes a los factores de emisión de los años 2005 y 2010 sobre los factores de emisión de NO_x del año 2000, se obtienen a partir del estudio de la Comisión europea de 2005 (ENTEC, 2005), que asumía que un motor nuevo que cumple con los requisitos del Código Técnico de NO_x emite aproximadamente un 17 % menos de óxidos de nitrógeno que un motor anterior al año 2000.

Mientras que el enfoque de nivel 1 y 2 de EMEP/EEA utilizan las ventas de combustible como principal indicador de la actividad de los buques para el cálculo de emisiones mediante metodología top-down, la metodología de nivel 3 se basa en la información de la actividad de cada buque de forma individual siguiendo el enfoque bottom-up. Se recomienda seguir esta metodología cuando se disponen de los datos detallados de desplazamiento de los diferentes buques objeto de estudio, así como los datos técnicos de cada uno de ellos, como por ejemplo las dimensiones del buque, tipo y datos técnicos del motor, potencia instalada, consumo y tipo de combustible, o las horas

empleadas en las diferentes actividades desarrolladas por el buque (navegación, maniobras y estancia en puerto). Este método calcula las emisiones totales por viaje, sumando lo emitido en cada uno de los trayectos realizados por cada buque. Para un único viaje, las emisiones se podrían expresar mediante la suma de lo emitido en cada una de las fases de actividad del buque de la siguiente manera:

$$E_{viaje} = E_{puerto} + E_{maniobra} + E_{navegación}$$

5

Donde:

E_{viaje} : emisiones de un buque por viaje;

E_{puerto} : emisiones de un buque en su estancia en puerto;

$E_{maniobra}$: emisiones de un buque en maniobra de entrada/salida de puerto;

$E_{navegación}$: emisiones de un buque durante la navegación.

El inventario total se obtendría sumando las emisiones de todos los viajes de todos los buques durante un año o, en su defecto, durante un periodo representativo del año. Esta metodología expone dos maneras diferentes para el cálculo de las emisiones, la primera de ella basándose en el consumo de combustible y la segunda mediante el empleo del dato de la potencia.

Cuando se conoce el consumo de combustible de cada una de las fases de actividad del buque, la emisión de cada uno de los contaminantes para cada viaje podría calcularse mediante la siguiente expresión:

$$E_{viaje,i,j,m} = \sum_p (FC_{j,m,p} * EF_{i,j,m,p})$$

6

Donde:

E_{viaje} : emisiones para un viaje completo del buque, en toneladas (t);

FC : consumo de combustible, en toneladas (t);

EF : factor de emisión, en kilogramos por tonelada (kg/t);

i : tipo de contaminante;

- m*: tipo de combustible (FO, MDO/MGO, gasolina);
- j*: tipo de motor (alta, media o baja velocidad diésel, turbinas de gas y turbina de vapor);
- p*: diferentes fases de actividad durante el viaje (navegación, maniobra y estancia en puerto).

En el caso de no disponer de los datos de consumo de combustible por cada una de las fases de actividad, esta metodología propone el cálculo de las emisiones mediante el dato de la potencia de los motores principales y auxiliares, así como el factor de carga y el tiempo empleado en cada una de las fases de actividad. Para ello, este enfoque de nivel 3 propone la ecuación expresada a continuación:

$$E_{viaje,i,j,m} = \sum_p [T_p \sum_e (P_e * LF_e * EF_{e,i,j,m,p})]$$

7

Donde:

E_{viaje}: emisiones para un viaje completo del buque, en toneladas (t);

EF: factor de emisión, en kilogramos por tonelada (kg/t);

LF: factor de carga del motor, en porcentaje (%);

P: potencia nominal del motor, en kilovatios (kW);

T: tiempo de cada fase de actividad, en horas (h);

e: categoría de motor (principal o auxiliar);

i: tipo de contaminante;

m: tipo de combustible (FO, MDO/MGO, gasolina);

j: tipo de motor (alta, media o baja velocidad diésel, turbinas de gas y turbina de vapor);

p: diferentes fases de actividad durante el viaje (navegación, maniobra y estancia en puerto).

Los factores de emisión para este enfoque de nivel 3 de EMEP/EEA, se expresan tanto en masa de contaminante por tonelada de combustible (kg/t) como en masa de contaminante por kilovatio hora (kg/kWh). En el caso de los óxidos de nitrógeno, los factores de emisión ENTEC (2016) datan de los años 2000, 2005 y 2010 y provienen de los estudios de ENTEC (2002) y ENTEC (2007), mientras que los factores de emisión de NMVOC están basados en un informe del año 1997 sobre directrices del “Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático” (IPCC) para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Otro estudio posterior (SMED, 2020) realiza una revisión de los factores de emisión para el transporte marítimo basados en un estudio de la literatura publicada en años anteriores, presentando adicionalmente una evolución del valor de los factores de emisión mediante la simulación de diferentes escenarios hasta el año 2050. Para la elaboración de este estudio, se tuvieron en cuenta las regulaciones actuales sobre los límites de contenido de azufre en combustibles y el control de las emisiones de NO_x, así como el uso previo de tecnologías de reducción de estos contaminantes.

Por otro lado, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), encargada de asuntos de protección ambiental, viene desarrollando a lo largo de los años diferentes estudios sobre inventarios de emisiones en Estados Unidos. En el año 2020 desarrolló un inventario de emisiones de contaminación del aire relacionado con puertos y buques transoceánicos (EPA, 2020), actualizando un informe previo del año 2009. La metodología presentada en este estudio, sigue un enfoque bottom-up a partir de datos estadísticos y procedentes del sistema AIS para cinco actividades de movimiento diferentes (navegación, maniobra, zona de velocidad restringida, estancia en puerto y fondeo). Según este estudio, los datos necesarios para los cálculos de emisiones incluyen la velocidad, la posición y el rumbo del buque. Además de esto, son necesarias las características del motor: potencia, tipo, año de fabricación, velocidad y categoría. Los factores de emisión utilizados en este estudio varían según la categoría del motor, es decir, en función de su cilindrada, además del tipo de motor principal/auxiliar (diésel, turbina de gas, turbina de vapor y caldera) y del tipo de combustible empleado (teniendo en cuenta su contenido en azufre), así como de otras características técnicas del motor. Estos factores de emisión están extraídos de diversas fuentes basadas en la literatura anterior publicada hasta el momento, entre las que se encuentran ENTEC (2002) y EPA (2009).

Los métodos empleados para realizar mediciones de emisiones reales que nos permiten determinar el valor de los factores de emisión utilizados en los diferentes estudios de inventario de emisiones, pueden ser muy diversos y con diferentes grados de complejidad en función de la técnica empleada. Las tasas de emisión extraídas de los procesos de mediciones reales se pueden obtener mediante la determinación de las emisiones de escape en relación al consumo de combustible o a la energía producida por los motores del buque. Para el proceso de medición es necesaria la utilización de equipos analizadores específicos y especializados de alta gama, así como de otros sensores más simples colocados en la línea de escape del buque (antes o después de cualquier sistema de control de emisiones). Para la medición de algunos contaminantes, como por ejemplo las partículas, generalmente es necesario utilizar un sistema de dilución mediante aire para el acondicionamiento de la muestra de gases de escape antes de recolectar las partículas en los filtros de muestreo.

Independientemente del método empleado para realizar mediciones en tiempo real de los contaminantes expulsados a la atmosfera por un buque, los factores de emisión obtenidos se pueden relacionar, tal y como se ha comentado anteriormente, con la actividad específica que está desarrollando la embarcación. La actividad del buque se puede diferenciar de acuerdo a los puntos de operación del motor o el modo de funcionamiento del barco, es decir, diferenciando entre la actividad de navegación, maniobra y estancia en puerto. De esta forma, para calcular las emisiones producidas por un único barco es necesario conocer datos reales como la ruta, la velocidad o la ubicación del mismo, distinguiendo además entre las fases de actividad mencionadas. La fase de navegación o crucero se corresponde con la actividad descrita por el buque durante el viaje entre dos destinos en mar abierto. Durante este periodo de operación, el barco mantiene una velocidad alta y aproximadamente constante que, a su vez, se corresponde con una determinada carga del motor principal o propulsor. La fase de maniobra está relacionada con la llegada o salida de puerto de un buque antes o después de atracar. Este periodo se caracteriza por una velocidad reducida del barco y cargas más bajas. Por otro lado, la fase de atraque o estancia en puerto se caracterizan por el periodo que permanece el buque amarrado en el puerto, donde la velocidad es nula y se realizan operaciones de carga / descarga de mercancías o pasajeros. En esta fase, con los motores principales

parados, los motores auxiliares permanecen en marcha trabajando para cubrir las necesidades energéticas del buque.

Las mediciones y análisis de gases de escape suelen realizarse en bancos de pruebas de motores en laboratorio, relacionando de forma precisa los valores de emisión con determinados factores de carga del motor. En estas pruebas se opera con el motor a determinadas cargas y velocidades mediante el uso de un freno y un dinamómetro simulando fuerzas externas en el motor, permitiendo medir la potencia desarrollada en el eje, dato necesario para poder cuantificar las emisiones generadas por el motor a través de un sistema de muestreo similar al utilizado en mediciones reales a bordo del buque. A menudo, las combinaciones de carga y velocidad del motor son seleccionadas de acuerdo a la parte 1 de la norma ISO 8178 para motores alternativos de combustión interna (que excluye a los que tienen una aplicación en carretera), dónde se regulan específicamente los estándares de medición de emisiones gaseosas y de partículas en banco de pruebas. Las mediciones en banco de prueba, mediante el uso de un freno y un dinamómetro, son especialmente útiles para comparar las emisiones producidas cuando se emplean diferentes tipos de combustible (GNL, combustible destilado, biocombustibles, etc.), así como el uso de métodos postcombustión de reducción de emisiones tales como la reducción catalítica selectiva (SCR), utilizada para convertir los óxidos de nitrógeno (NO_x) en nitrógeno diatómico (N_2) y agua (H_2O), en condiciones de operación muy similares a las que podemos encontrar a bordo pero de una forma más sencilla de lograr (Merkisz & Siedlecki, 2017).

En los últimos años, cada vez es más común el empleo de tecnologías de monitorización remota que se instalan en puntos fijos cercanos a la actividad del buque (puertos, puentes, grúas, estaciones meteorológicas costeras, etc.) o en medios móviles (furgonetas, barcos, drones, etc.) capaces de medir las emisiones contaminantes (Zhou et al., 2022).

Continuamente se vienen aplicando nuevas técnicas, como por ejemplo pequeños drones que ofrecen gran versatilidad, los cuales llevan incorporados pequeños sistemas rastreadores que sobrevuelan los focos de emisión de los buques realizando mediciones de sus emisiones de escape.

Es bien sabido que las emisiones de escape de los barcos tienen un impacto significativo en la calidad del aire, particularmente alrededor de las áreas costeras cercanas a los principales puertos. Para determinar el impacto de las emisiones procedentes de los buques en estas zonas, los contaminantes cuantificados se combinan con diferentes modelos de dispersión de la calidad del aire. Como muestra de ello, cabe destacar un reciente estudio que cuantifica la influencia de las emisiones de los barcos en la calidad del aire para cada contaminante emitido en el Estrecho de Gibraltar, una de las principales vías de tráfico marítimo de Europa. Para ello, se emplearon los datos medidos entre los años 2017-2019 a través de 16 estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el área de estudio. Siendo el SO_x y NO₂ los contaminantes que presentaron mayores niveles de emisión como consecuencia del tráfico marítimo en la zona de la Bahía de Algeciras y el Estrecho de Gibraltar (Durán-Grados et al., 2022).

Los diferentes contaminantes estudiados en los inventarios de emisiones tienen orígenes y comportamientos diferentes. Por ejemplo, las emisiones de NO_x se forman principalmente en el interior de la cámara de combustión a través de la reacción entre el nitrógeno contenido en el aire y en el combustible, con el oxígeno existente en el aire a altas temperaturas. Generalmente se considera que el aumento de los NO_x está directamente relacionado con el incremento de la carga del motor debido a las altas temperaturas de combustión, sin embargo, otros estudios experimentales revelan que esto no siempre tiene por qué ser así, ya que hay casos en que los NO_x disminuyen con el aumento de la carga del motor debido a la disminución del contenido de oxígeno (Zetterdahl et al., 2016).

El contaminante predominante en las emisiones de NO_x procedentes de los motores marinos, como resultado de las principales reacciones que tienen lugar a altas temperaturas, es el NO, cuya proporción podría ser más del 95 %, mientras que el NO₂ se forma principalmente a temperaturas más bajas. En grandes motores marinos con capacidad para desarrollar una alta potencia a baja velocidad la formación de NO_x es más alta comparado con motores de potencia nominal más baja desarrollada a velocidades de giro más altas. Esto puede estar relacionado principalmente con la duración del proceso de la combustión y el tiempo que permanecen los gases en el interior del cilindro, siendo mayor este periodo para los motores de baja velocidad, lo que proporciona tiempo

adicional para que se forme una mayor cantidad de NO_x en comparación con los motores de alta velocidad (Celo et al., 2015).

Respecto a las emisiones de CO, se puede decir, que se forman debido a la combustión incompleta del carbono contenido en el combustible en su proceso de oxidación, al combinarse con el oxígeno del aire utilizado como comburente. Uno de los principales motivos de formación de CO es el combustible inyectado cerca de las paredes del cilindro, debido a que en esa zona la temperatura de la mezcla aire-combustible es significativamente menor que la del centro del cilindro, ralentizando así la velocidad a la que tiene lugar la reacción en la combustión y favoreciendo la formación de CO (combustión incompleta), en lugar de formar CO_2 (combustión completa). La formación de CO depende inversamente de la duración de la combustión, es decir, del tiempo de residencia del combustible en el proceso oxidativo, cuanto menos tiempo dure este proceso, mayor posibilidad de formación de CO existirá. Por ello, se considera que los motores de alta velocidad conllevan un aumento de este tipo de emisiones. Pero los factores de emisión de CO asociados a motores de alta velocidad de cuatro tiempos, comparados con motores lentos de dos tiempos, también son más altos por un motivo adicional, y es que los motores de baja velocidad presentan una mayor relación aire/combustible, lo que permite una mayor formación de CO_2 en lugar de CO (Zhang et al., 2016). En un motor diésel, la generación de CO está relacionada inversamente con la carga del motor, a mayores cargas nos encontraremos con un exceso de oxígeno y temperaturas más altas en el proceso de la combustión, lo que ayudará a oxidar el CO convirtiéndolo en CO_2 .

Las emisiones de hidrocarburos sin quemar (HC), siguen un patrón muy parecido con las mismas tendencias que el CO en cuanto a su formación respecto a la carga y dependencia de la velocidad del motor. Este tipo de emisiones son generalmente bajas en motores de combustión diésel, estando directamente relacionadas con la eficiencia con la que se produce el proceso de combustión. Una combustión ineficiente promueve una mayor presencia de combustible y aceite lubricante sin quemar en los gases de escape debido a una combustión incompleta (Lamas & Rodríguez, 2012).

En cuanto a las partículas emitidas por los motores de combustión interna marinos, constan de varios componentes, como pueden ser: materia orgánica, carbono elemental,

iones inorgánicos, sulfatos y metales pesados (Zhang y otros, 2020). Este tipo de emisiones también se singulariza por el número de partículas y el tamaño que presentan, siendo las ultrafinas las que mayor predominio tienen (diámetro inferior a $0,1 \mu\text{m}$) (Lauenburg et al., 2021). Las partículas pueden clasificarse también en volátiles y no volátiles o sólidas. Su formación está íntimamente relacionada con el funcionamiento de los motores diésel marinos y las características propias del sistema de combustible asociado a los mismos. Esto es debido a que en este tipo de motores de encendido por compresión no se produce una mezcla previa del aire con el combustible antes de su entrada en la cámara de combustión, sino que la mezcla de ambos fluidos se realiza en el interior del cilindro. Por este motivo, si la mezcla aire-combustible que se produce localizada dentro del cilindro no es completa, se produce una combustión poco efectiva donde el combustible no se oxida por completo y que da lugar a partículas de hollín de tipo carbono elemental. Por otro lado, el combustible pesado o residual y el aceite lubricante que no reacciona en el proceso de la combustión, se presenta en los gases de escape como partículas orgánicas no volátiles debido a su densidad y tamaño. Las partículas orgánicas están influenciadas por el tipo de combustible empleado, así un combustible destilado producirá partículas con menor masa que uno residual, pero no influirá en la cantidad de partículas emitidas (Zetterdahl et al., 2016). La relación que existe entre las emisiones de PM y la carga con la que opera el motor parece no tener mucha relevancia, aunque un aumento de la carga puede producir una pequeña reducción de partículas en los gases de escape. Por otro lado, los factores de emisión asociados a este tipo de emisiones, presentan valores más altos a bajas cargas provocado por la caída de presión de la inyección de combustible a esos niveles de carga del motor (Chu-Van et al., 2018).

Las emisiones de CO_2 son el producto principal de una reacción de oxidación completa de los hidrocarburos, estando directamente relacionadas con la cantidad contenida de carbono en el combustible y el consumo total del mismo, es decir, a mayor contenido de carbono y/o mayor consumo de combustible, una mayor formación de CO_2 se producirá. Por este motivo, se puede observar una influencia directa entre el tipo de combustible utilizado y el CO_2 emitido a la atmósfera, variando notablemente en función del tipo de combustible empleado y su contenido en carbono. En este sentido, nuevos combustibles como el Gas Natural Licuado (LNG) y el metanol, experimentan una

reducción significativa de este tipo de emisiones debido a su bajo contenido en carbono. Además, combustibles como el amoníaco (NH_3) y el hidrógeno (H_2) se presentan como apuestas de futuro debido a la ausencia total de carbono en su composición química, como camino para impulsar la descarbonización total del sector del transporte marítimo. Respecto al consumo específico del combustible, los motores diésel marinos presentan niveles altos de emisiones de CO_2 a bajas cargas, manifestando una disminución de este tipo de emisiones a medias cargas entre el 25 y 75 % e incrementándose a cargas altas cercanas al 100 % (Yang et al., 2019).

Las emisiones de SO_x dependen principalmente del azufre que contenga el tipo de combustible utilizado para el proceso de la combustión asociado a la reacción de oxidación del mismo. Las emisiones de este contaminante presentan un aumento relacionado con el incremento de la carga a la que está sometido el motor, es decir, a altas cargas se produce un aumento de las emisiones de SO_x . En cuanto a la composición de los SO_x , el SO_2 formado representa más del 95 % de su composición total, el porcentaje restante está compuesto por sulfatos (SO_4 y H_2O) y por SO_3 (Tadros et al., 2020).

Para el control y limitación de todos estos contaminantes, la Organización Marítima Internacional (OMI) fue constituida en 1958 como organismo especializado de las Naciones Unidas, es responsable de la seguridad y protección de la navegación, así como de prevenir la contaminación del mar por los buques. Se encarga de establecer el marco normativo internacional para el sector del transporte marítimo en materia de seguridad, la protección y el comportamiento ambiental.

La OMI lleva desempeñando un papel fundamental en la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, tratando de minimizar las emisiones contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera. Para ello, en el año 1997 se añadió un nuevo Anexo VI al convenio internacional, para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL 73/78). El Anexo VI entró en vigor en el año 2005, pero en el año 2008 fue revisado por el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC), con unos límites de emisiones más estrictos y acordes a la problemática medioambiental y en base a la experiencia adquirida desde su implantación, para entrar en vigor de nuevo finalmente en el año 2010, junto con el Código Técnico revisado relativo al control de los NO_x de los motores diésel marinos. Posteriormente, en el año 2011, la OMI adoptó una serie de

medidas obligatorias técnicas y operacionales, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y reducir así las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tales como las de CO₂, que como ya se ha comentado anteriormente, su formación está íntimamente relacionada con el consumo total de combustible. Estas medidas obligatorias entraron finalmente en vigor en el año 2013.

En el Anexo VI revisado se incluyen una serie de reglas que limitan las emisiones de los principales contaminantes emitidos por los buques a nivel mundial, en particular los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x), así como la reducción progresiva de estos contaminantes y de las partículas emitidas a la atmosfera, prohibiendo además cualquier emisión de sustancias que agoten la capa de ozono y que se realice de forma deliberada. Por otro lado, este anexo también regula la incineración a bordo y las emisiones de compuestos volátiles (COV) procedentes de buques tanque. Otra novedad incluida en este anexo es la creación de las zonas de control de emisiones (ECA), donde existe un control sobre los gases emitidos por los buques que se encuentren navegando en ellas. En la siguiente tabla se enumeran las diferentes zonas especiales de control de emisiones que, en virtud del convenio MARPOL, tienen la consideración de zonas ECA, así como las fechas más reseñables que afectan a cada una de ellas.

TABLA 4. ZONAS ESPECIALES DE CONTROL DE EMISIONES (ANEXO VI DE MARPOL)

Zonas Especiales	Adopción	Entrada en vigor	Con efecto desde
Mar Báltico (SO _x , NO _x)	26 septiembre 1997	19 mayo 2005	19 mayo 2006
Mar del Norte (SO _x , NO _x)	22 julio 2005	22 noviembre 2006	22 noviembre 2007
Norteamérica (SO _x , NO _x)	26 marzo 2010	1 agosto 2011	1 agosto 2012
Mar del Caribe de Estados Unidos (SO _x , NO _x)	26 julio 2011	1 enero 2013	1 enero 2014
Nota general: Los buques construidos el 1 de enero de 2016 o posteriormente que operen en estas zonas de control de las emisiones cumplirán las normas de nivel III sobre las emisiones de NO _x que figuran en la regla 13.5 del Anexo VI del Convenio MARPOL.			

Tanto la zona de Norteamérica (que cubre áreas costeras designadas frente a los Estados Unidos y Canadá) como la zona del Mar del Caribe y Estados Unidos (alrededor

de Puerto Rico y las Islas Vírgenes de los Estados Unidos) han sido designadas inicialmente, de acuerdo a lo establecido en el Anexo IV del Convenio MARPOL, como zonas de control de emisiones tanto para óxidos de azufre (SECA) como óxidos de nitrógeno (NECA). Por otro lado, las zonas del Mar Báltico y del Mar del norte se han designado recientemente como zonas NECA en el año 2021, ya que inicialmente se consideraban únicamente zonas SECAs.

Además de las zonas ECA mencionadas, el Comité de protección del medio marino (MEPC) de la OMI ha acordado, durante el periodo de sesiones MEPC 78 celebrado del 6 al 10 de junio de 2022, designar todo el mar Mediterráneo como zona de control de las emisiones de óxido de azufre. Esta enmienda podría entrar en vigor a mediados del año 2024, lo que significa que los buques que naveguen por estas aguas a partir el año 2025, contarían con controles más estrictos de las emisiones de óxidos de azufre. Esta medida supone un gran avance a favor de la protección del medio ambiente y la salud humana en esta zona de gran afluencia de tráfico marítimo, en la que se desarrolla aproximadamente el 7 % de la actividad del tráfico marítimo global. De acuerdo con datos basados en el sistema AIS, más de 30.000 buques operan anualmente en estas aguas. La designación del Mar mediterráneo como zona SECA supondría una reducción de emisiones de SO_x del 79 % respecto a las actuales y un 24 % para partículas finas, lo que podría prevenir más de 1.100 muertes prematuras por cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares e infartos, así como más de 2.300 casos de asma en niños (Corbett & Carr, 2022).

La reducción de las emisiones de SO_x se controla limitando el contenido de azufre en el combustible utilizado o bien mediante un método aprobado equivalente, como por ejemplo los sistemas de lavado de gases de escape. La OMI redujo el límite mundial de contenido de azufre del combustible de 3,5 al 0,5 % (m/m) a partir del 1 de enero de 2020, este límite es obligatorio para todos los buques que operen fuera de las zonas de control de emisiones. Los límites de azufre en el combustible para las zonas ECA se establecían en el 1,5 % antes del año 2010, para luego pasar al 1 % entre el 2010-2015 y finalmente limitarse hasta el 0,1 % a partir del 2015.

TABLA 5. LÍMITE DE AZUFRE EN COMBUSTIBLES (ANEXO VI DE MARPOL)

Año	Límite Global % SO_x	Límite zona ECA % SO_x
2007	4,5 %	1,5 %
2010	4,5 %	1,0 %
2012	3,5 %	1,0 %
2105	3,5 %	0,1 %
2020	0,5 %	0,1 %

Las emisiones de NO_x son controladas mediante unos requisitos de inspección y certificación del motor que conducen a un certificado denominado “Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación del Aire” (EIAPP). Posteriormente, cuando el motor se encuentra en servicio, se exige que se cumpla con los requisitos para la prueba, inspección y certificación de motores diésel marinos recogidos en el Código Técnico sobre los NO_x de 2008 (MEPC.177(58), 2008).

De acuerdo al Anexo VI de MARPOL, los requisitos para el control de las emisiones de NO_x se aplican a los motores diésel marinos instalados en buques que cuentan con una potencia nominal superior a 130 kW independientemente del tonelaje del buque. Para ello, en función de la fecha de construcción del barco, se aplican diferentes niveles de control denominados como Tier, dónde el valor límite de NO_x se determina dentro de los diferentes niveles existentes a partir de la velocidad nominal de giro del motor (tabla 6).

TABLA 6. LÍMITE DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO. (ANEXO VI DE MARPOL)

Nivel	Fecha de construcción del buque igual o posterior a	Límite de emisión NO_x (g/kWh)		
		n = velocidad nominal del motor (min⁻¹)		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	1 enero 2000	17,0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9,80
Tier II	1 enero 2011	14,0	$44 \cdot n^{-0.23}$	7,70
TierIII	1 enero 2016	3,4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1,96

Los límites de emisiones de NO_x correspondientes al nivel Tier III solamente se aplican a los buques construidos a partir de 2016 que operen en zonas ECA (América del Norte y Mar del Caribe de los EEUU), cuando estos buques operen fuera de estas áreas se aplicarán los controles de Tier II.

Un motor diésel marino instalado en un buque que opere en las siguientes condiciones, debe cumplir con la norma de control de emisiones de NO_x de Tier III:

- Motor construido a partir del 1 de enero de 2016 y que opere en zona ECA de Norteamérica o en la zona ECA del mar del Caribe de los Estados Unidos.
- Motor construido a partir del 1 de enero de 2021 y que opere en zona ECA del Mar Báltico o la zona ECA del Mar del Norte.

Las emisiones contaminantes pueden ser controladas principalmente a través de dos mecanismos: mediante el control de la tecnología de combustión combinado con el tratamiento de los gases de escape y a través del control de la calidad del combustible empleado (EMEP/EEA, 2019).

El Anexo VI del convenio MARPOL en sus diferentes reglas controla:

- Los límites de NO_x (Regla 13).
- Sustancias que agotan la capa de ozono (Regla 12).
- Los SO_x, a través de la limitación del contenido de azufre en el combustible y mediante la designación de las diferentes áreas de control de emisiones SECAs (Regla 14).
- Compuestos orgánicos volátiles de los buques tanque (Regla 15).

En estas directrices se estipulan los resultados que se deben obtener en cuanto a la limitación de emisiones contaminantes procedentes de los buques, pero no se especifica en cada caso qué tipo de tecnología se debe utilizar para conseguirlo. Entre los diferentes medios técnicos de control de emisiones se encuentra la mejora del diseño de los motores, por ejemplo, mediante la optimización del sistema de inyección de combustible. Algunas investigaciones que estudian las mejoras del sistema de inyección de combustible han mostrado reducciones sustanciales en las emisiones de NO_x de hasta un 42 % sin pérdidas de eficiencia empleando estas técnicas (Ni et al., 2020).

Otro tipo de tecnología empleada para la reducción de emisiones consiste en la recirculación de gases de escape (EGR), donde una parte de estos gases se redirigen para ser mezclados de nuevo con el aire de carga que se introduce en el motor. El empleo de esta tecnología reduce la emisión de óxidos de nitrógeno debido a la menor proporción

de oxígeno en la mezcla y la reducción de temperatura del proceso de combustión. A pesar de no ser una técnica generalmente implantada en buques, se ha demostrado que el uso de esta tecnología puede reducir significativamente las emisiones de NO_x , en torno a un 48 %, sin una penalización por el aumento del consumo de combustible (Feng et al., 2016).

Por otro lado, el método de reducción catalítica selectiva (SCR) consiste en introducir un agente reductor en los gases de escape (amoníaco anhidro, disolución amoniacal o disolución de urea) a través de un catalizador, de este modo, el NO_x se reduce a sustancias totalmente inocuas como son el nitrógeno y el agua. El principal material catalizador en aplicaciones marinas, es un óxido metálico de vanadio que se combina con un óxido de titanio en una estructura metálica o cerámica. Además, el amoníaco que se forma a partir de la urea actúa como agente reductor al reaccionar con el NO y el NO_2 . El dispositivo SCR puede funcionar con todo tipo de combustible en todos los motores marinos. Además, la eficiencia de SCR aumenta a altas temperaturas y la actividad catalítica se detiene por debajo de un límite de temperatura más bajo que funciona como un umbral operativo. El sistema SCR reduce las emisiones de NO_x en los motores diésel en aproximadamente un 90 % (Bayramoğlu & Özmen, 2021). Debido a la baja temperatura de los gases de escape del motor diésel marino, la eficiencia de este sistema puede verse afectada en gran medida. Esto ocurre ya que la reacción catalítica selectiva debe producirse dentro de un determinado rango de temperatura entre los 280 y 420 °C. (Zhu et al., 2022).

En el caso de la reducción catalítica no selectiva (SNCR), los gases de escape se tratan de forma similar a la tecnología SRC, excepto que no se emplea un catalizador. El agente reductor empleado en este proceso, es suministrado directamente a los gases de escape a una velocidad y temperatura determinada dentro de una cámara de reducción. La instalación de este sistema es menos compleja que el sistema SRC, pero necesita una temperatura muy alta para ser eficiente. Actualmente, por este motivo, los sistemas NSCR no tienen una clara aplicación real a bordo de los buques, pese a ofrecer resultados similares a los sistemas SRC en cuanto a la reducción de óxidos de nitrógeno se refiere.

Referente a la reducción de óxidos de azufre en los gases de escape de los motores diésel marinos, si se opta por utilizar un combustible marino con alto contenido en azufre

de menor coste que un combustible refinado como el gasóleo marino (MGO), será necesaria la instalación a bordo de un sistema postcombustión de limpieza mediante el lavado de gases de escape a través de un equipo depurador. Este dispositivo se instala en el sistema de exhaustación del motor para eliminar principalmente los SO_x y en segundo lugar gran parte de las partículas emitidas, lográndose reducciones de estos contaminantes del 94 y 73 % respectivamente (Pei-Chi & Cherng-Yuan, 2020). Estos equipos neutralizan los óxidos de azufre y las partículas añadiendo al proceso de limpieza agua de mar o agua dulce con un reactivo químico, creando un medio alcalino u oxidante. El proceso da como resultado la formación de un flujo de residuos que contiene la sustancia añadida además de las emisiones eliminadas. Los gases de escape, libres de estos contaminantes y de las sustancias utilizadas para su tratamiento, se liberan a la atmósfera, mientras que los residuos generados se descargan al mar o se almacenan en un tanque a bordo (Trant, 2017).

Existen diferentes diseños de sistemas de lavado de gases de escape. Los sistemas abiertos utilizan la alcalinidad natural del agua de mar para lavar los gases de escape y eliminar así el SO_2 y parte de las partículas que quedan contenidas en las gotas de agua. El agua de lavado contaminada se descarga posteriormente al mar, la mayoría de las veces sin un tratamiento sustancial, mientras que los gases de escape emitidos a la atmósfera contienen cantidades de SO_2 significativamente más bajas. El principio operativo de los sistemas de lavado de gases de escape de circuito cerrado, es similar al de circuito abierto, con la única diferencia de que el medio utilizado para el proceso de lavado es agua dulce con cantidades adicionales de sustancias químicas alcalinas, generalmente hidróxido de sodio. El agua se recircula en el sistema y el hidróxido de sodio neutraliza el ácido sulfúrico mediante la reacción química. El flujo de residuos creado se almacena en un tanque del barco (Winnes et al., 2020). Los sistemas híbridos pueden operar como los de circuito abierto o circuito cerrado, combinando las ventajas que ofrece cada uno de ellos. Cuando opera como los sistemas de circuito abierto, el agua de mar se utiliza como medio de limpieza de los gases de escape y de esta forma se reduce el coste asociado al empleo de la sustancia química alcalina. Por otro lado, cuando el sistema abierto no puede ser empleado, como por ejemplo durante la estancia en puerto del buque, el circuito cerrado se pone en funcionamiento y, por tanto, se reducen los costes asociados al empleo de un combustible con menor contenido en azufre (EMEP/EEA, 2019).

Para la reducción de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos sin quemar (HC) presentes en las emisiones contaminantes, se pueden emplear tecnologías como el catalizador de oxidación diésel (DOC), siendo un componente de postratamiento de oxidación diseñado para convertir el CO y los HC, en CO₂ y agua utilizando el oxígeno presente en los gases de escape. El equipo está estructurado en canales estrechos en forma de panal donde se aplica una capa de catalizador en las paredes del mismo. El proceso de oxidación tiene lugar cuando las partículas de CO y HC entran en contacto con las paredes recubiertas por el catalizador. El sistema DOC es capaz de conseguir una reducción del 90 al 95 % para el CO y una reducción del 36 al 70 % para los HC (Shi et al., 2012).

Respecto a la eliminación de partículas de hollín de los gases de escape de los motores diésel marinos, se pueden emplear filtros de hollín o también llamados filtros de partículas diésel (DPF). Su diseño más básico puede consistir en un elemento filtrante de material cerámico formado por canales sinuosos en una estructura relativamente abierta. Las partículas de hollín chocan y se adhieren a las superficies de las paredes de los distintos canales. Este tipo de filtro necesita quemar el hollín y la acumulación de partículas para regenerarse, asegurando también que la contrapresión del escape no exceda el límite máximo que pueda afectar al rendimiento del motor y a la pérdida de potencia. Estudios relacionados revelan que el evento de regeneración tiene un impacto importante en la emisión del motor, ya que es responsable de la emisión de una gran cantidad de partículas más pequeñas (Chiavola et al., 2019). El uso del sistema DPF en los motores diésel marinos avanza a un ritmo más lento en comparación a otro tipo de motores de menor tamaño utilizados en otros medios de transporte. Uno de los principales motivos que puede provocar esta situación, es el gran volumen requerido para instalar este equipo, ya que la cantidad de hollín que cada filtro puede absorber depende de su volumen (Stamatellou & Stamatelos, 2017).

De todo lo anterior se deduce que el valor de los factores de emisión es crucial para el cálculo total de emisiones. Es por ello, por lo que esta memoria se ha centrado en definir, mediante pruebas “in situ” a bordo, los valores de los factores de emisión al objeto de proceder a su actualización.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología empleada para medir las emisiones gaseosas de CO₂, NO_x, SO_x y material particulado (PM₁₀) mediante mediciones reales “in situ” en dos buques del tipo Ro-Pax que navegan en la zona marítima del Estrecho de Gibraltar. La ruta marítima que cubren estos buques es la línea entre el puerto de Algeciras (España) y el puerto Tánger Med (Marruecos).

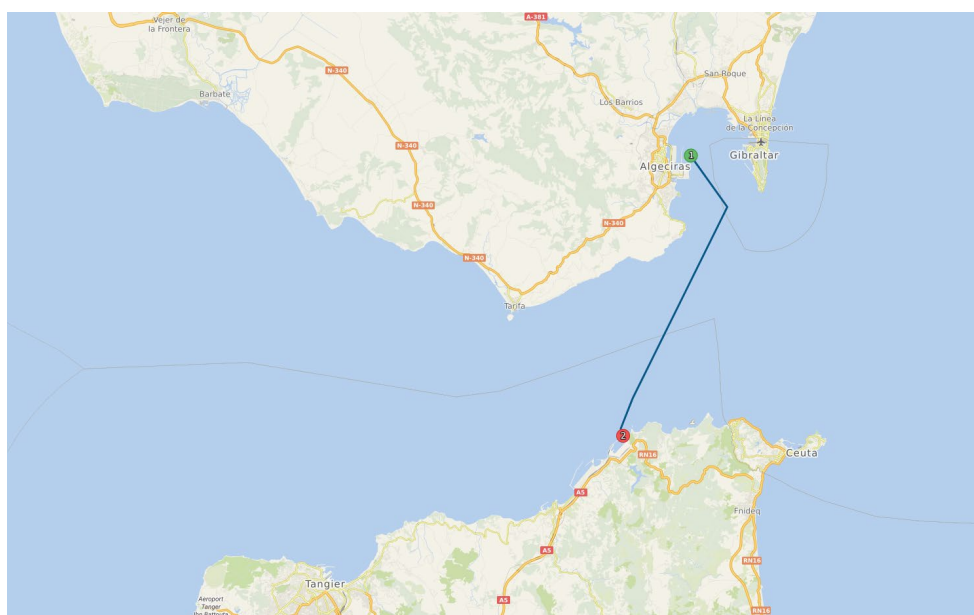


FIGURA 1. RUTA MARÍTIMA ALGECIRAS-TÁNGER MED, ESTRECHO DE GIBRALTAR (ESPAÑA)

Las medidas se han tomado durante diez días a bordo en cada uno de los buques objeto de estudio, nombrados en esta memoria como “buque A” y “buque B”. Estas pruebas se han realizado en los motores principales del buque A y en los motores auxiliares del buque B. Todas las mediciones en los motores que conforman la planta propulsora, se han efectuado durante las fases de navegación en mar abierto (crucero) consumiendo combustible residual (RO), mientras que las realizadas en los motores auxiliares, se han desarrollado en la situación de buque atracado mientras consumían combustible destilado (MDO).

Las principales características de estos dos buques y los motores estudiados en este trabajo de investigación son especificadas a continuación:

El Buque A con capacidad para transportar más de novecientos pasajeros y unos trecientos vehículos dispone de las siguientes características:

- Eslora: 136,4 m
- Manga: 24,6 m
- Calado para la condición de máxima carga: 5,57 m
- Tonelaje Bruto: 14.379 GT (Gross Tonnage)
- Velocidad máxima de diseño: 20 nudos

La planta propulsora del buque A consta de dos motores principales de dos tiempos cuyas principales características se citan a continuación:

- Tipo de motor: MAN B&W 9L35MC
- Potencia 100 % MCR (Maximun Continous Rating): 5.850 kW
- Número de cilindros: 9 cilindros
- Ciclo de trabajo: 2 tiempos
- Régimen nominal: 210 min⁻¹ (sentido de giro horario)
- Turbocompresor: MAN B&W NA40/SO1023
- Regulador de velocidad: NorControl DGU 8800e
- Enfriador de aire: MAN B&W LKM 24/27 F4-AP

Las características del buque B con capacidad para transportar unos doscientos veinte pasajeros y ciento cincuenta vehículos son las siguientes:

- Eslora: 160,6 m
- Manga: 22,4 m
- Calado para la condición de máxima carga: 5,94 m
- Tonelaje Bruto: 14.411 GT (Gross Tonnage)
- Velocidad máxima de diseño: 23 nudos

Motores auxiliares:

- Tipo de motor: WARTSILA 6R22MD-C
- Potencia 100 % MCR (Maximun Continous Rating): 882 kW
- Número de cilindros: 6 cilindros
- Ciclo de trabajo: 4 tiempos
- Régimen nominal: 1.000 min⁻¹ (sentido de giro horario)
- Turbocompresor: ABB
- Regulador de velocidad: Woodward UG-10

Por otro lado, también se desarrolla la metodología empleada para el cálculo de los valores de los factores de emisión en g/kWh de los distintos agentes contaminantes mencionados anteriormente. El procedimiento empleado para ello se basa en un balance de carbono que requiere el conocimiento de los valores correspondientes a las potencias entregadas por cada motor objeto de estudio. Los métodos empleados para el cálculo de dichas potencias se definirán más adelante. Este procedimiento está definido en la página 96 de la directiva MEPC 58/23/Add.1 ANEXO 14 (MEPC.177(58), 2008), publicado en BOE n.º 131 del 10 de octubre de 2008. Concretamente, este modelo de cálculo ya fue empleado en trabajos científicos realizados por la Dra. Durán y el Dr. Moreno y publicados en revistas de alto índice de impacto (Durán-Grados V. et al., 2009; Uriondo et al., 2011; Durán-Grados et al., 2012).

4.1. EQUIPOS E INSTRUMENTOS EMPLEADOS

Para el caso de los NO_x, SO_x, O₂, CO y CO₂, se ha empleado el equipo analizador de combustión Testo 350-MARITIME cuyos resultados vienen expresados en partes por millón (ppm), valor nada significativo para el cálculo de los valores de los factores de emisión expresado en esas unidades. Para convertir en gramos por kilovatio hora (g/kWh) estas concentraciones de contaminantes expresadas en ppm, se aplica un balance de

carbono que es uno de los procedimientos definidos en el Código Técnico de los NO_x en el que intervienen el flujo másico de combustible consumido en tiempo real, el contenido de carbono en el combustible, la densidad de los gases de escape y el volumen molecular del CO₂. Para el cálculo de la energía entregada en kWh ha sido necesario calcular la potencia desarrollada por cada motor, lo cual se ha realizado empleando tres procedimientos detallados en este apartado de metodología.

Los principales equipos y medios utilizados en el procedimiento de medición real a bordo son numerados y descritos a continuación:

- Equipo electroquímico Testo 350-MATITIME XL de medidas de concentración de contaminantes en gases de escape (NO_x, SO_x, O₂, CO y CO₂). El sensor de SO_x fue añadido posteriormente a la adquisición del equipo, puesto que originalmente solo incorporaba el de NO_x.
- Equipo HORIBA SLFA-6100 para medir contenido masa/masa (m/m) de azufre en el combustible.
- Equipo de medición de material particulado de alta resolución ELPI+ con un rango de medida en tiempo real de un tamaño de partícula comprendido entre 6 nm y 10 μm.
- Equipo de medición de flujo de combustible mediante caudalímetro no intrusivo SIEMENS SITRANS FST020.
- Equipo de medida de presión, temperatura y humedad relativa de aire de aspiración HD2001.1 DELTA OHM.
- Utilización de modelo de cálculo de potencia de motores principales en tiempo real.

El equipo Testo 350-MARITIME empleado es un analizador portátil utilizado para la medición a bordo de componentes gaseosos de las emisiones en motores diésel marinos como NO_x, SO_x, O₂, CO y CO₂. El equipo cumple completamente con el “método directo de medición y monitorización” según el MEPC. 103(49) MARPOL Anexo VI y el Código Técnico de NO_x. Este analizador está certificado por el Germanischer Lloyd (GL) (DNV GL) n.º TAA00001K0 para la medición de las concentraciones de los componentes de los productos de la combustión y certificado Nippon Kaiji Kyokai (Class NK) n.º 14DD001B.



FIGURA 3. EQUIPO TESTO 350-MARITIME



FIGURA 2. MEDICIÓN EQUIPO TESTO 350-MARITIME

La recalibración del equipo se ha llevado a cabo anualmente por el fabricante utilizando un gas patrón para cada sensor o en su defecto, como en el caso del CO₂, un filtro de absorción para obtener lecturas precisas mediante los valores de la siguiente tabla7.

TABLA 7. CONCENTRACIONES DE GAS PATRÓN PARA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Parámetro	Rango de medición
CO	500 ppm (en N ₂)
CO ₂	10 % (en N ₂)
NO	1.000 ppm (En N ₂)
NO ₂	100 ppm (en aire sintético)
SO ₂	1000 ppm (en N ₂)

El equipo Testo 350-MARITIME trabaja con los rangos de medición e incertidumbres reflejados en la siguiente tabla 8.

TABLA 8. RANGOS DE MEDICIÓN Y EXACTITUD DEL EQUIPO TESTO 350-MARITIME

Parámetro	Rango de medición	Exactitud	Resolución
Temperatura	-40 – +1000 °C	Máx. ± 5 K	–
O ₂	0 – 25 vol.%	Según MARPOL, Anexo VI o el Código Técnico del NO _x	–
CO	0 – 3.000 ppm		–
NO	0 – 3.000 ppm		–
NO ₂	0 – 500 ppm		–
SO ₂	0 – 3.000 ppm		–
CO ₂	0 – 40 vol.%		–
Presión absoluta	600 – 1.150 hPa	±10 hPa (-5 – +45 °C)	–
Presión diferencial	-200 – 200 hPa	± 5 hPa	0,1 hPa
Rendimiento	0 – 120 %	–	0,1 %
Pérdida por humos	-20 – 99,9 %	–	0,1 %

El equipo empleado para el análisis del combustible modelo HORIBA SLFA-6100, se basa en la técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva y es capaz de medir el contenido de azufre de forma precisa en los productos derivados del petróleo tales como aceite pesado, nafta, petróleo crudo y aceite ligero cumpliendo con las normas JIS K2541, JIS B7995, ISO 8754 y ASTM-D4294.



FIGURA 4. EQUIPO HORIBA SLFA-610

Este modelo puede medir una gama muy amplia de contenido en azufre desde 0-0.9999 % en peso de azufre en un tiempo de medición muy reducido que se extiende de 10 a 600 segundos.

El equipo HORIBA SLFA-6100 es de reciente adquisición y es calibrado anualmente por el fabricante según norma JIS K2541-1996 y JIS 87995-1994 mediante el cálculo del rango de concentración a través de curvas de calibración creadas a partir de muestras normalizadas de disulfido de dibutilo (DBDS), tetralina y decalina.

En la tabla 9 se pueden apreciar las especificaciones técnicas del equipo analizador de combustible.

TABLA 9. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS HORIBA SLFA-6100

Parámetro	SLFA-6100
Principio de medición	Método de análisis de fluorescencia de rayos X
Objeto de medición	Azufre en productos derivados del petróleo como petróleo pesado, nafta, petróleo crudo y petróleo ligero
Rango de medición	0 % a 9,9999 % en peso de azufre
Repetibilidad	5 ppm o menos con una muestra de azufre al 1 % 1,6 ppm o menos con una muestra con 0 % de azufre
Corrección de relación C/H	± 50 ppm o menos por C/H (con una muestra de azufre al 1 %)
Límite inferior de detección	5 ppm o menos (3 veces la desviación estándar con una muestra del 0 %)
Número de curvas de calibración	Hasta 15 curvas de calibración almacenadas
Grado de curva de calibración	Lineal o cuadrática (tanto la selección automática como la configuración manual están disponibles)
Cantidad y N.º de muestras	4 ml a 10 ml, 1 celda exclusiva de muestra
Tiempo de medición	10 a 600 segundos
Temperatura de funcionamiento	+ 5 °C a + 40 °C
Humedad relativa	Humedad relativa máxima del 80 % en el rango de temperatura + 5 °C a + 30 °C Disminución lineal al 50 % de humedad relativa en el rango de temperatura + 31 °C a + 40 °C
Medida de espectro	Rango de energía: 0 - 10 keV
El consumo de energía	150 VA
Dimensiones externas	403 mm x 468 mm x 210 mm
Peso	21 kg

El instrumento utilizado para la medición de partículas en tiempo real, es el equipo de alta resolución ELPI+ (Electrical Low Pressure Impactor), permitiendo determinar la su concentración en el aire y la distribución de su tamaño en hasta 500 clases (entre 6 nm – 10 µm). También permite la posibilidad de caracterizar la composición química de las partículas recolectadas y clasificadas por tamaño después de realizar la medición.

En primer lugar, las partículas se cargan eléctricamente con un nivel de carga conocido en un cargador de corona, y posteriormente son clasificadas por tamaño en un impactador en cascada de baja presión según su tamaño de partícula aerodinámico. Las diferentes etapas del impactador se encuentran eléctricamente aisladas unas de otras y los electrómetros sensibles están conectados a cada una de ellas. Las partículas cargadas que se recogen en una etapa impactadora específica producen una descarga eléctrica, que es registrada por el respectivo canal del electrómetro. Esta corriente es directamente proporcional al número de concentración de partículas en esa etapa del impactador.

Las 13 etapas del impactador operando en el rango de 16 nm - 10 μm se pueden usar para recolectar la muestra en una lámina o un filtro para realizar un análisis gravimétrico o de composición química para cada clase de tamaño de partícula. La etapa final en el rango de 6nm - 16 nm contiene un filtro de baja caída de presión especialmente diseñado que mide la concentración de partículas en tiempo real, pero no permite la recolección de muestras para el análisis.



FIGURA 5. EQUIPO ELPI+

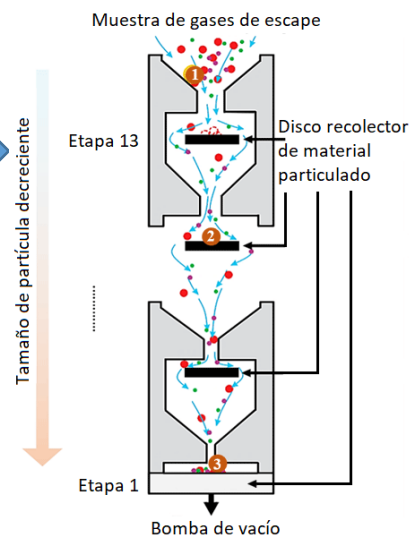


FIGURA 6. IMPACTADOR EQUIPO ELPI+

El equipo ELPI+ cumple con las siguientes regulaciones en función de su aplicación:

- Método de medición compatible con ISO16000-34 para la determinación en tiempo real de PM en interiores.
- Método compatible con EN17199-1 y EN17199-4 para mediciones de polvo en tiempo real.
- Método compatible con ISO/TS 21361 para cuantificar las concentraciones en el aire de negro de humo y sílice amorfa en el rango de tamaño de nanopartículas en un entorno de fabricación de polvo mixto.
- Método compatible con ISO 17536 para determinar la eficiencia de separación de los filtros de escape en motores de combustión interna.
- Método de medición para determinar la concentración y la distribución de tamaños en el aire ambiente según la directriz VDI 3867 Blatt 6.

Este equipo se ha adquirido recientemente y la calibración completa se ha efectuado por el fabricante, ésta se realiza anualmente.

A continuación, en la tabla 10, se pueden encontrar las principales especificaciones técnicas del equipo ELPI+.

TABLA 10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ELPI+

Parámetro	Valor
Caudal nominal de aire de muestra	10 l/min.
Rango de tamaño de partícula	0,006 – 10 μm
Número de canales	15 etapas y 500 canales
Frecuencia de muestreo	10 Hz o 1 Hz
Temperatura ambiente	10 – 35 °C
Humedad ambiente	0 – 90 %
Temperatura de gases de muestreo	< 180 °C
Peso	22 kg
Dimensiones	407 mm x 454 mm x 242 mm
Potencia eléctrica	100–250 V, 50–60 Hz, 200 W

Para la medición de caudales, se ha empleado el caudalímetro ultrasónico no intrusivo SIEMENS SITRANS FST020, realizando la medición mediante sensores colocados en el exterior de la tubería, lo que evita cortar tuberías, interrumpir el flujo del fluido ni entrar en contacto con éste. En las siguientes figuras se puede apreciar el equipo empleado para la medición del flujo, así como los sensores colocados en una de las tuberías de combustible del motor principal del buque objeto de estudio.



FIGURA 8. CAUDALÍMETRO SIEMENS SITRANS FST020



FIGURA 7. SENSORES ULTRASÓNICOS SIEMENS

Este caudalímetro puede utilizarse para las siguientes condiciones de aplicación:

- Tamaños de tubería de 10 mm a 10 m.
- Materiales de tubería: ideal para todos los metales excepto tuberías de hormigón y tuberías de compuestos especiales.
- Espesor de la pared de la tubería de 1 a 35 mm como máximo.
- Temperaturas de fluido en un rango de -40 a 121 °C con sensores estándar. Los sensores preparados para altas temperaturas pueden soportar hasta 230 °C como máximo.
- Preparado para trabajar en entornos subterráneos o sumergidos, entornos no ideales o con vibraciones intensas en las tuberías.

Los datos técnicos de este caudalímetro son los siguientes:

TABLA 11. DATOS TÉCNICOS CAUDALÍMETRO SIEMENS SITRANS FST020

Parámetro	Dato
Rango de caudal	± 12 m/s (bidireccional)
Sensibilidad del caudal	0,0003 m/s
Precisión de caudal	0,5 - 1,0 % para velocidades $\geq 0,3$ m/s
Repetibilidad	± 0,25 % (conforme a la norma ISO 11631)
Deriva del cero	0,1 % del caudal; $< \pm 0,001$ m/s
Frecuencia de actualización de datos	100 Hz
Temperatura de funcionamiento	-10 a 50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C a 60 °C
Grado de protección	IP65/Tipo 4X/NEMA 4X
Peso	1,4 kg
Dimensiones	175,7 x 240,3 x 91,1 mm
Alimentación eléctrica	100 - 240 V AC, 50/60 Hz, 12 VA máximo

Para la medición de los parámetros ambientales de presión, temperatura y humedad relativa de aire de aspiración, se ha empleado el equipo de medición HD2001.1 DELTA OHM. En su pantalla se pueden visualizar de forma constante dos parámetros, el primero de ellos seleccionable (humedad relativa o presión atmosférica) y el segundo fijo (temperatura). Los datos pueden ser volcados a un ordenador personal mediante el puerto de conexión correspondiente a una distancia máxima de 25 metros. Para la visualización de los datos se ha empleado el programa informático DeltaMet8 suministrado por el mismo fabricante del equipo. Sus características técnicas son presentadas a continuación en la tabla 12.

TABLA 12. DATOS TÉCNICOS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN HD2001.1 DELTA OHM

Parámetro	Dato
Rango de medida	-20 a +80 °C
Rango de presión	600-1100 hPa (aire no corrosivo)
Precisión	+/-0,3°C; Humedad +/-2,5% H.R.; Presión +/-0,5 hPa
Salidas analógicas	0(4)-20mA 0-10V
Salida comunicaciones	RS232/RS485
Alimentación	24V (230 V AC bajo demanda)
Grado protección electrónica	IP67
Dimensiones	120x122x56 mm

4.2. CICLOS DE ENSAYO

Los ciclos de ensayo, es decir, los puntos de funcionamiento caracterizados por una potencia, y factores de ponderación aplicados durante las pruebas a bordo para cada motor en particular, se muestran en las siguientes tablas. En el caso de los motores principales objeto de estudio, al estar conectados a una hélice de paso variable, se ha aplicado el ciclo de ensayo recogido en la Tabla 13 para un sistema de propulsión principal que trabaja a un régimen constante de revoluciones.

A continuación, se describen los diferentes ciclos de ensayo para ser empleados en los distintos tipos de motores de acuerdo a la resolución MEPC.177(58) y al Código Técnico de los NO_x.

TABLA 13. CICLO DE ENSAYO PARA MOTORES PRINCIPALES CON UN RÉGIMEN CONSTANTE (MEPC.177(58), 2008)

Ciclo de ensayo tipo: E2				
Régimen	100 %	100 %	100 %	100 %
Potencia	100 %	75 %	50 %	25 %
Factor de Ponderación	0,2	0,5	0,15	0,15

Para aquellos motores que trabajan conectados a hélices de paso fijo adaptados a su demanda, ya sean auxiliares o principales, se emplean los parámetros contemplados en la siguiente tabla 14.

TABLA 14. CICLO DE ENSAYO PARA MOTORES PRINCIPALES Y AUXILIARES QUE TRABAJAN A DEMANDA DE LA HÉLICE (MEPC.177(58), 2008)

Ciclo de ensayo tipo: E3				
Régimen	100 %	91 %	80 %	63 %
Potencia	100 %	75 %	50 %	25 %
Factor de Ponderación	0,2	0,5	0,15	0,15

Para aquellos motores auxiliares que desarrollan un régimen constante de funcionamiento, como es el caso que nos ocupa, se ha aplicado el ciclo de ensayo definido a continuación:

TABLA 15. CICLO DE ENSAYO PARA MOTORES AUXILIARES CON UN RÉGIMEN CONSTANTE (MEPC.177(58), 2008)

Ciclo de ensayo tipo: D2					
Régimen	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Potencia	100 %	75 %	50 %	25 %	10 %
Factor de Ponderación	0,2	0,5	0,15	0,15	0,1

En el caso de motores auxiliares que trabajan a un régimen y una carga variable, el ciclo de ensayo a emplear es el reflejado en la siguiente tabla 16.

TABLA 16. CICLO DE ENSAYO PARA MOTORES AUXILIARES CON UN RÉGIMEN Y CARGA VARIABLE (MEPC.177(58), 2008)

Ciclo de ensayo tipo: C1								
Régimen	Régimen Nominal				Régimen Intermedio			En vacío
Par	100 %	75 %	50 %	10 %	100 %	75 %	50 %	0 %
Factor de Ponderación	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15

Por potencia nominal se entiende que es aquella potencia máxima continua que el motor es capaz de desarrollar, que se muestra en el expediente técnico del motor y en su placa de identificación correspondiente. Por otro lado, el régimen nominal es la velocidad angular del cigüeñal (expresada en min^{-1}) a la cual el motor desarrolla su potencia nominal.

En el ciclo de ensayo para motores auxiliares con un régimen constante, los porcentajes del par motor indican la relación existente entre el par requerido y el par máximo posible para un determinado régimen de acuerdo con el Código Técnico de los NO_x , el régimen intermedio empleado para este ciclo de ensayo debe ser el indicado por el fabricante del motor.

Se especifican, a continuación, los procedimientos para medir las emisiones de NO_x , SO_x y partículas según la directiva MEPC 58/23/Add.1, ANEXO 14.

- Procedimiento de ensayo general en banco de pruebas, para el reconocimiento de certificación previa anterior a su instalación a bordo.

- Procedimiento simplificado de ensayo y medición a bordo, empleado en los reconocimientos intermedios, anuales y de renovación de la certificación del motor.
- Procedimiento directo de medición y vigilancia, empleado con equipos fijos de medición instalados de manera permanente a bordo.

Mediante el procedimiento definido en el Código Técnico de los NO_x se han registrado los siguientes datos:

- Fecha y hora de la medición.
- Posición del Buque (coordenadas geográficas).
- Velocidad y rumbo instantáneos del buque.
- Calado del buque.
- Condiciones océano-meteorológicas: viento, oleaje, corriente (intensidad y dirección en los tres casos).
- Consumo instantáneo del buque.
- Así como el resto de datos asociados al procedimiento de realización de mediciones descrito en los siguientes apartados de esta metodología.

A continuación, se describen los métodos de medición y cálculo de las emisiones de gases de escape en motores diésel alternativos de combustión interna empleados. Aunque el procedimiento simplificado de ensayo y medición a bordo es el método específico puesto en práctica en el presente estudio de investigación, gran parte de los procedimientos y cálculos se basan en el método de ensayo general en banco de pruebas que se describe a continuación.

4.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO GENERAL

El método de ensayo general define el procedimiento a emplear para la medición y el cálculo de emisiones de gases de escape principalmente en laboratorio, previa instalación del motor a bordo, describiendo también los procedimientos a emplear en otras situaciones específicas, como puede ser el ensayo realizado a bordo una vez el motor se encuentra instalado. El cálculo de los valores de emisión exige la realización de complejas y numerosas mediciones, esto se realiza con el objetivo de obtener el valor medio ponderado de los diferentes contaminantes presentes en los gases de escape.

Es importante que los motores tengan instalado todo el equipamiento auxiliar acoplado al mismo y que posteriormente van a llevar cuando se encuentren a bordo (bombas de lubricación o refrigeración, ventiladores, etc.) ya que este equipo va a influir directamente en el cálculo de la potencia que desarrolla el motor. Es muy probable que en el momento de realizar la medición no se conozca el equipamiento auxiliar con el que el motor contará posteriormente una vez instalado a bordo. Por este motivo, las emisiones en banco de prueba suelen expresarse en función de la potencia al freno. La potencia al freno se obtiene mediante un freno dinamométrico y se mide en el cigüeñal cuando el motor únicamente cuenta con el equipamiento necesario para su funcionamiento en el banco de pruebas. En el caso de que el equipo auxiliar no sea retirado del motor, se debe determinar la potencia absorbida por dicho equipo auxiliar en los diferentes regímenes de ensayo. El dato de la potencia consumida por el equipo auxiliar se restará posteriormente de la potencia medida por el freno dinamométrico acoplado en el eje del motor.

Para demostrar la validez del ensayo, deben medirse tanto la temperatura absoluta del aire como la presión atmosférica en seco. En el caso de la presión atmosférica en seco puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$P_s = P_b - 0,01 * R_a * P_a$$

8

Donde:

- P_s : presión atmosférica en seco (kPa);
- P_b : presión barométrica total en el local (kPa);
- R_a : humedad relativa del aire de admisión (%);
- P_a : presión de saturación de vapor del aire de admisión (kPa).

Para el cálculo de la presión de saturación se emplea la siguiente expresión:

$$P_a = (4,856884 + 0,2660089 * t_a + 0,01688919 * t_a^2 - 7,477123 * 10^5 * t_a^3 + 8,10525 * 10^{-6} * t_a^4 - 3,115221 * 10^5) * \left(\frac{101,32}{760}\right)$$

9

Donde:

P_a : presión de saturación de vapor del aire de admisión (kPa);

t_a : temperatura absoluta del aire de admisión (°C).

A continuación, se calcula el factor correspondiente a las condiciones de ensayo (f_a), que indicará si el ensayo puede considerarse válido. En el Código Técnico queda perfectamente definido este parámetro en un intervalo determinado, de forma que la validez del ensayo queda supeditada a que este valor se encuentre dentro del mismo.

$$0,93 \leq f_a \leq 1,07$$

Para motores que trabajan con aspiración natural de aire o bien con sobrealimentación mecánica, el parámetro f_a se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$f_a = \left(\frac{99}{P_s}\right) * \left(\frac{t_a}{298}\right)^{0.7}$$

10

Donde:

f_a : factor de las condiciones de ensayo;

P_s : presión atmosférica en seco (kPa);

t_a : temperatura absoluta del aire de admisión (°C).

En el caso de motores sobrealimentados que emplean el elemento turbocompresor para la alimentación forzada de del aire de admisión, como es éste el caso, el factor relativo a las condiciones de ensayo se calcula por medio de la ecuación siguiente:

$$f_a = \left(\frac{99}{P_s}\right)^{0.7} * \left(\frac{T_a}{298}\right)^{1.5}$$

11

Donde:

f_a : factor de las condiciones de ensayo;

P_s : presión atmosférica en seco (kPa);

t_a : temperatura absoluta del aire de admisión (°C).

Para aquellos motores donde el aire de admisión es refrigerado, se debe anotar tanto la temperatura del aire de carga como la del fluido refrigerante. De acuerdo al Código Técnico, si el aire es refrigerado directamente con agua de mar o con agua dulce refrigerada con agua salada, se debe cumplir que no se alcancen en el escape los límites máximos de NO_x estipulados con una temperatura ambiente de referencia del agua de mar de 25 °C. En el caso de los motores donde el aire no sea refrigerado de forma directa ni indirecta por agua de mar, por ejemplo, mediante un sistema de radiadores por aire, se debe cumplir la condición anteriormente mencionada de limitación de NO_x para una temperatura de referencia del aire de 25 °C.

Si el motor contase con su propio sistema de aire de admisión integrado, éste será utilizado para el ensayo en el banco de pruebas. En caso contrario, se debe emplear un sistema de admisión de aire auxiliar que no varíe en más de 300 Pa del valor máximo que marca el fabricante del motor a un régimen de potencia nominal y a plena carga.

Para el sistema de escape utilizado en este tipo de pruebas, de acuerdo al Código Técnico debe emplearse el que integre el motor objeto de ensayo. En caso de que el motor no cuente con este sistema, debe utilizarse uno que cumpla con el requisito de no presentar una contrapresión en los gases de escape mayor o menor a 650 kPa, sobre el valor máximo contemplado por el fabricante del motor, a un régimen de potencia nominal y a plena carga. Para aquellos motores que lleven instalados un sistema de tratamiento de gases de escape, el conducto de exhaustación que se coloque en el banco de pruebas, debe tener el mismo diámetro que tenga a bordo, debiendo contar con una longitud mínima de cuatro veces el diámetro hasta la entrada del dispositivo de tratamiento de gases de escape.

Las características del combustible utilizado para el ensayo pueden influir en la formación de contaminantes emitidos por el motor. Parte los compuestos contenidos en el combustible, como el nitrógeno o el azufre, pueden dar lugar a la formación de contaminantes como NO_x o SO_x durante el proceso de la combustión. Por este motivo, es importante registrar todas las características del combustible empleado para la prueba, así como tomar una muestra del mismo. Para este tipo de ensayo, se recomienda el uso de un combustible destilado marino acorde a la especificación ISO 8217 o, en su defecto, un combustible marino residual de acuerdo a la misma norma. La temperatura del combustible a la entrada del motor debe ser la indicada por el fabricante. Para asegurar

que el combustible tenga dicha temperatura debe ser medida y anotada para que su valor quede registrado.

Para la medición del flujo másico de los gases de escape se pueden emplear tres métodos fundamentalmente:

1. Realizando la medida directa en el conducto de escape mediante un equipo de medición de caudal o caudalímetro. Este tipo de medición puede resultar ser complicada llevarla a cabo, debido principalmente los posibles errores que puedan cometerse y que puedan afectar a los resultados de los valores de emisión obtenidos.
2. Empleando caudalímetros para obtener la medida del caudal másico de aire de admisión y el caudal másico de combustible. El flujo de los gases de escape se determinará en kg/h mediante la suma de estos dos parámetros.

$$\dot{q}_{mew} = \dot{q}_{maw} + \dot{q}_{mf}$$

12

Donde:

\dot{q}_{mew} : caudal másico de gases de escape en base húmeda (kg/h);

\dot{q}_{maw} : caudal másico de aire de admisión en base húmeda (kg/h);

\dot{q}_{mf} : caudal másico de combustible (kg/h).

3. El tercer método se basa en la medición del flujo de combustible y la aplicación del método de balance de carbono enfocado al cálculo del flujo másico de los gases de escape. Para su desarrollo, además del consumo de combustible, se tiene en cuenta su composición, así como las concentraciones de gases de escape. Para determinar el caudal de gases de escape a partir de estos datos se emplea la ecuación 13.

$$\dot{q}_{mew} = \dot{q}_{mf} * \left(\left(\frac{1,4 * W_c^2}{\left(\frac{(1,4 * W_c)}{f_c} + (W_H * 0,008936) - 1 \right) * \frac{1}{1,293} + f_{fd}} \right) + (W_H * 0,08936) - 1 \right) * \left(1 + \frac{H_a}{100} \right) + 1 \right)$$

13

Donde:

\dot{q}_{mew} : caudal másico de gases de escape en base húmeda (kg/h);

\dot{q}_{mf} : caudal másico de combustible (kg/h);

W_H : contenido de H en el combustible (% masa/masa);

W_C : contenido de C en el combustible (% masa/masa);

f_c : factor de carbono;

f_{fd} : factor específico del combustible;

H_a : humedad absoluta del aire de admisión en gramos de H₂O por kilogramos de aire seco (g/kg).

El factor específico del combustible para determinar el caudal de gases de escape se obtiene de la siguiente manera, teniendo en cuenta la composición del combustible:

$$f_{fd} = -0,55593 * W_H + 0,008002 * W_C + 0,0070046 * W_O$$

14

Donde:

f_{fd} : factor específico del combustible;

W_H : contenido de H en el combustible (% masa/masa);

W_C : contenido de C en el combustible (% masa/masa);

W_O : contenido de O en el combustible (% masa/masa).

El factor de carbono se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_c = (C_{CO_2d} + C_{CO_2ad}) * 0,5441 + \frac{C_{COd}}{18.522} + \frac{C_{HCw}}{17.355}$$

15

Donde:

C_{CO_2d} : concentración seca de CO₂; en los gases de escape (% vol);

C_{CO_2ad} : concentración seca de CO₂ en los gases en aire ambiental (% =0,03 %);

C_{COd} : concentración seca de CO en los gases de escape (ppm);

WC_{HCw} : concentración húmeda de HC en los gases de escape (ppm).

4.3.1. TOMA DE MUESTRAS

La calibración de todos los instrumentos empleados para las mediciones es crucial para obtener resultados fiables dentro las tolerancias admisibles. Los equipos han sido calibrados mediante las normas reconocidas pertinentes y cumpliendo con las prescripciones que figuran en Código Técnico de los NO_x. Los equipos de medición empleados para el análisis de los componentes gaseosos cumplen además con lo dispuesto en el citado código.

Para la toma de muestras de los componentes de los gases de escape pueden emplearse uno o varios equipos simultáneos de medición. En caso de que los equipos compartan el mismo punto de muestreo, las sondas deben disponer de canalizaciones internas para dividir los gases hacia los diferentes equipos. En el estudio realizado en este trabajo de tesis doctoral los equipos de medición se han empleado de forma simultánea, pero con puntos independientes de muestreo, tal y como puede apreciarse en las figuras 9 y 10 más adelante. Por otro lado, debido al aumento del recorrido de los gases de escape, se ha puesto especial atención en evitar que se produzcan condensaciones de agua o formación de ácido sulfúrico en algún punto de la instalación empleada para el análisis.

En el caso de estos motores marinos, para asegurar que la muestra de gases de escape es representativa de todo el conjunto de cilindros, la sonda ha sido ubicada a una distancia lo suficientemente alejada del motor donde los gases de escape se consideran ya lo suficientemente mezclados.

En este sentido, para la colocación de las sondas de medición se ha empleado un punto localizado en el escape del motor a una distancia equivalente a 10 veces el diámetro del conducto de exhaustación desde la salida del motor, o desde el equipo de tratamiento de gases en el caso de que el motor lo hubiera equipado. En cualquier caso, la sonda de toma de muestras debe ser colocada a una distancia no inferior a 0,5 m o tres veces el diámetro del tubo de escape antes de la salida del sistema al exterior (eligiendo el mayor de estos dos valores), tal y como establece el Código Técnico. Además, la sonda tiene que ubicarse en un punto donde se asegure como mínimo una temperatura de los gases de escape de 190 °C. En el caso de que el motor hubiera contado con dos colectores de escape separados para distintos cilindros, como es el caso de los motores que presentan una disposición de cilindros en “V”, la reglamentación permite tomar por separado muestras

independientes de gases de escape de cada colector, realizando posteriormente la media entre ambas medidas.

Para garantizar la estanqueidad y el buen funcionamiento del equipo analizador de gases de escape, se han realizado pruebas de detección de fugas anteriores a cada medición. Esta prueba consiste en taponar el extremo de la sonda del equipo analizador al mismo tiempo que se pone en funcionamiento la bomba del equipo. Tras esperar un tiempo para que el sistema de medición se estabilice, se comprueba que los caudalímetros muestran un valor nulo, de lo contrario, indicará que debemos revisar los tubos y componentes del sistema para lograr encontrar la fuga.

La sonda de medición se coloca siempre a continuación de cualquier filtro o elemento de tratamiento que pueda modificar la composición de la muestra de gases de escape. También debe estar localizada en un punto del escape donde no se permita la entrada de agua al sistema de medición, alejada por ejemplo de los sistemas de inyección de agua para la refrigeración de gases de escape si el motor cuenta con esta tecnología, no siendo éste el caso.



FIGURA 10. SONDAS DE MEDICIÓN



FIGURA 9. SONDA DE MEDICIÓN DE EMISIONES GASEOSAS

Para la medición del material particulado, se ha empleado un sistema de dilución de los gases de escape en aire para el acondicionamiento de la muestra y prevenir la saturación del equipo de medición. Este sistema de dilución garantiza la eliminación del condensado de agua y mantiene una temperatura de la muestra diluida entre 30 y 50 °C. El equipo de medición de material particulado es capaz de realizar la conversión de las

concentraciones de partículas a concentración de masa en tiempo real. En caso de no haber contado con esta tecnología a la hora de determinar la masa de las partículas, se necesitaría emplear una balanza graduada en microgramos para realizar el pesaje de los discos del equipo encargados de recolectar las partículas. Esta operación debe llevarse a cabo en una cámara de pesaje a temperatura y humedad controlada. Las siguientes figuras 11 y 12 muestran el material particulado captado por uno de los discos recolectores del equipo.



FIGURA 12. PAQUETE DE DISCOS RECOLECTORES



FIGURA 11. DETALLE DE PARTÍCULAS

En la figura 13 se puede apreciar el esquema de instalación que muestra los diferentes elementos que integran el sistema de medición de material particulado.

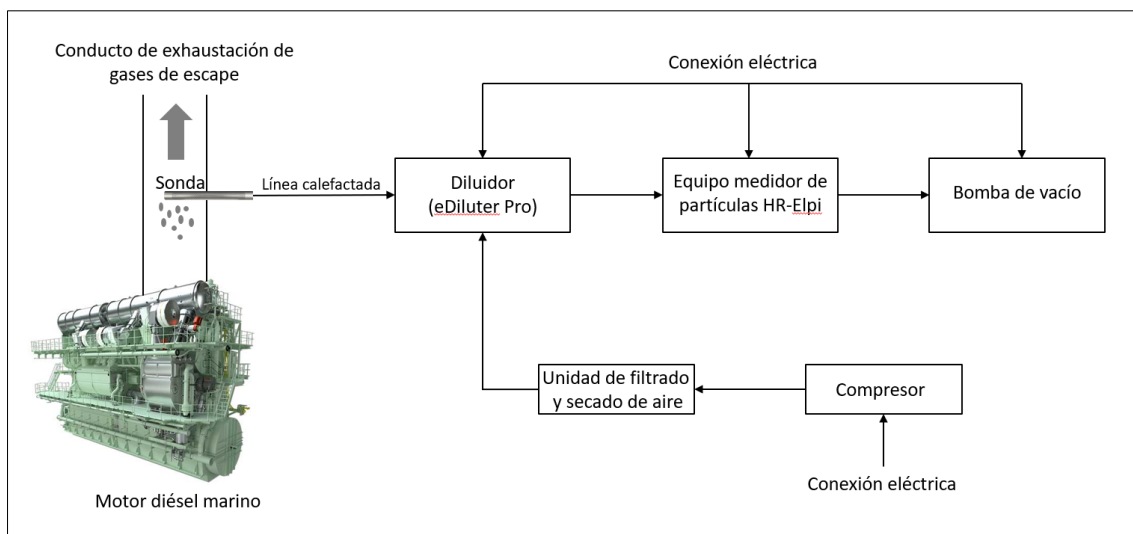


FIGURA 13. ESQUEMA DE INSTALACIÓN PARA EQUIPO DE MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

Tras la instalación del sistema de medición de partículas, el equipo de dilución y el compresor se ponen en marcha para realizar el precalentamiento del sistema hasta que se consiga la estabilización de todos los valores de presión y temperatura a plena carga del motor y a la velocidad nominal de giro del mismo.

Antes de iniciar el proceso de medición de gases de escape, se realiza un proceso de verificación de calibrado que asegure que los valores que va a medir el equipo son fiables y se encuentran dentro de tolerancia. Inicialmente, para el analizador de CO₂, CO, NO_x, O₂ y SO_x se efectúa una puesta a cero de los parámetros de medición de gases. Para ello, se emplea aire sintético de gran pureza o nitrógeno purificado con una concentración baja conocida de otros compuestos gaseosos, denominado como gas cero. Por otro lado, si el equipo no dispone de función de auto calibrado, que no es el caso, se puede emplear para ello un gas patrón de calibración de características conocidas. Si el resultado obtenido no difiere del valor de referencia en más de un 4 %, no será necesario realizar una nueva curva de calibración.

La pureza requerida para los gases empleados en la comprobación de los valores cero del equipo, tanto para el aire sintético como para el nitrógeno purificado, se indican a continuación:

TABLA 17. PUREZA DE LOS GASES PARA PUESTA A CERO DEL EQUIPO ANALIZADOR (MEPC.177(58), 2008)

Contaminantes	C	CO	CO ₂	NO
Límites de contaminación	≤ 1 ppm	≤ 1 ppm	≤ 400 ppm	≤ 0,1 ppm

Una vez tenidas en cuenta todas las consideraciones descritas anteriormente para la realización de la prueba en el motor, se emplea el ciclo de ensayo correspondiente al tipo de motor del que se trate (descritos y definidos en párrafos anteriores). Para ello, el motor se pone en marcha siguiendo la secuencia del ciclo de ensayo que se esté empleando (tipo E2, E3, D2 y C1), haciéndose funcionar en cada uno de los regímenes especificados en la secuencia de prueba. Tras esperar el tiempo necesario de estabilización, se comprueba que el régimen especificado no difiera del ± 1 % del régimen nominal del motor. Posteriormente, se procede a la medición de gases de escape en cada modo de ensayo. Para ello, durante el tiempo que duren las mediciones, el par

especificado se debe mantener con un valor medio máximo del $\pm 2\%$ con respecto al par nominal del motor.

El conjunto de resultados medidos por los equipos analizadores es registrado mediante un sistema de adquisición de datos. Este sistema está integrado en el propio equipo, pero también se hace uso de una computadora para facilitar el proceso mediante un software específico suministrado por el fabricante. En algunos casos el equipo puede disponer de un sistema de impresión en papel continuo que permita el registro de todos los datos analizados, como es el caso del analizador de gases utilizado. El periodo de tiempo empleado para la medición y durante el registro de datos ha sido igual o superior a 10 minutos para garantizar una muestra representativa. En cada periodo de medición, los datos se han registrado en el sistema de adquisición de datos con una frecuencia de cinco minutos. Los datos almacenados de NO_x , SO_x y CO se han registrado en ppm redondeando al valor entero más próximo, mientras que los correspondientes a CO_2 y O_2 se han registrado en porcentaje con dos decimales como mínimo. Los parámetros del motor tales como el régimen, la carga y el caudal de gases de escape, así como el resto de parámetros principales definidos anteriormente, se miden y se registran para cada modo de funcionamiento dentro del ciclo de ensayo correspondiente. Esta operación de toma de datos se realiza una vez que el motor se encuentra estabilizado después de cada cambio de régimen definido por el ciclo de ensayo aplicado.

Una vez finalizado el ciclo de ensayo, se comprueba de nuevo la calibración del equipo, así como el valor cero de cada uno de los parámetros de medición. Para ello, se vuelve a emplear el uso del gas patrón de calibración y gas de gran pureza (gas cero) utilizados con anterioridad al inicio de la medición. Para que las mediciones tomadas durante el ensayo puedan considerarse válidas, la resolución MEPC.177(58) establece que la diferencia máxima admisible entre los valores obtenidos antes y después del ensayo con estos gases, debe ser inferior al 2 %.

4.3.2. CÁLCULO DE LAS EMISIONES GASEOSAS

Para realizar el cálculo de las emisiones gaseosas, se tienen en cuenta al menos los últimos 60 segundos de cada una de las modalidades correspondientes a los diferentes regímenes empleados dentro el ciclo de ensayo, determinando el valor medio de los diferentes valores registrados en esos periodos de tiempo.

Para el cálculo del caudal de los gases de escape se emplea uno de los tres métodos que ya han sido descritos anteriormente, en este caso particular mediante la medición del flujo de combustible y el método de balance de carbono.

Algunos analizadores de gases que utilizan celdas electroquímicas necesitan secar los gases de escape antes de su medición para determinar las concentraciones de gas contaminante. Por este motivo, dependiendo de si el analizador necesita realizar este secado o no, podremos obtener mediciones en base seca o en base húmeda. En una medición de gas en base seca, la concentración de cada contaminante se encuentra expresada en base a un volumen total de gases de escape secos, mientras que en base húmeda incluirá además el volumen de vapor de agua. Si el analizador de gases no requiere secar el gas de combustión para realizar la medición, la concentración se expresa considerando el vapor de agua en el volumen total de gases, es decir, en base húmeda.

Las concentraciones de gases contaminantes se expresan en concentraciones porcentuales en base seca o húmeda (% volumen/volumen):

$$C_x = \frac{V_c}{V_t} * 100$$

16

Donde:

C_x : concentración de gas contaminante en los gases de escape (%)

V_c : volumen del gas contaminante (m^3);

V_t : volumen total de gases (m^3).

En el caso de que el valor correspondiente a la concentración de gases sea un muy reducido, la manera correcta de expresarla será en partes por millón de volumen de gases contaminantes en relación al volumen total de gases húmedos o secos (ppm volumen/volumen):

$$C_x = \frac{V_c}{V_t} * 10^6$$

17

Donde:

C_x : concentración de gas contaminante en los gases de escape (ppm)

V_c : volumen del gas contaminante (m³);

V_t : volumen total de gases en base seca o húmeda (m³).

Los resultados de las mediciones obtenidas en un medio seco se convierten a resultados en base húmeda relacionando estos valores con un factor de corrección, para ello se emplea ecuación que se expresa a continuación:

$$C_w = K_w * C_d$$

18

Donde:

C_w : concentración del gas de escape húmedo (% o ppm, volumen/volumen);

C_d : concentración del gas de escape seco (% o ppm, volumen/volumen);

K_w : factor de corrección de gases secos a húmedos (m³).

Para el cálculo del factor de corrección en una combustión completa (K_{wc}) necesario para la conversión de los gases de escape medidos en base seca y poder expresarlos en base húmeda, es necesario emplear cualquiera de las dos siguientes ecuaciones, sea cual sea el método elegido de los descritos anteriormente para el cálculo del flujo de los gases de escape.

$$K_{wc1} = \left(1 - \frac{1,2442 * H_a + 111,19 * W_H * \frac{\dot{q}_{mf}}{\dot{q}_{mad}}}{773,4 + 1,2442 * H_a + \frac{\dot{q}_{mf}}{\dot{q}_{mad}} * f_{fw} * 1.000} \right) * 1,008$$

19

o

$$K_{wc2} = \frac{\left(1 - \frac{1,2442 * H_a + 111,19 * W_H * \frac{\dot{q}_{mf}}{\dot{q}_{mad}}}{773,4 + 1,2442 * H_a + \frac{\dot{q}_{mf}}{\dot{q}_{mad}} * f_{fw} * 1.000} \right)}{\left(1 - \frac{p_r}{p_b} \right)}$$

20

Donde:

K_{wc} : Factor de corrección de base seca a húmeda de los gases de escape para combustión completa;

H_a : Humedad del aire de admisión en gramos de agua por kilogramos de aire seco (g/kg);

W_H : contenido de H en el combustible (% masa/masa);

\dot{q}_{mf} : caudal másico de combustible (kg/h);

\dot{q}_{mad} : caudal másico de aire de admisión en base seca (kg/h);

f_{fw} : factor específico del combustible (kg/h);

En este caso el factor específico del combustible se determina de la siguiente manera teniendo en cuenta los volúmenes adicionales de los diferentes compuestos del combustible:

$$f_{fw} = 0,55594 * W_H + 0,0080021 * W_N + 0,0070046 * W_O$$

21

Donde:

f_{fw} : factor específico del combustible;

W_H : contenido de H en el combustible (% masa/masa);

W_N : contenido de N en el combustible (% masa/masa);

W_O : contenido de O en el combustible (% masa/masa).

Para el cálculo de la humedad del aire de admisión, se mide previamente la temperatura del propio aire y la presión barométrica total. Con estos datos se procede a determinar la presión de saturación de vapor del aire de admisión (Pa) mediante la ecuación 9 expresada ya anteriormente en la metodología de este estudio.

Una vez conocido el valor de Pa, se procede al cálculo de la humedad absoluta del aire de admisión (Ha):

$$H_a = \frac{6,22 * P_a * R_a}{P_b - 0,01 * P_a * R_a}$$

22

Donde:

H_a : humedad del aire en gramos de H₂O por kilogramo de aire seco (g/kg);

P_a : presión de saturación del aire (kPa);

P_b : presión barométrica (kPa);

R_a : humedad relativa del aire (%).

En el caso de una combustión incompleta, suponiendo que la medición no se haya efectuado en fase húmeda, para el cálculo del factor de conversión de gases secos a húmedos se deben emplear ecuaciones diferentes a las anteriores. Se considera que la combustión es incompleta cuando el valor de concentración de monóxido de carbono supere las 100 ppm, o cuando la concentración de hidrocarburos sin quemar sea superior a esta misma cifra. Igual que en el caso anterior, primero se calculará el valor correspondiente al flujo de los gases de escape por cualquiera de los métodos anteriormente explicados, dato necesario para la determinación de este factor de corrección. Para determinar el valor de corrección de gases secos a húmedos para combustión incompleta (K_{wi}) se emplea la ecuación definida a continuación:

$$k_i = \frac{1}{1 + \alpha * 0,005 * [C_{CO_2} + C_{COd}] - 0,001 * C_{H_2d} + k_{w2} - \frac{P_r}{P_b}}$$

23

Donde:

k_{wi} : Factor de corrección de base seca a húmeda de los gases de escape para combustión incompleta;

α : relación molar hidrógeno-carbono;

C_{CO_2d} : concentración de CO₂ en el gas de escape en base seca (%);

C_{COd} : concentración de CO en el gas de escape en base seca (%);

C_{H_2d} : concentración de H molecular en el gas de escape en base seca (%)

k_{w2} : factor de humedad del aire de admisión;

P_r : presión del agua después del refrigerante (kPa);

P_{rb} : presión barométrica (kPa);

Uno de los valores necesarios para el cálculo de k_{wi} es la relación molar de hidrógeno-carbono, para su determinación se emplea la siguiente ecuación:

$$\alpha = 11,9164 * \frac{W_H}{W_C}$$

24

Donde:

α : relación molar hidrógeno-carbono;

W_H : contenido de H en el combustible (% masa/masa);

W_C : contenido de C en el combustible (% masa/masa);

Por otro lado, también es necesario determinar el factor C_{H_2d} mediante la siguiente expresión:

$$C_{H_2d} = \frac{0,5 * \alpha * C_{COd} * (C_{COd} + C_{CO_2d})}{C_{COd} + 3 * C_{CO_2d}}$$

25

Donde:

C_{H_2d} : concentración de H molecular en el gas de escape en base seca (ppm)

C_{CO_2d} : concentración de CO₂ en el gas de escape en base seca (% volumen);

C_{COd} : concentración de CO en el gas de escape en base seca (ppm);

Finalmente, para conocer el factor de humedad del aire de admisión se hace uso de la siguiente expresión:

$$k_{w2} = \frac{1,608 * H_a}{1.000 + (1,608 * H_a)}$$

26

Donde:

k_{w2} : factor de humedad del aire de admisión;

H_a : humedad del aire gramos de H₂O por kilogramo de aire seco (g/kg);

Para el caso concreto de los óxidos de nitrógeno, tal y como ya se ha explicado en el presente estudio de tesis, la temperatura y la humedad contenida en el aire de admisión

influyen en la formación de NO_x. Por este motivo, es necesario medir y registrar estos parámetros del aire ambiente y tenerlos en cuenta de cara a la corrección de la humedad. Para ello, se multiplica la concentración NO_x medida por su factor de corrección. La siguiente ecuación 27 es la empleada para el cálculo de este factor de corrección de humedad.

$$k_h = \frac{1}{1 - 0,0182 * (H_a - 10,71) + 0,0045 * (T_a - 298)}$$

27

Donde:

k_h : factor de corrección de humedad para NO_x;

H_a : humedad del aire en gramos de H₂O por kilogramo de aire seco (g/kg);

T_a : Temperatura del aire ambiente a la entrada del motor (K).

En este estudio de investigación, se ha tenido en cuenta que la condensación que pueda tener lugar en los enfriadores del aire de carga, antes de ser introducida en la cámara de combustión, puede influir en la humedad del aire de admisión. Por tanto, se ha empleado la siguiente ecuación para el cálculo del factor de corrección de la humedad de los NO_x:

$$k_h = \frac{1}{1 - 0,012 * (H_a - 10,71) - 0,00275 * (T_a - 298) + 0,00285 * (T_{ac} - T_{Ref})}$$

28

Donde:

k_h : factor de corrección de humedad para NO_x con enfriador de aire instalado;

H_a : humedad del aire en gramos de H₂O por kilogramo de aire seco (g/kg);

T_a : temperatura del aire ambiente a la entrada del motor (K);

T_{ac} : temperatura del aire de carga (K);

T_{ref} : temperatura de referencia del aire de carga cuando es refrigerado por agua de mar a 25 °C especificado por el fabricante del motor (K).

Una vez corregidas las concentraciones de los contaminantes, se procede a explicar el cálculo empleado para determinar los caudales máxicos de emisión de los diferentes componentes de los gases de escape. Para ello se utiliza la concentración de

cada compuesto gaseoso medida conforme al procedimiento explicado anteriormente, conociendo el caudal másico de los gases de escape calculado por cualquiera de los tres métodos especificados y a través del coeficiente “u” del compuesto que corresponda. Este coeficiente consiste en la relación existente entre la densidad del componente gaseoso del que se trate y la propia densidad del conjunto de los gases de escape. Para su determinación existen valores tabulados que se pueden consultar en función del componente de gases de escape del que se trate y del tipo de combustible que se esté empleando. Los valores del coeficiente “u” se encuentran tabulados para cada tipo de combustible en base a las propiedades ideales de los gases. En la siguiente tabla se exponen los parámetros utilizados en los motores diésel de encendido por compresión empleando combustible líquido derivado del petróleo.

TABLA 18. COEFICIENTE “U” PARA COMPUESTOS GASEOSOS PARA COMBUSTIBLE LÍQUIDO
(MEPC.251(66), 2014)

Compuesto gaseoso	NO _x	CO	HC	CO ₂	O ₂	SO _x
Coeficiente “ <i>u_{gas}</i> ”	0,001586	0,000966	0,000479	0,001517	0,001103	0,002208

En base a estos coeficientes se calcula el caudal másico de emisión de cada uno de los compuestos gaseosos específicos a través de las siguientes ecuaciones, empleando una de ellas específicamente para los NO_x (ecuación 29), y la otra para el resto de compuestos gaseosos (ecuación 30).

$$\dot{q}_{NO_x} = u_{gas} * C_{gas} * \dot{q}_{mew} * k_h$$

29

$$\dot{q}_{mgas} = u_{gas} * C_{gas} * \dot{q}_{mew}$$

30

Donde:

\dot{q}_{NO_x} : Caudal másico de emisión de NO_x (g/h);

\dot{q}_{mgas} : Caudal másico de emisión del resto de compuestos gaseosos (g/h);

u_{gas} : Coeficiente u (relación entre la densidad del compuesto gaseoso y la de los gases de escape);

C_{gas} : Concentración del componente gaseoso en los gases de escape medida en base húmeda (ppm);

\dot{q}_{mew} : Caudal másico de gases de escape en base húmeda (kg/h);

k_h : Factor de corrección de la humedad de los NO_x.

Finalmente, para el cálculo de las emisiones específicas (g/kWh) de cada uno de los compuestos individuales analizados, a partir del caudal másico de los mismos y la potencia total medida en el motor para cada una de las modalidades de ciclo de ensayo, se emplean las ecuaciones que se exponen a continuación relacionando los parámetros citados:

$$E_{gas} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (q_{mgasi} * W_{Fi})}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i * W_{Fi})}$$

31

Donde:

E_{gas} : Emisión específica del compuesto gaseoso (g/kWh);

q_{mgasi} : Caudal másico de emisión del compuesto gaseoso para cada modo (g/h);

P_i : Potencia del motor para cada modo de ensayo (kW);

W_{Fi} : Factor de ponderación para cada modo de ensayo;

n : Número de modalidades del ciclo de ensayo que aplique.

Para la anterior ecuación, los valores de los factores de ponderación (W_{Fi}) se obtienen en función del ciclo de ensayo empleado para cada una de sus modalidades “n” correspondientes. Estos valores han sido anteriormente expuestos para cada ciclo de ensayo en el apartado 4.2 de esta metodología.

4.4. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN SIMPLIFICADO

En este estudio se ha empleado de forma específica el método simplificado de medición a bordo. Para ello se ha tenido en cuenta el año de construcción de los motores objeto de estudio (anteriores al 1 de enero del año 2000), así como toda posible modificación que haya podido sufrir el motor y que pueda hacer que sus emisiones superen los límites que establecen las normas de emisión aplicables estipuladas en la regla 13 del del Anexo VI de MARPOL.

Por otro lado, también se han analizado las posibles sustituciones o modificaciones de elementos originales, especificadas en el expediente técnico del motor,

por otros diferentes que pudieran alterar las emisiones producidas. Por ejemplo, modificaciones del eje de camones, de la cámara de combustión, del sistema de aire de admisión, del sistema de inyección, etc.

Antes de realizar las mediciones en los motores estudiados, se han llevado a cabo las comprobaciones oportunas sobre todos aquellos elementos, reglajes realizados al motor y parámetros de funcionamiento que puedan influir sobre las emisiones producidas, así como las características propias del motor, como su régimen y potencia nominal.

Se ha constatado que los motores estudiados, con anterioridad a su instalación a bordo, no fueron sometidos a ajustes para cumplir con el límite de emisiones establecidos de NO_x . Tampoco fueron sometidos a certificación previa en banco de pruebas referente a prevención de emisiones contaminantes (Certificado EIAPP). Llegados a este punto, es necesario aclarar que los motores sometidos a estudio no poseen ningún tipo de dispositivo reductor de emisiones de NO_x ni de SO_x .

De acuerdo a lo comentado anteriormente, hay tres niveles de emisiones de NO_x permitidos para los motores diésel marinos, según la fecha de construcción del buque o la fecha de instalación del motor (gráfico 1). Los niveles de emisión se denominan Tier I (aplicable a partir del 1 de enero de 2000), Tier II (aplicable a partir del 1 de enero de 2011) y Tier III (aplicable a partir del 1 de enero de 2016, solo para zonas ECA).

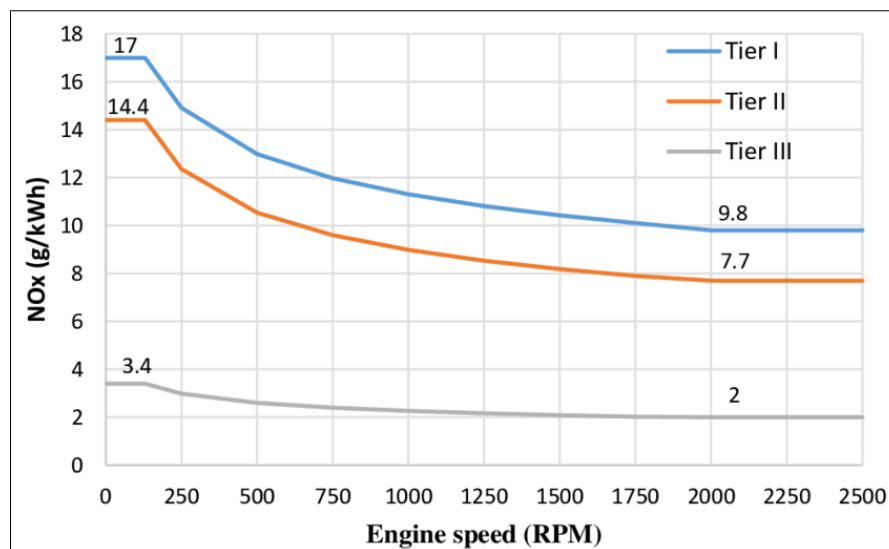


GRÁFICO 1. LÍMITES DE EMISIÓN NO_x (OMI)

Referente a los límites de emisión de los SO_x, el Anexo VI de MARPOL establece los siguientes límites de contenido de azufre en combustible expresados en concentraciones de porcentaje (masa/masa). Estos límites de azufre en combustible entran en vigor de acuerdo a diferentes fechas establecidas y en función de la zona por donde opere el buque, distinguiendo entre zonas globales o zonas de control de emisiones SECAs.

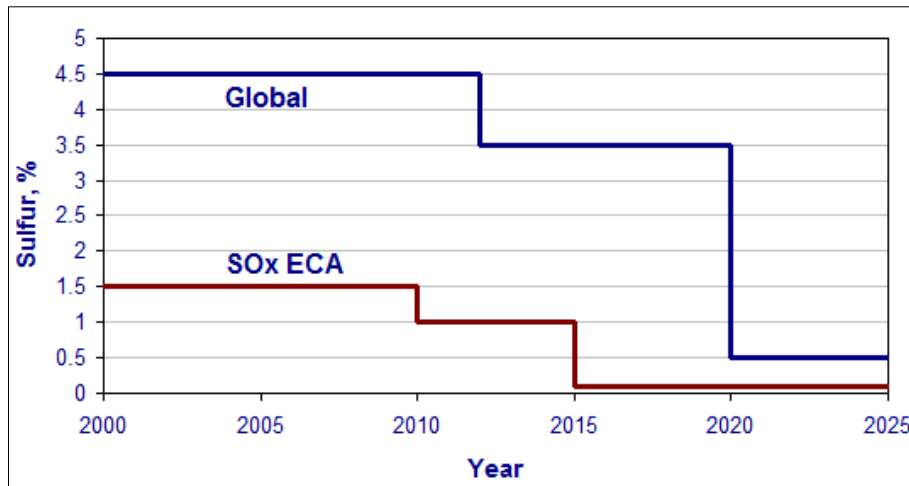


GRÁFICO 2. LÍMITES DE EMISIÓN DE SO_x DENTRO Y FUERA DE ZONAS ECA (IMO)

En base a lo anterior, para obtener datos fiables en las mediciones de los diferentes contaminantes, se han realizado las correcciones oportunas a partir de la temperatura y humedad del aire ambiente. Estas correcciones son de vital importancia sobre todo cuando el buque navega en climas fríos o cálidos y con una mayor o menor humedad que repercute directamente sobre las condiciones ambientales del aire. Tal y como ya se ha explicado anteriormente, las emisiones de NO_x dependen de las condiciones ambientales del aire, por tanto, se ha empleado la ecuación 28 anteriormente expuesta para calcular el coeficiente (k_h) necesario para la corrección de humedad de los NO_x.

El ciclo de ensayo empleado para los motores principales estudiados es el denominado “E2”, de acuerdo con la resolución MEPC.177(58) y el Código Técnico, es el utilizado en los motores principales que trabajan a un régimen constante. Los parámetros de ensayo, tales como el número de modalidades empleadas “n” para los diferentes porcentajes de potencia y sus factores de ponderación, se pueden consultar en la tabla 13 “ciclo de ensayo para motores principales con un régimen constante” descrita

anteriormente en la metodología de este estudio. En el caso de los motores auxiliares, el ciclo de ensayo empleado para los motores estudiados ha sido el “D2” correspondiente a la tabla 15 “ciclo de ensayo para motores auxiliares con un régimen constante” anteriormente expuesta al inicio de la metodología, donde también podemos observar sus valores correspondientes.

Este procedimiento simplificado establece que, cuando no sea posible hacer que el motor trabaje en las mismas condiciones teóricas que marca cada punto de ensayo, se permita realizar el mismo lo más próximo a lo que establece el ciclo de ensayo preestablecido. En este estudio no se trata de realizar ensayos concretos, puesto que lo que interesa es la potencia real desarrollada por los motores con independencia de su factor de carga, de tal manera, que al final se han obtenido los g/kWh correspondientes a cada valor de potencia entregada por cada motor. Esto es debido a que los valores medidos a bordo pueden ser no comparables a los obtenidos en el ciclo de ensayo realizado en banco de pruebas, si los modos de operación donde se han obtenido esas mediciones no son los mismos o muy próximos.

De acuerdo con el procedimiento simplificado de medición a bordo, ha sido necesario determinar parámetros como el par y el régimen de giro para la obtención de la potencia entregada por el motor (necesaria para el cálculo de las emisiones específicas), algo que puede ser relativamente factible en un banco de pruebas mediante el uso de un freno hidráulico y que se complica enormemente cuando el motor se encuentra ya instalado a bordo. Por ello, el procedimiento simplificado del Código Técnico permite el cálculo de la potencia mediante el empleo de otros métodos aprobados. En este caso, para el cálculo de la potencia en los motores principales, se han empleado tres métodos diferentes con el objeto de estudiar las posibles desviaciones entre ellos, definiendo así el parámetro que mejor se ajuste a la realidad:

- En primer lugar, para el cálculo de la potencia, se ha empleado el uso de galgas extensiométricas instaladas en el eje principal del buque que une el motor con la hélice. Básicamente, la galga está formada por un conjunto de conductores con una resistencia eléctrica variable. La deformación sufrida por el eje, debida al par generado, es medida por la galga cuando ésta también se deforma al variar su resistencia eléctrica. En definitiva, las galgas convierten las deformaciones

sufridas en variaciones mínimas de resistencia, éstas son captadas mediante un circuito eléctrico a través de la variación del voltaje. El circuito utilizado para ello se denomina puente de Wheatstone, el cual está formado por resistencias cuya disposición permite medir dichas variaciones de voltaje. De esta forma, la señal de voltaje (generalmente en milivoltios) es enviada de forma inalámbrica desde el transmisor, conectado a las galgas y fijado también al eje, hasta un receptor conectado a una computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos. Las variaciones de voltaje son procesadas e interpretadas como variaciones del par motor, a continuación, la potencia es calculada mediante el producto del par motor por la velocidad angular.

- Por otro lado, para el cálculo de la potencia desarrollada por los motores principales se ha realizado un análisis de la carga de los motores, registrando el índice de cremallera de cada cilindro, las revoluciones del turbocompresor y la temperatura de gases de escape para los diferentes puntos de ensayo. De esta forma, se han podido comparar estos valores con los obtenidos en el ensayo previo realizado en banco de pruebas, determinando así la potencia entregada en cada momento del ciclo.
- Además, se ha empleado el modelo de cálculo de potencia instantánea entregada por los motores principales en tiempo real, que será definido en el siguiente apartado (Moreno-Gutiérrez & Durán-Grados, 2021). Este modelo tiene en cuenta variables tan importantes como el calado del buque, condiciones meteorológicas, estado de mantenimiento del casco y la hélice o la eficiencia del sistema de propulsión. Estos datos se han cuantificado de una forma precisa para obtener resultados fiables en el cálculo de la potencia.

En el caso de los motores auxiliares, la potencia se ha obtenido directamente de los cuadros eléctricos de la planta energética del buque. El procedimiento contempla también la posibilidad de calcularla a partir de los datos obtenidos de los medidores de tensión y amperaje, relacionándolos con el rendimiento del generador eléctrico facilitado en los datos técnicos por el fabricante.

Los datos de consumo de combustible se han obtenido mediante las mediciones del flujo realizadas empleando el caudalímetro ultrasónico no intrusivo descrito anteriormente, aunque el procedimiento simplificado también contempla emplear el dato

de consumo del combustible de referencia, obtenido para los diferentes puntos de ensayo en banco de pruebas como posible valor a considerar. En caso de haber tomado como referencia los consumos de combustible registrados durante el ensayo en laboratorio, habría que haber tenido en cuenta la composición del combustible consumido en cada caso, especialmente para el combustible residual, dónde se tendría que haber aplicado una corrección para compensar la diferencia entre los valores de los calores específicos de los dos tipos de combustible empleados.

Además de lo anterior, de acuerdo al método simplificado de medición a bordo se han medido y registrado los parámetros siguientes:

- Humedad absoluta del aire relativa a la cantidad de contenido de agua en el aire de admisión expresado en gramos, frente a la cantidad de aire seco expresado en kilogramos (g/kg);
- El régimen del motor para cada modalidad del ciclo de ensayo (min^{-1});
- El régimen del turbocompresor para cada modalidad del ciclo (min^{-1});
- La presión barométrica en el ambiente de la sala de máquinas (kPa);
- La presión del aire de admisión después del enfriador (kPa);
- La potencia en el eje medida con torsiómetro en cada modalidad del ciclo (kW);
- El caudal de combustible para cada modalidad del ciclo (kg/h);
- La posición o índice de la cremallera de cada cilindro para cada modalidad del ciclo.
- La temperatura ambiente de la sala de máquinas, correspondiéndose con la temperatura del aire de admisión ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura del enfriador del aire de carga a la entrada y a la salida del refrigerante ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura del combustible a la entrada del motor ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura del agua de mar ($^{\circ}\text{C}$).

El flujo másico de gases de escape en base húmeda, el cual incluye el contenido de vapor de agua resultante del proceso de la combustión y del aire de admisión, se ha determinado empleando el tercer método basado en la medición del flujo de combustible y la aplicación del método de balance de carbono nombrado en el apartado 4.3 de la

presente metodología. En este estudio, la ecuación empleada para el cálculo del caudal de gases de escape se ha simplificado de la siguiente manera (Wright, 2009):

$$\text{Flujo másico escape: GEXHW: } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) = \frac{\text{Flujo másico de combustible } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)}{\text{CO}_2 \text{ wet}\%} * 209$$

32

Donde:

$\text{CO}_2 \text{ wet}\%$: Concentración de CO_2 en base húmeda.

Las pautas generales seguidas para la instalación, toma de muestras y medición de las emisiones gaseosas son las prescritas en el punto titulado “toma de muestras” dentro el método de ensayo general descrito en este estudio. Además, la instalación de los equipos a bordo se ha llevado a cabo asegurando que los ensayos efectuados no han interferido en el funcionamiento habitual del motor. Las sondas de los equipos han sido colocadas en los conductos de escape mediante bridas de conexión o fijaciones aisladas en los diferentes puntos de muestreo, tal y como establece el Código Técnico.

El cálculo de las emisiones gaseosas se ha realizado por este método, siguiendo exactamente los pasos especificados en el subapartado denominado “Cálculo de las emisiones gaseosas” del punto titulado “toma de muestras” establecido dentro del método de ensayo general que forma parte de la metodología de esta tesis.

Dado que las emisiones contaminantes pueden sufrir una variación significativa dependiendo del tipo de combustible utilizado. El método de medición simplificada a bordo establece que debe analizarse el combustible utilizado a fin de determinar su composición para definir el contenido de carbono, oxígeno, nitrógeno y azufre principalmente, y cualquier otro componente que pudiera influir en las emisiones de acuerdo a la norma ISO 8217:2017. En el caso particular de este estudio, se ha empleado el análisis del combustible entregado por la empresa suministradora del mismo, además, se ha realizado una segunda comprobación mediante el equipo HORIBA SLFA-6100 del contenido de azufre en combustible debido a la importante influencia directa que tiene sobre las emisiones de SO_x . El combustible empleado en las diferentes fases de navegación para los motores principales es del tipo residual (RO), concretamente se trata

de un IFO-380 con un contenido en azufre por debajo del 0,5 %. En el caso de los motores auxiliares, el combustible consumido es un destilado marino (MDO) con un contenido de azufre inferior al 0,1 %, utilizado durante la estancia en puerto debido a motivos medioambientales. Todos los combustibles empleados cumplen con todos los parámetros de calidad y requisitos que exige la norma ISO 8217:2017.

4.4.1. CÁLCULO DE LA POTENCIA EN TIEMPO REAL MEDIANTE MODELO PROPUESTO

Para determinar la potencia de los motores principales, además de los métodos comentados anteriormente, se ha empleado un modelo de cálculo de potencia en tiempo real denominado SENEM (Ship's Energy Efficiency Model), probado y validado en un relevante estudio realizado en la zona del estrecho de Gibraltar para cuatro buques Ro-Pax, los resultados arrojan diferencias de hasta el 40 % comparado con otros modelos, esto reduce significativamente los niveles de incertidumbre relacionados con ellos (Moreno-Gutiérrez & Durán-Grados, 2021).

Para el citado estudio se tuvieron en cuenta parámetros como la velocidad del buque en tiempo real, el calado durante la navegación, el trimado, la influencia de condiciones meteorológicas como la intensidad de las corrientes, la altura de la ola o el viento, el estado de mantenimiento del casco y de la hélice, así como la eficiencia del sistema de propulsión (mediante información obtenida de las bases de datos e informes del propio buque).

El modelo SENEM ofrece resultados más realistas frente a otros modelos como por ejemplo el modelo STEAM (Ship Traffic Emission Assessment Model) y STEEM (Ship Traffic, Energy, and Environment Model) que se vienen empleando hasta ahora en las dos últimas décadas. Esto es debido a que el modelo SENEM tiene en cuenta más factores que los otros dos modelos mencionados ya que cuantifica todas las variables meteorológicas y factores mencionados en el párrafo anterior. Todos estos factores aumentan el consumo de energía e influyen directamente en la potencia entregada por el motor y deben ser tenidos en cuenta para proporcionar valores más realistas y fiables. La potencia entregada por el motor depende en gran medida del factor de carga determinado en tiempo real, siendo éste el parámetro de mayor importancia y el más complicado de obtener. Por ello, para que el factor de carga sea el correcto en el momento de la medición, las variables de las que depende tienen que ser obtenidas también en tiempo real.

En el modelo STEEM solamente se utiliza la velocidad del buque registrada para calcular la potencia entregada. En este modelo, la eficiencia de la hélice se considera constante, además no se tienen en cuenta ni las condiciones meteorológicas ni la condición de mantenimiento en la que se encuentra la hélice ni el casco, así como tampoco la eficiencia que pueda tener el sistema de propulsión (Wang et al., 2007b). El modelo STEAM, por otro lado, introdujo un coeficiente de seguridad de 0,5 nudos para hacer frente a la incertidumbre de algunos buques, cuando la velocidad transmitida por el sistema AIS superaba su velocidad máxima de diseño registrada en la base de datos de Lloyds (Jalkanen et al., 2009). Además, cuando los datos AIS quedan registrados con un intervalo de tiempo de unos pocos minutos, éstos pueden perder información detallada que puede introducir incertidumbres a la hora de ser utilizados para realizar los cálculos. La resolución temporal de los datos AIS es un factor clave que influye en el cálculo de las emisiones de un buque cuando se utiliza este método basado en la actividad. (Peng et al., 2020).

En relación a lo anteriormente expuesto, la Organización Marítima Internacional propuso un nuevo modelo más completo que surgió a raíz del tercer estudio sobre gases de efecto invernadero. En este modelo se incluyen algunos parámetros adicionales como el calado del buque, el trimado, variación en la eficiencia de la propulsión debido a factores ambientales y el ensuciamiento del casco. Pero, sin embargo, no explica el procedimiento a emplear para el cálculo de los coeficientes de pérdida de velocidad (Smith et al., 2015).

La ecuación 33 que se muestra a continuación, propuesta por el modelo de energía y emisiones de buques SENEM, aplicada en el presente estudio de investigación para los motores principales, es válida para el cálculo de la potencia desarrollada por un motor principal en navegación para cualquier tipo de barco, incluso los propulsados por sistema de chorro de agua (waterjet).

$$P_{tránsito} = \frac{P_{diseño} \left(\frac{t_{trans}}{t_{diseño}} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\left(\frac{V_{tránsito} + \Delta V_{viento\ y\ olas} + \Delta V_{fouling} + \Delta V_{corriente}}{V_{diseño}} \right)^n \right]}{\eta_j}$$

Donde:

$P_{tr\acute{a}nsito}$: Potencia actual desarrollada en navegaci3n (kW);

$P_{dise\~{n}o}$: Potencia de dise\~{n}o al 100 % MCR (kW);

t_{trans} : Calado actual del buque en navegaci3n (m);

$t_{dise\~{n}o}$: Calado de dise\~{n}o del buque a m\`{a}xima carga;

$V_{tr\acute{a}nsito}$: Velocidad actual del buque (m/s);

$V_{dise\~{n}o}$: Velocidad del buque al 100 % MCR (m/s);

η_j : Eficiencia del sistema de propulsi3n;

n : Exponente que indica la relaci3n entre la potencia y la velocidad del barco;

$\Delta V_{viento\ y\ olas}$: P\`{e}rdida de velocidad debido al viento y las olas;

$\Delta V_{fouling}$: Incremento de la resistencia de fricci3n del casco debido al ensuciamiento;

$\Delta V_{corriente}$: Diferencia entre la velocidad en la superficie y la velocidad bajo el mar.

Cabe aclarar, que cuando el buque se encuentra propulsado por h\`{e}lice, como es el caso de estudio, la eficiencia del sistema de propulsi3n (η_j) es constante e igual a 1.

En cuanto al exponente que relaciona la potencia y la velocidad del barco (n) normalmente es definido en el resto de modelos anteriores como una relaci3n c\`{u}bica para cualquier tipo de buque. Pero en otros estudios, como el realizado por MAN (MAN Diesel and Turbo, 2012), se establecen diferentes valores para este par\`{a}metro, afin\`{a}ndolo mucho m\`{a}s seg\`{u}n el tipo, tama\~{n}o y sistema de propulsi3n del buque. De esta manera se estima dicho exponente:

- Para buques de gran tama\~{n}o y gran velocidad, como por ejemplo buques porta contenedores, se define un exponente $n = 4$.
- Para buques de un tama\~{n}o mediano y una velocidad media, como buques frigor\`{i}ficos o buques de carga rodada, el exponente se determina como $n = 3,5$
- Para buques de baja velocidad, como en el caso de petroleros o graneleros, $n = 3,2$.

Como en este estudio los buques son del tipo Ro-Pax, el valor que se ha seleccionado y que mejor se ajusta en este caso es el del exponente $n = 3,5$.

La resistencia de rozamiento que ofrece el casco debido al ensuciamiento al que está sometido, depende de la superficie del mismo que se encuentra en contacto con el agua. En este caso se ha establecido un aumento de la resistencia de un 2 %, y una pérdida de velocidad de un 1 % como consecuencia de las incrustaciones en la hélice, valores acordes a lo recomendado en el tercer estudio de la OMI sobre los GEI (Smith et al., 2015).

Para el cálculo de la pérdida de velocidad como consecuencia de la resistencia que ofrecen las olas y el viento ($\Delta V_{viento\ y\ olas}$), se ha empleado la ecuación del modelo propuesto por Kwon (2008).

$$\Delta V_{viento\ y\ olas} = V_{diseño} - (C_{\beta} * C_u * C_{form}) * \frac{1}{100\%} * V_{diseño}$$

34

Donde:

$\Delta V_{viento\ y\ olas}$: Pérdida de velocidad debido al viento y las olas;

$V_{diseño}$: Velocidad del buque al 100 % MCR (m/s);

C_{β} : Coeficiente de reducción de la dirección del agente meteorológico;

C_u : Coeficiente de reducción de velocidad;

C_{form} : Coeficiente de forma del buque.

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Los resultados que se desarrollan a continuación están basados en la aplicación de la metodología expuesta en el apartado anterior. Los principales contaminantes analizados han sido los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y material particulado.

Mediante los resultados obtenidos en este trabajo de tesis doctoral, se calculan los factores de emisión (expresados en g/kWh) de cada uno de estos contaminantes basados en medidas reales utilizando los equipos y modelos descritos en la metodología. Las medidas realizadas durante las pruebas efectuadas en ningún caso vienen expresadas en masa por unidad de energía, lo que hace que, para la transformación de unidades, se tengan que aplicar los modelos anteriormente mencionados.

En este sentido, la primera cuestión que se plantea es el cálculo de la potencia, cuya metodología ha sido descrita en el apartado anterior. La segunda sería la de convertir las concentraciones de los contaminantes estudiados en gramos. Concretamente, el oxígeno y el dióxido de carbono se encuentran expresados en tanto por ciento, los óxidos de nitrógeno y azufre, así como el monóxido de carbono vienen expresados en ppm y finalmente, las partículas están expresadas directamente en g/m^3 .

Las pruebas han sido realizadas durante diez días en dos barcos diferentes. En uno el estudio se ha desarrollado sobre los motores principales y en el otro sobre los motores auxiliares. Las medidas de las emisiones contaminantes se han registrado cada cinco minutos y los resultados reflejan los valores medios de los datos adquiridos cada día. Para la obtención de estos valores medios se han realizado un total de 720 registros para los motores principales y más de 500 para los motores auxiliares, además de todos los parámetros operacionales necesarios en simultáneo para realizar los cálculos correspondientes.

Tras los resultados obtenidos sobre la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera y dado que no todos vienen expresados en la misma unidad de medida, tal y como ya se ha comentado anteriormente, es necesario aplicar los distintos procedimientos definidos en el apartado metodología, para convertir las unidades definidas por los diferentes equipos de medidas a las unidades correctas. Dependiendo de la unidad a convertir, habrá que emplear el método adecuado. Concretamente, existen contaminantes que vienen expresados en tanto por ciento, otros en ppm y otro en g/m^3 .

Los datos obtenidos en la medición de potencias se reflejan en la tabla 19, que muestra los resultados para los tres métodos de medida propuestos en kilovatios (kW). El método empleado mediante galgas extensiométricas se encuentra descrito en el apartado metodología y se ha aplicado conforme a lo indicado en ella. Sin embargo, para aplicar el modelo SENEM y el método basado en el análisis de la carga del motor, se han tomado los datos suministrados por el informe diario de los barcos (Noon Report) que se puede encontrar en el Anexo III a modo de ejemplo, así como de los informes relativos a las pruebas de mar (Anexo II) y banco de pruebas (Anexo I). El informe Noon Report proporciona información importante relativa a la posición del buque y otros datos estandarizados relevantes en función de su velocidad y las fuerzas ambientales, incluidas las condiciones climáticas que lo rodean, así como los registros operacionales de mayor interés correspondientes a la planta energética del buque.

Se han efectuado estudios en dos motores principales propulsores de dos tiempos de baja velocidad utilizando combustible residual (RO) y en otros dos motores auxiliares de cuatro tiempos de alta velocidad utilizando combustible diésel marino (MDO).

En el caso de los motores principales, las potencias han sido calculadas a partir de los datos obtenidos tras el empleo de los tres procedimientos descritos en el apartado anterior (metodología). En la tabla 19 se expresan los resultados arrojados por cada uno de los métodos empleados, así como los valores finalmente utilizados en los cálculos en este estudio. Dichos valores aplicados se corresponden con los resultados obtenidos mediante el método de “análisis de la carga en tiempo real” de los motores principales, por ser los datos más representativos de los valores medios de las tres metodologías. En este sentido, cabe mencionar que las diferencias registradas entre el método de análisis de la carga en tiempo real con respecto a los otros dos métodos, no han supuesto diferencias superiores al 5 %, corroborando la validez del modelo empleado. Las potencias de este método aplicado finalmente, fueron obtenidas a través de la toma de parámetros operacionales del motor durante las pruebas realizadas a bordo (índice de cremallera, revoluciones del turbocompresor y temperatura de gases de escape principalmente) y contrastados con los valores obtenidos durante los ensayos realizados en banco de pruebas (Anexo 3). En cuanto a las potencias entregadas por los motores auxiliares, éstas han sido tomadas directamente de los cuadros eléctricos de los mismos.

TABLA 19. POTENCIAS OBTENIDAS PARA MOTORES PRINCIPALES

Día	Motor	Métodos aplicados			Valores Aplicados (kW)
		Galgas Extensiométricas (kW)	Análisis de la carga (kW)	Modelo SENEM (kW)	
1	Babor	4.844	5.015	5.251	5.015
	Estribor	3.785	3.906	4.093	3.906
2	Babor	3.830	3.957	4.151	3.957
	Estribor	5.092	5.310	5.570	5.310
3	Babor	4.056	4.261	4.393	4.261
	Estribor	4.001	4.125	4.278	4.125
4	Babor	4.026	4.159	4.313	4.159
	Estribor	5.046	5.300	5.464	5.300
5	Babor	4.054	4.241	4.377	4.241
	Estribor	3.963	4.115	4.296	4.115
6	Babor	4.610	4.748	4.914	4.748
	Estribor	5.139	5.320	5.480	5.320
7	Babor	3.833	3.989	4.169	3.989
	Estribor	5.071	5.315	5.549	5.315
8	Babor	4.399	4.587	4.812	4.587
	Estribor	3.884	4.025	4.158	4.025
9	Babor	4.559	4.744	4.920	4.744
	Estribor	3.260	4.725	4.928	4.725
10	Babor	4.554	4.719	4.946	4.719
	Estribor	3.963	4.128	4.293	4.128

En primer lugar, se procede a presentar los resultados de los dos motores principales de babor y estribor correspondientes al primer buque objeto de estudio y seguidamente se expondrán los correspondientes a los motores auxiliares n.º 1 y 2 del segundo buque estudiado.

En las tablas 20 y 21 se presentan los resultados obtenidos de flujo másico de gases de escape para el motor principal de estribor y babor respectivamente. Se ha empleado la ecuación 32 para determinar el flujo másico de gases de escape en base húmeda (GEXHW) a partir del consumo de combustible (convirtiéndolo previamente a kg/h) y de la concentración de CO₂ medida por el analizador de componentes gaseosos de los motores principales estudiados.

TABLA 20. FLUJO MÁSIICO DE GASES DE ESCAPE (MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR)

Día	Consumo de combustible (l/h)	Potencia (kW)	GEXHW (kg/h)
1	905,66	3.906	36.549
2	1108,70	5.310	50.605
3	973,38	4.125	44.327
4	1235,29	5.300	56.644
5	902,52	4.115	41.385
6	1285,71	5.320	59.367
7	1142,10	5.315	52.010
8	985,66	4.025	45.407
9	1005,60	4.725	45.378
10	989,82	4.128	44.263

TABLA 21. FLUJO MÁSIICO DE GASES DE ESCAPE (MOTOR PRINCIPAL DE BABOR)

Día	Consumo de combustible (l/h)	Potencia (kW)	GEXHW (kg/h)
1	1.236,50	5.015	49.900
2	904,48	3.957	41.284
3	962,26	4.261	43.820
4	928,46	4.159	42.574
5	936,72	4.241	42.953
6	1.128,54	4.748	52.110
7	926,91	3.989	42.211
8	1.005,34	4.587	46.313
9	1.143,24	4.744	51.589
10	1.012,67	4.719	45.285

Seguidamente, se exponen las concentraciones de los diferentes compuestos gaseosos y material particulado medido a bordo, correspondientes a los dos motores

principales (tablas 22 y 23). Respecto a los valores de NO_x, se debe tener en cuenta que los mismos se corresponden con la suma de las concentraciones de NO y NO₂ medidas por el analizador de gases de escape empleado. Todos estos datos son referentes a los valores medios de las mediciones realizadas durante la navegación de cada día de pruebas.

TABLA 22. CONCENTRACIÓN DE EMISIONES MEDIDAS (MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR)

Día	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	SO _x (ppm)	PM ₁₀ (g/m ³)
1	4,82	14,72	1.191	53	85	0,017
2	4,53	15,00	1.258	37	54	0,017
3	4,59	15,01	1.254	44	47	0,016
4	4,56	15,05	1.241	42	51	0,016
5	4,58	15,01	1.237	40	51	0,015
6	4,60	15,01	1.167	41	47	0,018
7	4,49	15,33	1.111	45	48	0,017
8	4,64	14,79	1.083	44	50	0,015
9	4,54	14,93	1.164	51	40	0,014
10	4,61	14,90	1.104	55	37	0,012

TABLA 23. CONCENTRACIÓN DE EMISIONES MEDIDAS (MOTOR PRINCIPAL DE BABOR)

Día	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	SO _x (ppm)	PM ₁₀ (g/m ³)
1	4,92	14,47	1.170	149	65	0,019
2	4,35	15,25	1.096	63	46	0,015
3	4,36	15,27	1.121	57	48	0,016
4	4,33	15,29	1.104	62	45	0,016
5	4,33	15,25	1.102	63	43	0,016
6	4,30	15,32	1.120	52	45	0,017
7	4,36	15,30	1.100	53	44	0,015
8	4,31	15,34	1.125	57	44	0,017
9	4,40	15,24	1.143	41	45	0,016
10	4,44	15,27	1.121	62	42	0,018

Con el cálculo del factor de corrección de la humedad (k_h) y dato del flujo de gases de escape, a partir de la concentración de NO_x medida y mediante el empleo de la ecuación 29, se ha obtenido el caudal másico de emisión de NO_x (\dot{m}_{NO_x}). Posteriormente, mediante del dato de la potencia, se ha determinado el factor de emisión correspondiente a cada día para ambos motores principales (tablas 24 y 25).

Para el cálculo de k_h , factor de corrección necesario debido a la condensación que se produce en el enfriador de aire de barrido, se ha utilizado la ecuación 28. Para ello, previamente ha sido necesario obtener el valor de la humedad absoluta (H_a) a partir de la ecuación 22.

Cabe destacar que la temperatura del agua en el enfriador de aire carga de los motores principales se mantuvo fija durante cada prueba realizada a bordo con un valor medio de 36 °C. Todo ello al objeto de buscar la mayor aproximación posible a los ensayos realizados en banco de pruebas. El resto de parámetros a medir fueron tomados cuando las temperaturas estaban estabilizadas.

TABLA 24. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x (MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración NO _x (ppm)	\dot{m}_{NO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión NO _x (g/kWh)
1	0,962	36.549	1.191	66.456	3.906	17,01
2	0,958	50.605	1.258	96.787	5.310	18,23
3	0,960	44.327	1.254	84.686	4.125	20,53
4	0,949	56.644	1.241	105.868	5.300	19,98
5	0,965	41.385	1.237	78.399	4.115	19,05
6	0,963	59.367	1.167	105.881	5.320	19,90
7	0,958	52.010	1.111	87.850	5.315	16,53
8	0,952	45.407	1.083	74.295	4.025	18,46
9	0,962	45.378	1.164	80.639	4.725	17,07
10	0,958	44.263	1.104	74.294	4.128	18,00

TABLA 25. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x (MOTOR PRINCIPAL DE BABOR)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración NO _x (ppm)	\dot{m}_{NO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión NO _x (g/kWh)
1	0,964	49.900	1.170	89.318	5.015	17,81
2	0,958	41.284	1.096	68.791	3.957	17,39
3	0,957	43.820	1.121	74.605	4.261	17,51
4	0,960	42.574	1.104	71.608	4.159	17,22
5	0,962	42.953	1.102	72.265	4.241	17,04
6	0,963	52.110	1.120	89.195	4.748	18,79
7	0,959	42.211	1.100	70.666	3.989	17,71
8	0,963	46.313	1.125	79.627	4.587	17,36
9	0,964	51.589	1.143	90.210	4.744	19,02
10	0,959	45.285	1.121	77.260	4.719	16,37

En el caso de los óxidos de azufre, a partir de la ecuación 30 y aplicando el coeficiente u_{gas} correspondiente junto con el resto de parámetros de la ecuación ya definidos, se ha calculado el flujo másico de SO_x en g/h (\dot{m}_{SO_x}). Posteriormente, a partir de este valor y mediante el dato de la potencia, se obtiene como resultado el factor de emisión de este contaminante en (g/kWh) para los motores principales de babor y estribor (tablas 26 y 27).

TABLA 26. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE SO_x (MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración SO _x (ppm)	\dot{m}_{SO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión SO _x (g/kWh)
1	0,962	36.549	85	6.599	3.906	1,69
2	0,958	50.605	54	5.780	5.310	1,09
3	0,960	44.327	47	4.416	4.125	1,07
4	0,949	56.644	51	6.053	5.300	1,14
5	0,965	41.385	51	4.497	4.115	1,09
6	0,963	59.367	47	5.933	5.320	1,12
7	0,958	52.010	48	5.281	5.315	0,99
8	0,952	45.407	50	8.017	4.025	1,19
9	0,962	45.378	40	3.855	4.725	0,82
10	0,958	44.263	37	3.464	4.128	0,84

TABLA 27. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE SO_x (MOTOR PRINCIPAL DE BAVOR)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración SO _x (ppm)	\dot{m}_{SO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión SO _x (g/kWh)
1	0,964	49.900	65	6.904	5.015	1,38
2	0,958	41.284	46	4.017	3.957	1,02
3	0,957	43.820	48	4.445	4.261	1,04
4	0,960	42.574	45	4.061	4.159	0,98
5	0,962	42.953	43	3.923	4.241	0,93
6	0,963	52.110	45	4.986	4.748	1,05
7	0,959	42.211	44	3.933	3.989	0,99
8	0,963	46.313	44	4.333	4.587	0,94
9	0,964	51.589	45	4.941	4.744	1,04
10	0,959	45.285	42	4.027	4.719	0,85

En las siguientes tablas 28 y 29 se presentan los valores de los factores de emisión calculados para el material particulado. A partir de las concentraciones de este contaminante en g/m³ (suministradas por el equipo medidor de partículas) y conociendo tanto el flujo másico como la densidad de los gases de escape, se ha calculado el valor del flujo másico en g/h. Finalmente, se ha empleado este último valor para obtener, a través del dato de la potencia, los valores de los factores de emisión para cada día de navegación de este contaminante.

TABLA 28. FACTORES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración PM ₁₀ (m ³ /h)	\dot{m}_{PM} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión PM ₁₀ (g/kWh)
1	0,962	36.549	0,017	480	3.906	0,12
2	0,958	50.605	0,017	667	5.310	0,13
3	0,960	44.327	0,016	543	4.125	0,13
4	0,949	56.644	0,016	720	5.300	0,14
5	0,965	41.385	0,015	495	4.115	0,12
6	0,963	59.367	0,018	820	5.320	0,15
7	0,958	52.010	0,017	670	5.315	0,13
8	0,952	45.407	0,015	540	4.025	0,13
9	0,962	45.378	0,014	498	4.725	0,11
10	0,958	44.263	0,012	410	4.128	0,10

TABLA 29. FACTORES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (MOTOR PRINCIPAL DE BABOR)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración PM ₁₀ (m ³ /h)	\dot{m}_{PM} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión PM ₁₀ (g/kWh)
1	0,964	49.900	0,019	723	5.015	0,14
2	0,958	41.284	0,015	490	3.957	0,12
3	0,957	43.820	0,016	530	4.261	0,12
4	0,960	42.574	0,016	521	4.159	0,13
5	0,962	42.953	0,016	527	4.241	0,12
6	0,965	52.110	0,017	667	4.748	0,14
7	0,959	42.211	0,015	499	3.989	0,13
8	0,963	46.313	0,017	621	4.587	0,14
9	0,964	51.589	0,016	630	4.744	0,13
10	0,959	45.285	0,018	628	4.719	0,13

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para las pruebas realizadas en los motores auxiliares, el procedimiento empleado para el cálculo de los valores de los factores de emisión es exactamente el mismo que el utilizado en los motores principales, con la particularidad de que, en este caso, el buque donde se han realizado las mediciones se encontraba en situación de atraque.

En primer lugar, se presentan los valores de flujo másico de los gases de escape para ambos auxiliares (n.º 1 y 2), valor necesario para el cálculo del caudal másico de cada contaminante, tablas 30 y 31.

TABLA 30. FLUJO MÁSSICO DE GASES DE ESCAPE (MOTOR AUXILIAR N.º 1)

Día	Consumo de combustible (l/h)	Potencia (kW)	GEXHW (kg/h)
1	54,40	210	2.119
2	56,30	230	2.062
3	67,20	300	2.327
4	64,30	290	2.249
5	52,60	150	2.427
6	56,90	230	1.944
7	59,40	250	2.029
8	68,80	300	2.239
9	53,10	150	2.438
10	55,80	220	2.065

TABLA 31. FLUJO MÁSSICO DE GASES DE ESCAPE (MOTOR AUXILIAR N.º 2)

Día	Consumo de combustible (l/h)	Potencia (kW)	GEXHW (kg/h)
1	69,40	300	2279
2	56,30	210	1961
3	54,90	200	2007
4	22,60	100	1885
5	23,30	110	1925
6	54,10	195	2251
7	53,40	190	2348
8	52,80	190	2176
9	69,90	310	2411
10	69,20	300	2401

En segundo lugar, en las tablas 32 y 33, pueden observarse los valores medios de las concentraciones de cada contaminante medidas durante los diez días de pruebas para cada uno de los dos motores auxiliares.

TABLA 32. CONCENTRACIÓN DE EMISIONES MEDIDAS (MOTOR AUXILIAR N.º 1)

Día	CO₂ (%)	O₂ (%)	NO_x (ppm)	CO (ppm)	SO_x (ppm)	PM₁₀ (g/m³)
1	4,56	14,91	968	236	0,00	0,019
2	4,85	14,65	1.068	173	0,00	0,022
3	5,13	14,11	1.126	118	0,00	0,030
4	5,08	14,25	1.116	122	0,00	0,030
5	3,85	15,94	568	324	0,00	0,012
6	5,20	14,11	1.037	128	0,00	0,023
7	5,20	14,17	1.027	125	0,00	0,030
8	5,46	13,84	1.059	110	0,00	0,031
9	3,87	15,93	578	327	0,00	0,011
10	4,80	14,90	989	201	0,00	0,021

TABLA 33. CONCENTRACIÓN DE EMISIONES MEDIDAS (MOTOR AUXILIAR N.º 2)

Día	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	SO _x (ppm)	PM ₁₀ (g/m ³)
1	5,41	13,9	1.050	110	0,00	0,029
2	5,10	14,23	904	227	0,00	0,021
3	4,86	14,52	820	210	0,00	0,018
4	2,13	18,42	520	368	0,00	0,010
5	2,15	18,21	537	365	0,00	0,011
6	4,27	15,33	784	272	0,00	0,016
7	4,04	15,68	700	294	0,00	0,015
8	4,31	15,38	779	277	0,00	0,016
9	5,15	14,18	1.131	118	0,00	0,027
10	5,12	14,25	1.119	122	0,00	0,026

Los valores de los factores de emisión referentes a los óxidos de nitrógeno para los auxiliares n.º 1 y 2 pueden encontrarse en las siguientes tablas 34 y 35 respectivamente.

TABLA 34. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x (MOTOR AUXILIAR N.º 1)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración NO _x (ppm)	\dot{m}_{NO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión NO _x (g/kWh)
1	0,954	2.119	968	3.106	210	14,79
2	0,963	2.062	1.068	3.366	230	14,63
3	0,948	2.327	1.126	3.942	300	13,14
4	0,965	2.249	1.116	3.843	290	13,25
5	0,962	2.427	568	2.105	150	14,03
6	0,955	1.944	1.037	3.055	230	13,28
7	0,952	2.029	1.027	3.148	250	12,59
8	0,963	2.239	1.059	3.624	300	12,08
9	0,949	2.438	578	2.122	150	14,15
10	0,950	2.065	989	3.079	220	14,00

TABLA 35. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x (MOTOR AUXILIAR N.º 2)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración NO _x (ppm)	\dot{m}_{NO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión NO _x (g/kWh)
1	0,965	2.279	1.050	3.665	300	12,22
2	0,951	1.961	904	2.675	210	12,74
3	0,960	2.007	820	2.507	200	12,54
4	0,946	1.885	520	1.472	100	14,72
5	0,945	1.925	537	1.550	110	14,10
6	0,958	2.251	784	2.681	195	13,75
7	0,965	2.348	700	2.518	190	13,25
8	0,952	2.176	779	2.563	190	13,49
9	0,952	2.411	1.131	4.120	310	13,29
10	0,963	2.401	1.119	4.106	300	13,69

Respecto a los óxidos de azufre, teniendo en cuenta que el contenido de azufre en el combustible MDO es prácticamente inexistente (menor al 0,1 %), los valores de los factores de emisión para ambos motores auxiliares son prácticamente nulos (inferiores a 0,01 ppm), tal y como puede comprobarse a continuación en las tablas 36 y 37.

TABLA 36. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE SO_x (MOTOR AUXILIAR N.º 1)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración SO _x (ppm)	\dot{m}_{SO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión SO _x (g/kWh)
1	0,954	2.119	0,00	0,00	210	0,00
2	0,963	2.062	0,00	0,00	230	0,00
3	0,948	2.327	0,00	0,00	300	0,00
4	0,965	2.249	0,00	0,00	290	0,00
5	0,962	2.427	0,00	0,00	150	0,00
6	0,955	1.944	0,00	0,00	230	0,00
7	0,952	2.029	0,00	0,00	250	0,00
8	0,963	2.239	0,00	0,00	300	0,00
9	0,949	2.438	0,00	0,00	150	0,00
10	0,950	2.065	0,00	0,00	220	0,00

TABLA 37. VALORES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE SO_x (MOTOR AUXILIAR N.º 2)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración SO _x (ppm)	\dot{m}_{SO_x} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión SO _x (g/kWh)
1	0,965	2.279	0,00	0,00	300	0,00
2	0,951	1.961	0,00	0,00	210	0,00
3	0,960	2.007	0,00	0,00	200	0,00
4	0,946	1.885	0,00	0,00	100	0,00
5	0,945	1.925	0,00	0,00	110	0,00
6	0,958	2.251	0,00	0,00	195	0,00
7	0,965	2.348	0,00	0,00	190	0,00
8	0,952	2.176	0,00	0,00	190	0,00
9	0,952	2.411	0,00	0,00	310	0,00
10	0,963	2.401	0,00	0,00	300	0,00

Los factores de emisión del material particulado para los dos motores auxiliares estudiados han sido calculados y expuestos en las siguientes tablas 38 y 39.

TABLA 38. FACTORES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (MOTOR AUXILIAR N.º 1)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración PM ₁₀ (m ³ /h)	\dot{m}_{PM} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión PM ₁₀ (g/kWh)
1	0,954	2.119	0,019	32	210	0,15
2	0,963	2.062	0,022	35	230	0,15
3	0,948	2.327	0,030	54	300	0,18
4	0,965	2.249	0,030	52	290	0,18
5	0,962	2.427	0,012	23	150	0,16
6	0,955	1.944	0,023	35	230	0,15
7	0,952	2.029	0,030	48	250	0,19
8	0,963	2.239	0,031	54	300	0,18
9	0,949	2.438	0,011	22	150	0,14
10	0,950	2.065	0,021	33	220	0,15

TABLA 39. FACTORES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (MOTOR AUXILIAR N.º 2)

Día	k_H	GEXHW (kg/h)	Concentración PM ₁₀ (m ³ /h)	\dot{m}_{PM} (g/h)	Potencia (kW)	Factor de emisión PM ₁₀ (g/kWh)
1	0,965	2.279	0,029	56	300	0,19
2	0,951	1.961	0,021	35	210	0,17
3	0,960	2.007	0,018	32	200	0,16
4	0,946	1.885	0,010	17	100	0,17
5	0,945	1.925	0,011	18	110	0,17
6	0,958	2.251	0,016	31	195	0,16
7	0,965	2.348	0,015	30	190	0,16
8	0,952	2.176	0,016	30	190	0,16
9	0,952	2.411	0,027	57	310	0,18
10	0,963	2.401	0,026	53	300	0,18

CAPÍTULO 6

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN

En este capítulo se procede a realizar una discusión de los resultados obtenidos en el apartado anterior de esta memoria. Teniendo presente que, en este trabajo de tesis doctoral, se desarrolla un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de los factores de emisión de los diferentes contaminantes procedentes de la combustión de los motores diésel marinos y los valores publicados utilizados actualmente (representados más adelante en la tabla 41).

Se comienza presentando un resumen de los valores medios por día de prueba obtenidos en este estudio para cada uno de los motores (tabla 40). Estos factores de emisión corresponden a los principales contaminantes estudiados que presentan una mayor incertidumbre en la comunidad científica internacional (NO_x , SO_x y PM_{10}).

TABLA 40. RESUMEN DE LOS VALORES DE FACTORES DE EMISIÓN (g/kWh)

Día	Tipo de Motor											
	Principal Estribor			Principal Babor			Auxiliar N.º 1			Auxiliar N.º 2		
	NO _x	SO _x	PM ₁₀	NO _x	SO _x	PM ₁₀	NO _x	SO _x	PM ₁₀	NO _x	SO _x	PM ₁₀
1	17,01	1,69	0,12	17,81	1,38	0,14	14,79	0,00	0,15	12,22	0,00	0,19
2	18,23	1,09	0,13	17,39	1,02	0,12	14,63	0,00	0,15	12,74	0,00	0,17
3	20,53	1,07	0,13	17,51	1,04	0,12	13,14	0,00	0,18	12,54	0,00	0,16
4	19,98	1,14	0,14	17,22	0,98	0,13	13,25	0,00	0,18	14,72	0,00	0,17
5	19,05	1,09	0,12	17,04	0,93	0,12	14,03	0,00	0,16	14,10	0,00	0,17
6	19,90	1,12	0,15	18,79	1,05	0,14	13,28	0,00	0,15	13,75	0,00	0,16
7	16,53	0,99	0,13	17,71	0,99	0,13	12,59	0,00	0,19	13,25	0,00	0,16
8	18,46	1,19	0,13	17,36	0,94	0,14	12,08	0,00	0,18	13,49	0,00	0,16
9	17,07	0,82	0,11	19,02	1,04	0,13	14,15	0,00	0,14	13,29	0,00	0,18
10	18,00	0,84	0,10	16,37	0,85	0,13	14,00	0,00	0,15	13,69	0,00	0,18

Estos resultados están basados en las pruebas realizadas a bordo de dos barcos cuyos tipos de motores corresponden con los que mayoritariamente se instalan en la actualidad: motor diésel de dos tiempos como motores principales y utilizando combustible residual (densidad 0,95 kg/dm³) de bajo contenido de azufre inferior al 0,5 % y motores de cuatro tiempos como auxiliares utilizando combustible diésel marino (densidad 0,85 kg/dm³) con un contenido de azufre inferior al 0,1 %. Ambos tipos de combustibles han sido analizados para verificar el contenido real de azufre mediante el equipo modelo HORIBA SLFA-6100, proporcionando unos valores de 0,49 % para el combustible RO y 0,091 % para el MDO, constatando de esta manera que los valores se encuentran dentro de los límites especificados en su ficha técnica.

Como punto de partida, al objeto de hacer el análisis de los resultados relativos a los factores de emisión, hay que tener en cuenta que los valores más significativos tienen lugar cuando los motores funcionan en un rango de cargas comprendido entre 70 - 90 % fundamentalmente. Los valores de dichos factores son bajos a altas cargas y altos a bajas cargas.

Consecuentemente, los valores de los factores de emisión dejan de ser representativos cuando las medidas se han desarrollado a bajas cargas, aunque en este trabajo de tesis doctoral se han especificado los valores reales para cada carga de los

motores perfectamente definidas dentro de un abanico amplio comprendido entre el 50 - 90 % acorde con las condiciones reales de operación de los barcos estudiados. Todo ello teniendo en cuenta que los motores de estos barcos fueron construidos antes del año 2000. Ese podría ser el motivo por el que algunos valores sean superiores a los exigidos en estos momentos para motores construidos en la actualidad.

En términos generales, se puede observar que los valores de los óxidos de azufre y de partículas cumplen perfectamente con la normativa actual. Ello se debe, entre otras cosas, al bajo contenido de azufre de los combustibles, no ocurriendo lo mismo con los de NO_x si se tuviera en cuenta la normativa correspondiente a buques de nueva construcción (Tier II y Tier III). Esto es debido a que la tecnología y modificaciones que existen hoy día para rebajar los valores emisiones de NO_x no eran aplicables en aquellos momentos. Es por ello que los valores de este contaminante se encuentran más próximos a los límites especificados en el ANEXO VI de MARPOL, y que posteriormente fueron corroborados por la comunidad científica internacional.

La tabla 41 muestra los valores máximos actuales de estos factores de emisión publicados para los distintos contaminantes en función de la zona de navegación, el tipo de motor y el tipo de combustible empleado.

TABLA 41. LÍMITES DE FACTORES DE EMISIÓN POR CONTAMINANTE Y TIPO DE MOTOR (g/kWh)

Contaminante emitido		Baja velocidad		Media velocidad				Alta velocidad	
		Principales		Principales		Auxiliares		Auxiliares	
		MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO
NO _x	Tier 0 (1)	17	18,1	13,2	14	10,9	14,7	13,8	11,6
	Tier I (2)	16	17	12,2	13	9,8	13	12,2	10,4
	Tier II (2)	14,4	15,3	10,5	11,2	7,7	11,2	10,5	8,2
	Tier III (2)	3,4	3,4	2,6	2,6	2,0	2,0	2,6	2,6
SO _x (3)	Fuera de ECA anteriores a 2020	9,76	10,3	10,8	11,3	11,44	11,97	11,44	NA
	Fuera de ECA en 2020 y adelante	1,8	1,89	1,99	2,09	2,11	2,2	2,11	NA
	Dentro de ECA	0,36	0,37	0,39	0,42	0,42	0,44	0,42	NA
PM ₁₀ (4)	Fuera de ECA anteriores a 2020	0,94	1,4	1,025	1,49	1,07	1,54	1,07	NA
	Fuera de ECA en 2020 y adelante	0,3	0,15	0,16	0,18	0,17	0,18	0,17	NA
	Dentro de ECA	0,03	0,08	0,001	0,08	0,003	0,08	0,003	NA

Fuentes: (1) ENTEC (2002), (2) US EPA (2014), (3) U.S. Environmental Protection Agency (2017), (4) US EPA (2007).

Como se puede apreciar, los motores principales y auxiliares en función del año de construcción del buque estudiado (anterior al año 2000), deben cumplir con la normativa de NO_x correspondiente a Tier 0. Para los motores principales (baja velocidad) el límite del factor de emisión se corresponde con 18,1 g/kWh consumiendo combustible residual. En el caso de los motores auxiliares, al ser de alta velocidad, el límite aplicable es de 13,8 g/kWh para combustible destilado.

Respecto a los óxidos de azufre, considerando que las navegaciones se realizan fuera de zonas especiales de control de emisiones, no deben superar los límites de 1,89 y 2,11 g/kWh para principales y auxiliares respectivamente, en función del combustible empleado.

En el caso de las PM₁₀, los límites para buques operando fuera de zonas ECAs con las características de los motores estudiados, se establecen en 0,15 g/kWh para principales y 0,17 g/kWh para auxiliares.

Estos valores, anteriormente mencionados, pueden observarse directamente en la siguiente tabla 42 a modo de resumen.

TABLA 42. RESUMEN DE FACTORES DE EMISIÓN ESTABLECIDOS POR NORMATIVA (g/kWh)

Tipo de motor	Tipo de contaminante		
	NO _x	SO _x	PM ₁₀
Motor Principal Baja velocidad (2 tiempos), RO	18,1	1,89	0,15
Motor Auxiliar Alta velocidad (4 tiempos), MDO	13,8	2,11	0,17

En relación a los valores obtenidos para los NO_x en motores principales, conviene aclarar en un principio, que las pruebas se realizaron para la situación del barco en modo de navegación en crucero, por lo que no se han estudiado las variaciones que sufren estos valores cuando la carga del motor disminuye por debajo del 20 % donde los valores de dichos factores pueden incluso aumentar hasta un 200 %.

Dicho esto y analizando los resultados se puede observar que los valores obtenidos en las pruebas descritas, tanto para los motores principales como los auxiliares, de forma general, entran dentro de los exigidos en la normativa actual y en algunos casos, a pesar

de ser motores construidos cuando todavía no habían sido definidos los límites correspondientes, dichos valores son incluso inferiores.

Prestando atención al gráfico 3, se puede apreciar que el motor principal de babor sobrepasó en 1 g/kWh el factor de emisión límite de NO_x en uno de los días de prueba. Sin embargo, en el motor de estribor se registraron durante algunos días valores superiores a 18,1 g/kWh. Concretamente, el día 3 de prueba se alcanzó un valor medio de 20,53 g/kWh, lo que equivale a una diferencia de 2,4 g/kWh con respecto al valor de emisión fijado por la normativa. Esta diferencia puede ser debida a que el número de horas de funcionamiento del motor de estribor tras la última acción de mantenimiento, fue superior al del motor de babor, tal y como se pudo constatar con los registros del departamento de máquinas del buque.

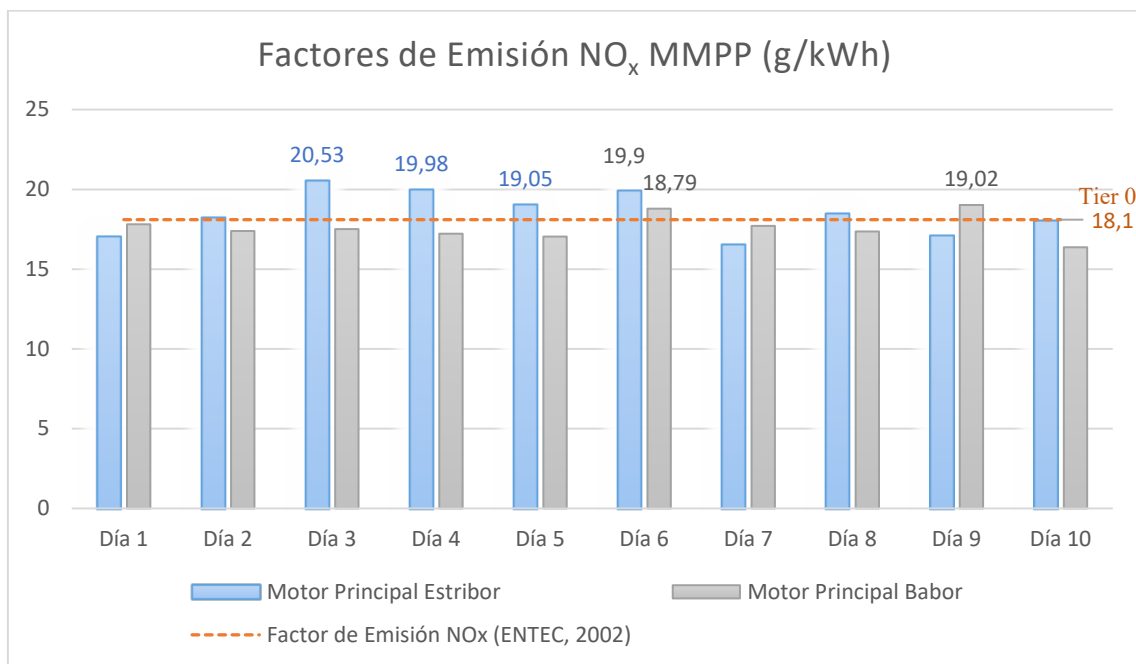


GRÁFICO 3. VALOR LÍMITE DE FACTORES DE EMISIÓN NO_x MOTORES PRINCIPALES

Estas diferencias con el límite máximo serían superiores si las comparamos con los valores límites especificados en el Tercer Estudio de la OMI sobre Gases de Efecto Invernadero fijados en 17,0 y 15,3 g/kWh para Tier I y II respectivamente para motores lentos utilizando combustible residual (IMO, 2014).

En el siguiente gráfico 4 se pueden observar las diferencias de los valores medios diarios relativos a los motores principales con respecto a la normativa actual que limita

las emisiones de NO_x en función del año de fabricación. Hay que recordar que este tipo de motores, por su antigüedad, cuentan con una tecnología y un estado operacional que difiere notablemente de los motores instalados en la actualidad. Es por ello, que se observan diferencias máximas de hasta un 34 % entre los valores de los factores de emisión calculados en este estudio con respecto al límite estipulado por la normativa de NO_x Tier II, recordando que la normativa aplicable en este caso es Tier 0.

Obviamente si los motores trabajaran a cargas más bajas, las emisiones de NO_x en el escape serían superiores.

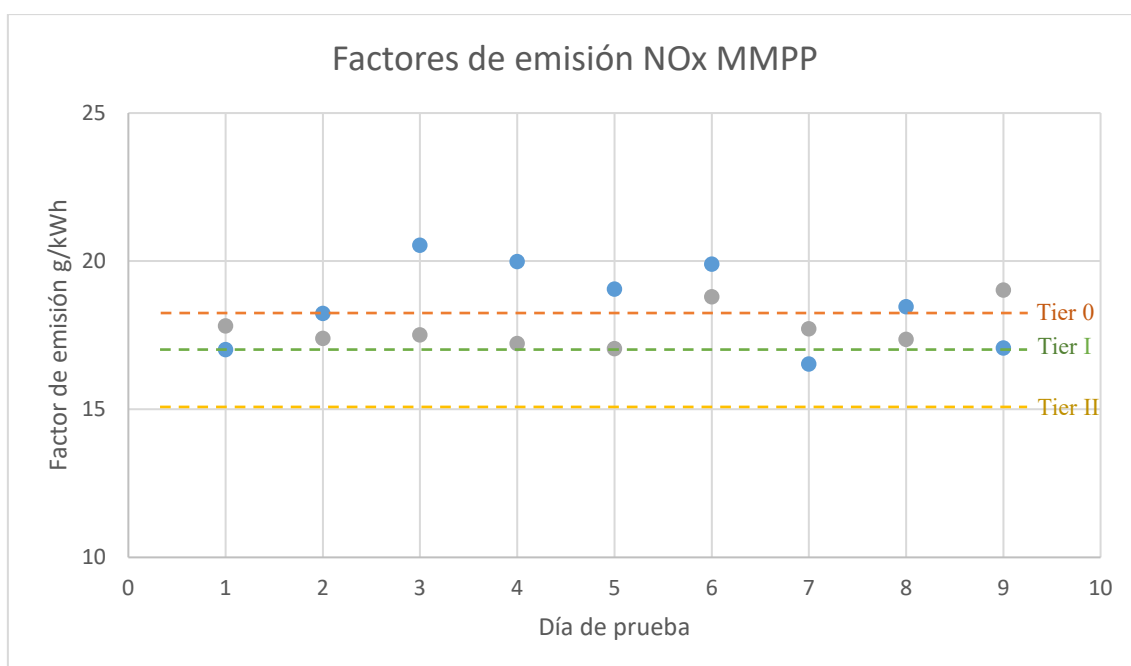


GRÁFICO 4. FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x (MOTORES PRINCIPALES) Y NORMATIVA APLICABLE

En consecuencia, como se desprende de este estudio donde la carga del motor en cuestión tiene una gran influencia en la producción de este contaminante, este enfoque no puede proporcionar una estimación precisa de las emisiones de los motores diésel en operaciones de baja carga.

Es esta, por tanto, una cuestión muy importante a tener en cuenta a la hora de realizar inventarios de emisiones en los que, en la mayoría de los casos, estos valores se consideran constantes, por lo que habría que introducir en esos estudios un factor de corrección debido tanto al funcionamiento en bajas cargas como al estado funcional de los motores. También sería éste un dato a tener en cuenta cuando se certifica por parte del

organismo correspondiente un motor ya instalado a bordo. Además, habría que considerar que el uso de un combustible residual aumenta las emisiones de NO_x un 6.4 % (IMO, 2014).

Este problema se puede acentuar cuando se hacen estudios de emisiones de barcos con potencias instaladas superiores a 10.000 kW, sin olvidar la influencia que estas emisiones tienen en la calidad del aire de zonas costeras y puertos, así como en la salud de la población.

Llegados a este punto, conviene hacer mención a la instalación de reductores catalíticos, los cuales eliminan este problema ya que la cantidad de contaminante de NO_x emitida a la atmósfera, sería constante con independencia de la carga puntual del motor.

En el caso de los motores auxiliares, también se obtuvieron valores acordes a los exigidos por la normativa de NO_x (13,8 g/kWh) superándose el límite en algunos de los días de prueba. Pero en ninguno de los casos, la diferencia fue superior a este límite en más de 1 g/kWh. En el siguiente gráfico 5 se pueden observar algunos de los valores más característicos alcanzados de los factores de emisión, comprobando que el valor medio de los diez días de prueba de cada motor se sitúa por debajo del valor límite de NO_x establecido por la normativa aplicable, siendo estos valores medios de 13,59 g/kWh para el motor auxiliar n.º 1 y de 13,38 g/kWh para el n.º 2.

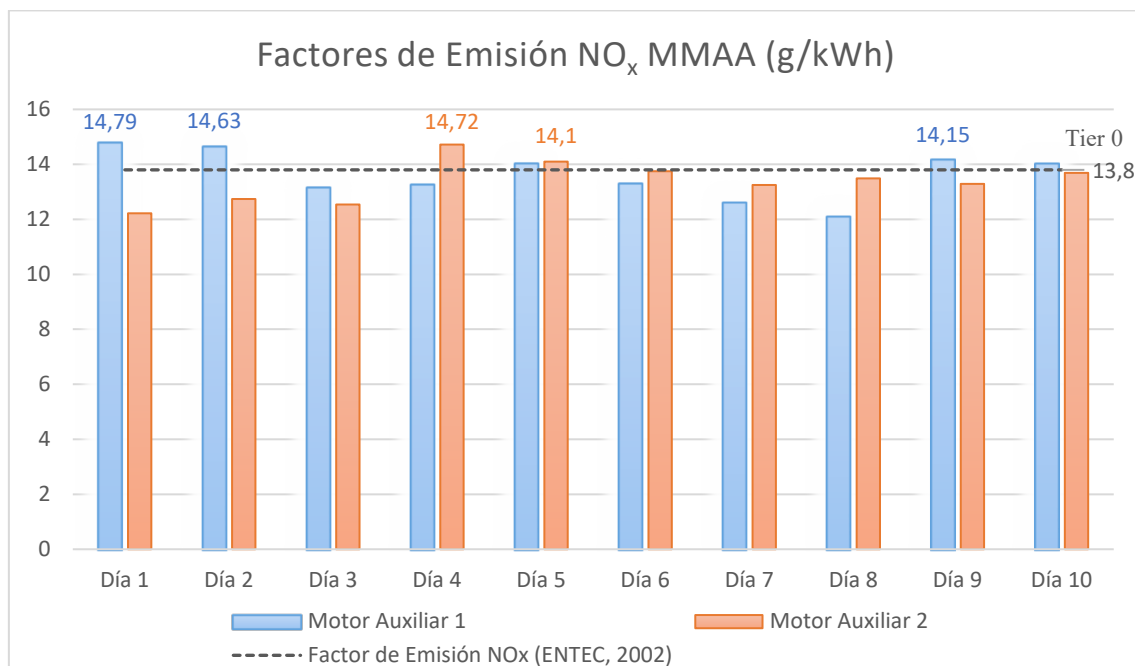


GRÁFICO 5. VALOR LÍMITE DE FACTORES DE EMISIÓN NO_x MOTORES AUXILIARES

El combustible que consumen los auxiliares es diésel marino destilado (MDO) mientras están atracados y residual (RO) cuando están en fase de navegación. En el caso del RO, el valor del poder calorífico y el contenido de carbono es más bajo que los del MDO por lo que la eficiencia de los motores en fase de navegación es más baja que cuando están atracados. Basados en el informe IMO de 2014, el consumo específico de combustible de los motores es del 10 - 15 % más alto cuando el barco está en navegación que los valores obtenidos en banco de pruebas. Consecuentemente los valores reales de los factores de emisión deberían ser más altos que los obtenidos en banco. Esto justificaría por qué los motores auxiliares emiten algo más que lo exigido en normativa.

De hecho, Agrawal et al. (2010) y Khan et al. (2013) publicaron resultados obtenidos de medidas realizadas a bordo en motores principales (Tier 0), concluyendo que los resultados de los valores de los factores de emisión de NO_x llegaron a valores tan altos como 19,60 y 19,77 g/kWh, respectivamente.

En cuanto a los óxidos de azufre, se observa cómo los valores obtenidos en los motores principales (gráfico 6), en términos generales, son significativamente bajos (alrededor del 44 %) comparados con los valores que marca la normativa y los publicados por los diferentes autores que aparecen en la tabla 41. Ello claramente es debido al bajo contenido de azufre del combustible que se ha consumido en estos motores durante el periodo de tiempo estudiado, 0,49 %.

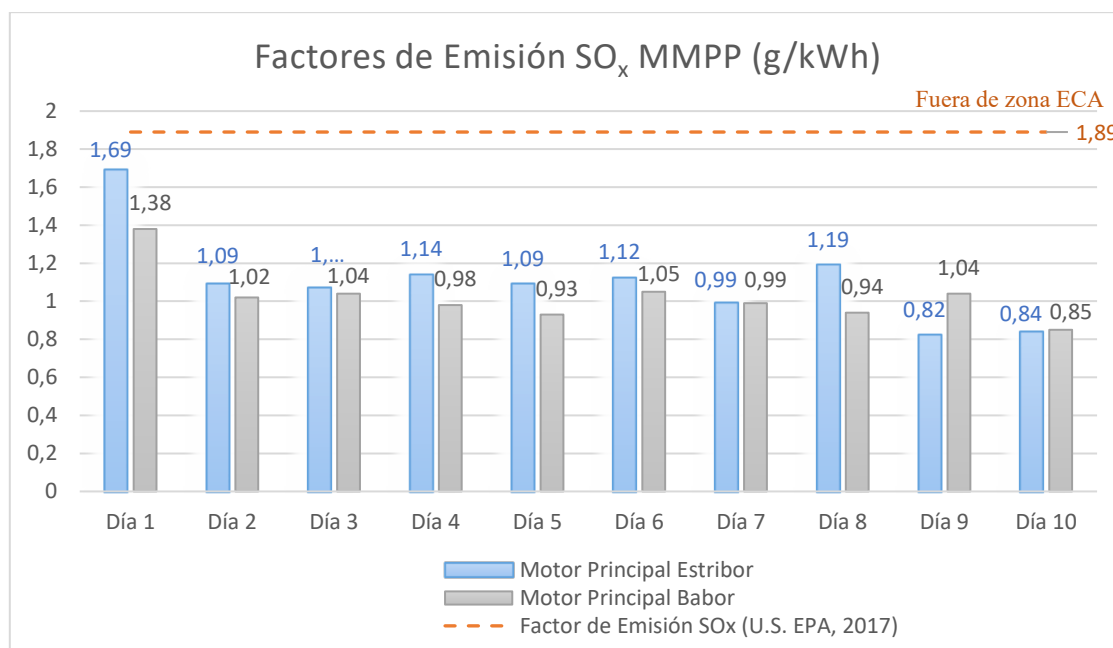


GRÁFICO 6. VALOR LÍMITE DE FACTORES DE EMISIÓN SO, MOTORES PRINCIPALES

En el caso de los motores auxiliares se ha comprobado que se alcanza el valor de cero emisiones de óxidos de azufre. Igualmente, ello es debido a que el combustible tiene un contenido de azufre real de 0,091 %, lo que se traduce en un valor de emisiones casi inapreciable por el equipo analizador de gases de escape. Cabe destacar, que el combustible utilizado durante las pruebas por estos motores auxiliares puede ser empleado incluso en zonas SECAs, esto es debido a que cumplen con el máximo porcentaje de azufre permitido por la normativa actual establecida por la OMI a partir del año 2020. En ellas se establece un factor de emisión de 0,003 g/kWh (tabla 41), siendo éste un dato teórico muy complicado de cuantificar debido a su reducido valor y relacionado con el escaso porcentaje de contenido en azufre que contiene el combustible permitido en estas zonas de control de emisiones.

Respecto al material particulado, los factores de emisión correspondientes a las partículas emitidas por motores principales y auxiliares, se encuentran muy cercanos a los valores asociados a estos tipos de motores conforme a lo que indica la normativa consumiendo un tipo de combustible en concreto.

En el siguiente gráfico 7, puede comprobarse cómo todos los valores de factores de emisión calculados para los motores principales se encuentran por debajo del valor límite asociado a este tipo de motores consumiendo combustible RO (0,15 g/kWh para buques navegando fuera de zonas ECA). El valor medio del factor de emisión correspondiente a las emisiones de PM₁₀ de estos motores principales es de 0,13 g/kWh, siendo este valor inferior al estipulado para motores de dos tiempos y baja velocidad (un 13 % menos), cuando se consume combustible residual de bajo contenido en azufre (véase tabla 41).

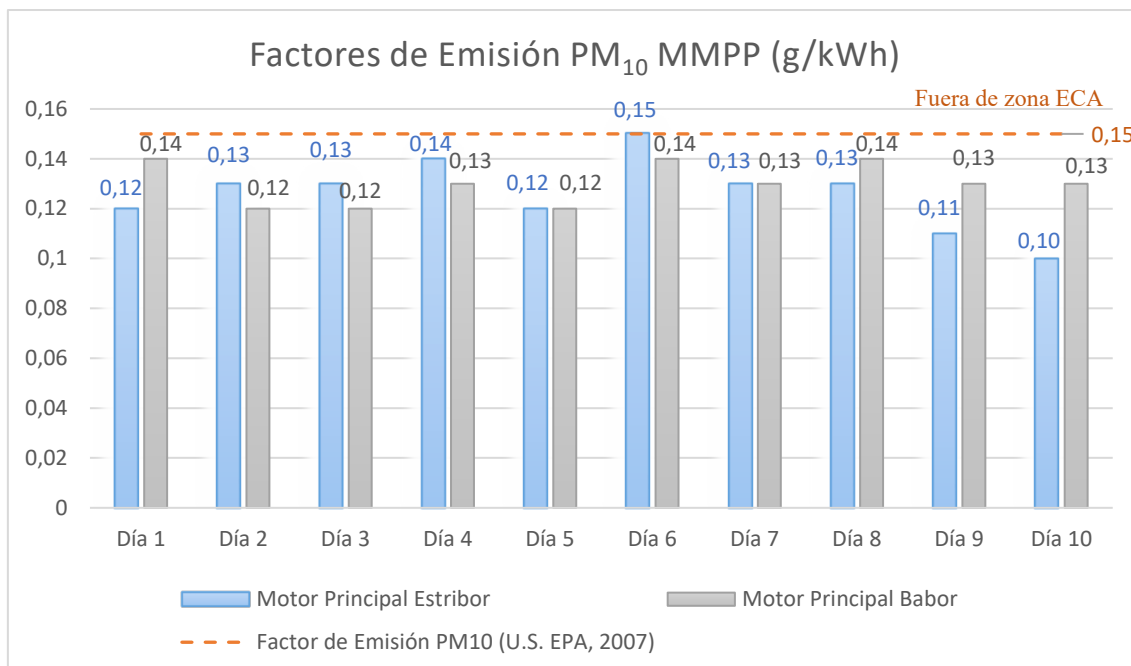


GRÁFICO 7. VALOR LÍMITE DE FACTORES DE EMISIÓN PM₁₀ MOTORES PRINCIPALES

El valor medio de los factores de emisión obtenido a partir de las mediciones realizadas en motores auxiliares se encuentra en torno al 0,16 g/kWh, el cual coincide muy cercano al valor establecido por EPA (2007) para motores diésel de cuatro tiempos y alta velocidad consumiendo un combustible destilado marino MDO. En el gráfico 8 se observa cómo se registran algunos valores de factores de emisión de motores auxiliares por encima del valor establecido por normativa, pero esto no significa que se esté incumpliendo con ella, ya que como se ha mencionado antes, lo que se limita dentro y fuera de zonas ECAs es el contenido máximo de azufre en el combustible.

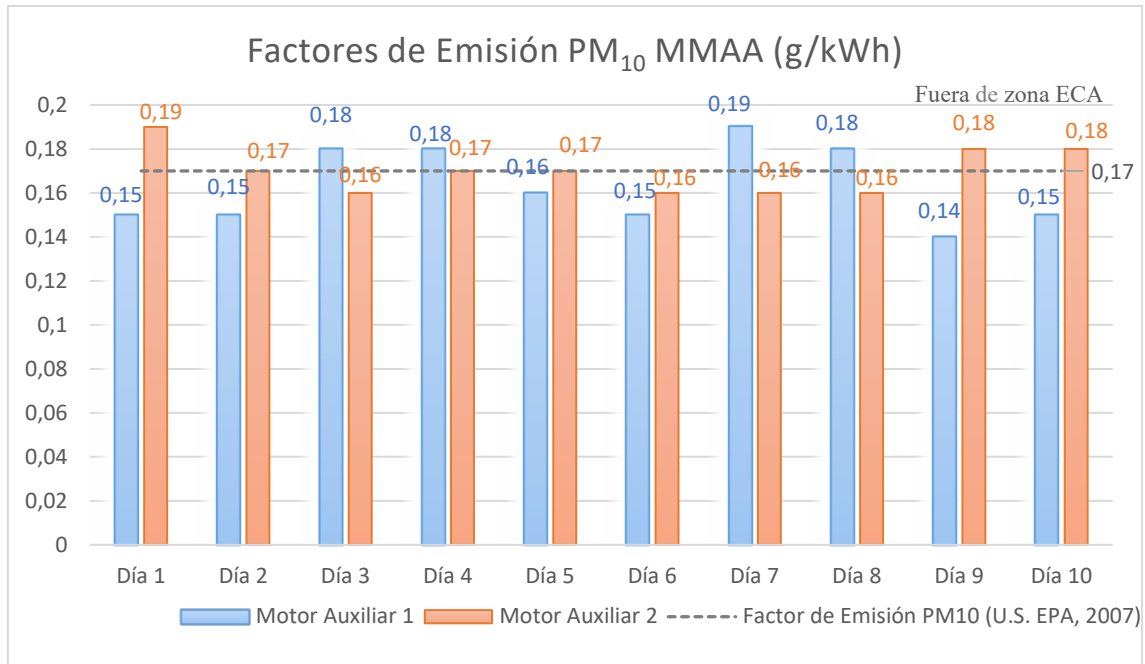


GRÁFICO 8. VALOR LÍMITE DE FACTORES DE EMISIÓN PM₁₀ MOTORES AUXILIARES

Se debe tener en cuenta que la normativa actual regula las emisiones de material particulado en función de la concentración de azufre en el combustible mencionada anteriormente. En función del tipo de motor y el combustible utilizado se define el factor de emisión para este contaminante, pero no se tiene en cuenta la tecnología del motor, su estado operacional, ni su año de fabricación. Por ello, pueden apreciarse en el anterior gráfico algunos valores medidos donde se obtiene un factor de emisión algo superior al indicado por los estudios de referencia (tabla 41). La formación de este material particulado está vinculado estrechamente a la eficiencia de la combustión y al estado de funcionamiento del motor. Por ejemplo, si la combustión es poco efectiva, el combustible no se oxidará por completo dando lugar a la formación de un mayor número de partículas de carbono. Las emisiones de material particulado presentarán valores superiores a bajas cargas debido a la disminución de la eficiencia del sistema de inyección y el empeoramiento de la combustión (Chu-Van et al., 2018). La calidad del combustible también influye directamente en la emisión de material particulado, asumiendo que, cuanto menor contenido en azufre tenga el combustible mayor será su calidad y por consiguiente, este parámetro es empleado como referente para el control de dichas emisiones.

A modo de resumen, en la siguiente tabla 43 se definen los valores de los factores de emisión resultantes de calcular el valor promedio por cada contaminante, en función del tipo de motor estudiado y sus condiciones operacionales de navegación (principales) y estancia en puerto o atraque (auxiliares).

TABLA 43. FACTORES DE EMISIÓN DEFINIDOS EN ESTE ESTUDIO (g/kWh)

Tipo de motor	Tipo de contaminante		
	NO _x	SO _x	PM ₁₀
Motor Principal Baja velocidad (2 tiempos), RO	18	1,1	0,13
Motor Auxiliar Alta velocidad (4 tiempos), MDO	13,49	0,003	0,16
Nota: Para RO y MDO con bajo contenido en azufre (0,49 y 0,091 % m/m respectivamente)			

Se puede comprobar (gráficos 9 y 10) como los factores de emisión definidos en este estudio se aproximan en gran medida a los publicados por la normativa y comunidad científica internacional (tabla 41), a excepción de los relativos a los SO_x debido al tipo de combustible utilizado con bajo contenido en azufre en ambos casos (motores principales y auxiliares).

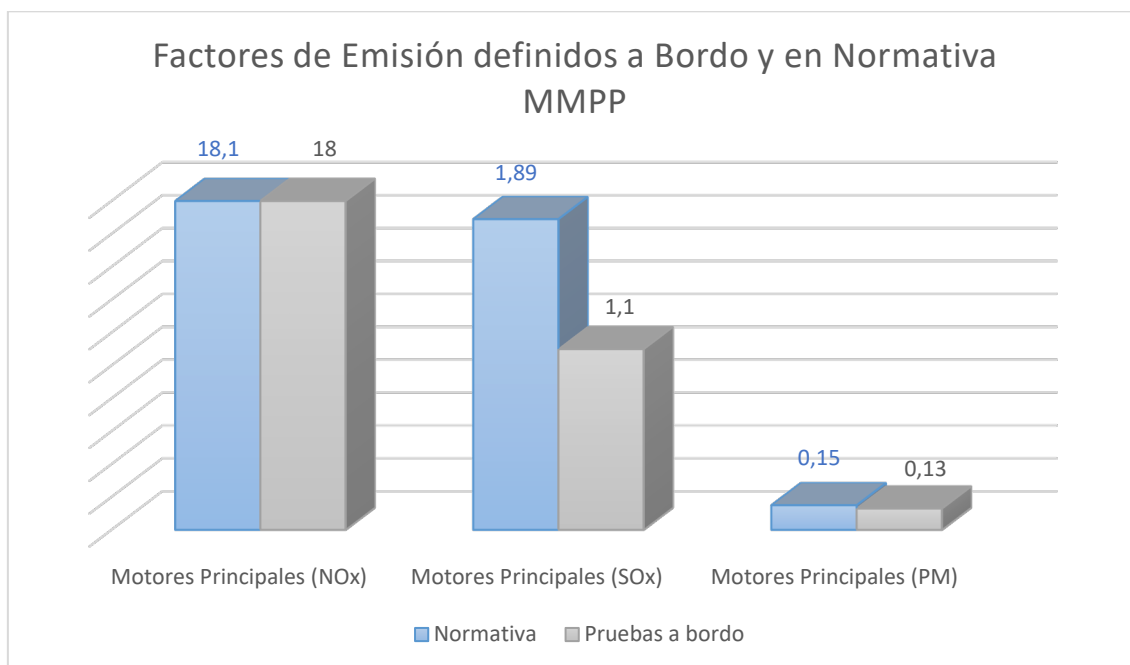


GRÁFICO 9. COMPARATIVA DE FACTORES DE EMISIÓN DEFINIDOS ESTE ESTUDIO MMPP

El factor de emisión de óxidos de azufre definido para los motores auxiliares de estas características se ha determinado finalmente en 0,003 g/kWh (representado en la

tabla 43 y en el gráfico 10). Este valor se ha seleccionado, ya que éste es precisamente el fijado por la normativa vigente empleando este tipo de combustible destilado (MDO) con un porcentaje de azufre igual o inferior al 0,1 % (m/m) (ver tabla 41). Se ofrece de esta forma un dato más realista, debido a que, como ya se ha comentado anteriormente, el equipo analizador de gases de escape no es capaz de captar la mínima concentración real de óxidos de azufre como consecuencia de su bajo valor.

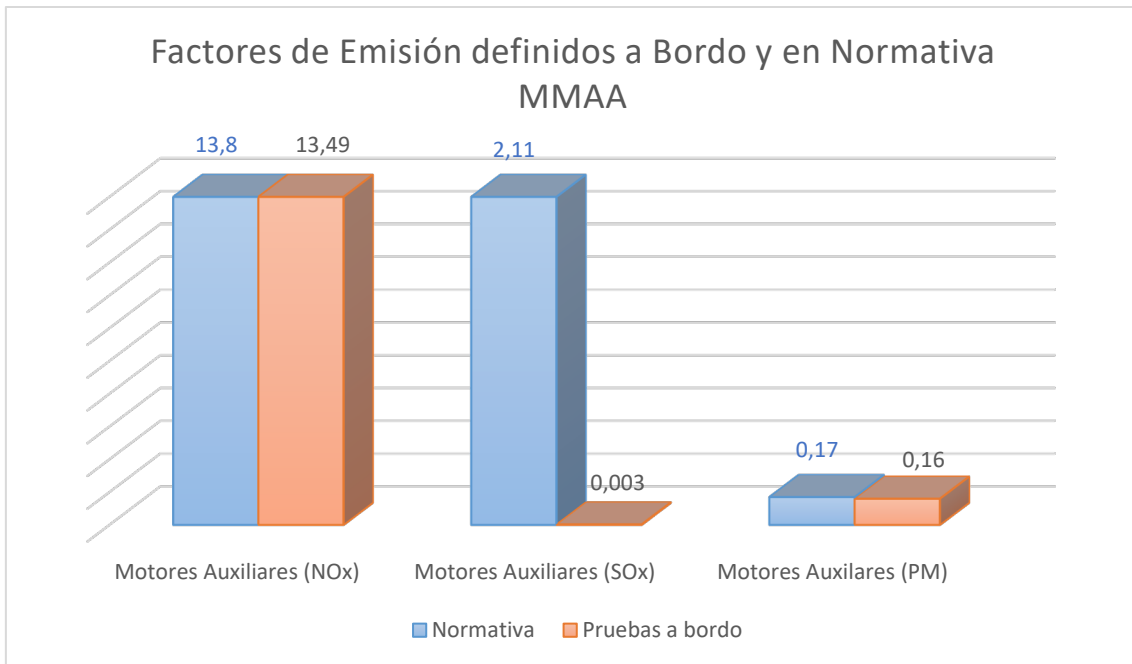


GRÁFICO 10. COMPARATIVA DE FACTORES DE EMISIÓN DEFINIDOS EN ESTE ESTUDIO MMAA

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados de este estudio de tesis doctoral, se ha comprobado que mediante los equipos específicos utilizados a bordo y la metodología empleada, se ha conseguido medir con un alto grado de fiabilidad las concentraciones de los principales contaminantes de los gases de escape para distintas cargas, independientemente del tipo de motor y combustible utilizado.

Los valores obtenidos para los factores de emisión de NO_x en motores principales y auxiliares superan, en algunos casos, los valores definidos por la normativa. Estas diferencias son poco significativas si se tiene en cuenta que OMI admite que, con el barco en operación, dichos valores normalmente son superiores a los obtenidos en banco de pruebas. Sobre todo, cuando dichos valores corresponden a cargas del motor comprendidas en el rango del 75 al 90 % como es el caso de los motores principales analizados en esta memoria de tesis doctoral.

En ningún caso se han obtenido valores de óxidos de nitrógeno con diferencias superiores al 7 % en motores auxiliares (límite de 13,8 g/kW según ENTEC, 2002) y al

10 % en motores principales (límite de 18,1 g/kW según la misma fuente) con respecto a la normativa aplicable para motores construidos antes del año 2000 (Tier 0).

Los métodos de cálculo de potencia empleados en este trabajo de investigación se pueden aplicar a cualquier estado de carga de los motores y en cualquier momento de la navegación. En esa misma línea, ha quedado demostrado que la diferencia entre los valores obtenidos a través de los diferentes métodos en ningún caso supera el 10 %. En este estudio se ha optado por aplicar en los cálculos la potencia obtenida mediante el análisis de la carga de los motores principales (definida en el apartado de la metodología), ya que arroja resultados equidistantes entre los otros dos métodos estudiados.

Se ha verificado que el contenido de azufre de los combustibles empleados se encuentra dentro de los límites admisibles para cada uno de ellos. Para ello se han llevado a cabo pruebas en laboratorio mediante el equipo analizador HORIBA SLFA-6100 obteniendo unos valores reales de 0,091 % para el combustible destilado (MDO) y de 0,49 % para el residual (RO), comprobando que estos porcentajes son inferiores a 0,1 % y 0,5 % respectivamente acordes a las regulaciones actuales.

En cuanto a los SO_x, se ha observado el enorme beneficio que se obtiene utilizando combustible con bajo contenido de azufre. En el caso de los motores principales, la totalidad de los valores de los factores de emisión de este contaminante obtenidos se encuentran por debajo del límite establecido (1,89 g/kWh según U.S. Environmental Protection Agency, 2017) para barcos operando actualmente en zonas no ECA. El valor más alto registrado (día 1 para el motor de estribor) se ha establecido en 0,2 g/kWh por debajo del citado límite, con una diferencia del 10,6 % respecto al mismo. En el caso de los motores auxiliares, los valores de los óxidos de azufre emitidos a la atmósfera son nulos, esto es debido al bajo contenido de azufre en el combustible (inferior al 0,1 %), con el conocido beneficio que ello conlleva tanto para el ecosistema como para la salud humana.

Los valores de los factores de emisión de las partículas entran dentro de los límites definidos por la normativa, o están próximos a ella, lo cual es una indicación más de la validez de los de cálculos empleados. En el caso de los motores principales, el valor máximo que reflejan los resultados para el motor de estribor en un solo día, es de 0,15 g/kWh (coincidente con el valor límite estipulado por US EPA, 2007), mientras que en el motor de babor nunca se alcanzó dicho valor. Respecto a los motores auxiliares, estos

valores se encuentran muy cercanos al límite de lo que estipula la normativa (0,17 kW/k según U.S. EPA, 2007). En ambos motores auxiliares el valor máximo alcanzado se sitúa en torno a 0,19 kW/h correspondiente a la media de las mediciones efectuadas durante un único día en cada uno de ellos.

Una vez analizados los resultados obtenidos y a través de la metodología empleada en este estudio, se concluye que los factores de emisión calculados presentan un alto grado de fiabilidad al haberse obtenido mediante pruebas reales a bordo. Esta metodología desarrollada ofrece la posibilidad de ser aplicada en cualquier tipo motor marino consumiendo diferentes clases de combustible, pudiéndose definir nuevos valores de factores de emisión para los contaminantes estudiados. En este caso particular, los valores obtenidos son los siguientes: 18 g/kWh (NO_x), 1,1 g/kWh (SO_x) y 0,13 g/kWh (PM_{10}) para motores principales y de 13,49 g/kWh (NO_x), 0,003 g/kWh (SO_x) y 0,16 g/kWh (PM_{10}) para motores auxiliares.

Las conclusiones de este trabajo de tesis doctoral se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- Se ha medido con un alto grado de fiabilidad las concentraciones de los principales contaminantes de los gases de escape para distintas cargas, independientemente del tipo de motor y combustible utilizado.
- Se ha demostrado que el procedimiento propuesto para calcular la potencia de motores principales y auxiliares en función de la carga, permite obtener datos fiables para definir los factores de emisión.
- Se ha verificado, mediante análisis en laboratorio, que el contenido de azufre de los combustibles empleados se encuentra dentro de los límites admisibles para cada uno de ellos.
- Se han obtenido factores de emisión procedentes de pruebas reales a bordo con unas desviaciones no superiores al 7 % para motores auxiliares y al 10 % para principales, en comparación con los factores teóricos publicados.
- A través del análisis de los resultados obtenidos, se puede comprobar que los factores de emisión calculados para los motores de este estudio cumplen con la normativa actual.

REFERENCIAS

- Agrawal, H., Welch, W. A., Henningsen, S., Miller, J. W., & Cocker III, D. R. (2010). Emissions from main propulsion engine on container ship at sea. *115, D23205*.
- Bacalja, B., Krčum, M., & Slišković, M. (2020). A Line Ship Emissions while Manoeuvring and Hotelling—A Case Study of Port Split. *Marine Science and Engineering, 8*(11), 953.
- Bayramoğlu, K., & Özmen, G. (2021). Design and performance evaluation of low-speed marine diesel engine selective catalytic reduction system. *Process Safety and Environmental Protection, 155*, 184-196.
- Bilsback, K. R., Kerry, D., Croft, B., Ford, B., Jathar, S. H., Carter, E., Martin, R. V., & Pierce, J. R. (2020). Beyond SO_x reductions from shipping: assessing the impact of NO_x and carbonaceous-particle controls on human health and climate. *Environmental Research Letters, 15*(12), 124046.
- Broome, R. A., Cope, M. E., Goldsworthy, B., Goldsworthy, L., Emmerson, K., Jegasothy, E., & Morgan, G. G. (2016). The mortality effect of ship-related fine particulate matter in the Sidney greater metropolitan region of NSW, Australia. *Environment International, 87*, 85-93.
- Celo, V., Dabek-Zlotorzynska, E., & McCurdy, M. (2015). Chemical characterization of exhaust emissions from selected Canadian marine vessels: the case of trace metals and lanthanoids. *Environmental science & technology, 49*(8), 5220-5226.
- Chiavola, O., Chiatti, G., & Sirhan, N. (2019). Impact of Particulate Size During Deep Loading on DPF Management. *Applied sciences, 9*(15), 3075.
- Chu-Van, T., Ristovski, Z., Pourkhesalian, A. M., Rainey, T., Garaniya, V., Abbassi, R., Jahangiri, S., Enshaei, H., Kam, U. S., Kimball, R., Yang, L., Zare, A., Bartlett, H., & Brown, R. J. (2018). On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel at different operating conditions. *Environmental pollution, 237*, 832-841.

- Cooper, D., & Gustafsson, T. (2004). *Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors*. SMHI Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
- Corbett, J. J., & Fischbeck, P. S. (1997). Emissions from Ships. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 278, 823-824.
- Corbett, J., & Carr, E. (2022). *Market responses and distribution of costs related to the possible designation of the Mediterranean Sea, as a whole, as an Emission Control Area for Sulphur Oxides (Med SO_x ECA)*. Energy and Environmental Research Associates, LLC (EERA).
- Corbett, J., Fischbeck, P., & Pandis, S. (1999). *Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships*.
- Corbett, J.J. (2002). Emissions from ships in the Northwestern United States. *Environmental Science & Technology*, 36(6), 1299–1306.
- Durán-Grados, V., Amado-Sanchez, Y., Calderay-Cayetano, F., Rodríguez-Moreno, R., Pájaro-Velázquez, E., Ramírez-Sánchez, A., Sousa, S., Nunes, R., Alvim-Ferraz, M., & Moreno-Gutiérrez, J. (2020). Calculating a Drop in Carbon Emissions in the Strait of Gibraltar (Spain) from Domestic Shipping Traffic Caused by the COVID-19 Crisis. *Sustainability*, 12(24), 10368.
- Durán-Grados, V., Rodríguez Moreno, R., Calderay-Cayetano, F., Amado-Sánchez, Y., Pájaro-Velázquez, E., Nunes, R., Alvim-Ferraz, M., Sousa, S., & Moreno-Gutiérrez, J. (2022). The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain). *Sustainability*, 14(19), 12507.
- Durán-Grados, V., Uriondo, Z., & Moreno-Gutiérrez, J. (2012). The impact of marine engine operation and maintenance on emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Ed. Elsevier, 17(1), 54-60.
- Durán-Grados, V., Uriondo, Z., Clemente, M., Jiménez-Espadafor, F., & Moreno-Gutiérrez, J. (2009). Correcting injection pressure maladjustments to reduce NO_x emissions by marine diesel engines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Ed. Elsevier, 14(1), 61-66.

- EEA. (2013). *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing*. European Environment Agency.
- Ekmekçioğlu, A., Kuzu, L., Ünlügençoğlu, K., & Çelebi, U. B. (2020). Assessment of shipping emission factors through monitoring and modelling studies. *Science of The Total Environment*, 743, 140742.
- EMEP/EEA. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 - Update Dec. 2021*. European Environmental Agency.
- Endresen, O., Sorgard, E., Behrens, H. L., Brett, P. O., & Isaksen, I. S. (2007). A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- ENTEC. (2002). *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community – Final report July 2002. Prepared for the European Commission*. Entec UK Limited.
- ENTEC. (2005). *Service contract on ship emissions: assignment, abatement and market-based instruments, a report for the European Commission*. Tech rep, European Commission Directorate General Environment.
- ENTEC. (2007). *Ship Emissions Inventory, Mediterranean Sea. Final Report*. Entec UK Limited.
- ENTEC. (2010). *UK Ship Emissions Inventory. Final Report*. Entec UK Limited.
- EPA. (2009). *Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions of Air Pollution from Category 3 Marine Diesel Engines*. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2015). *U.S.-Mexico Cooperation on Reducing Emissions from Ships through a Mexican Emission Control Area: Development of the First National Mexican Emission Inventories for Ships Using the Waterway Network Ship Traffic, Energy, and Environmental Model (STEEM)*.
- EPA. (2020). *Ports Emissions Inventory Guidance: Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emissions*. United States Environmental Protection Agency.

- Eyring, V., Isaksen, I. S., Berntsen, 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. *Atmospheric Environment*, 44, 4735-4771.
- Faber, J., Hanayama, S., Zhang, S., Pereda, P., Comer, B., Hauerhof, E., van der Loeff, W. S., Smith, T., Zhang, Y., Kosaka, H. K., Adachi, M., Bonello, J. M., Galbraith, C., Gong, Z., Hirata, K., Hummels, D., Kleijn, A., Lee, D. S., Liu, Y., . . . Xing, H. (2021). *Fourth IMO GHG Study 2020 – Final Report*. London, UK: International Maritime Organization (IMO).
- Faber, J., Markowska, A., Nelissen, D., Davidson, M., Eyring, V., Cionni, I., Selstad, E., Kågeson, P., Lee, D., Buhaug, Ø., Lindtsad, H., Roche, P., Humpries, E., Graichen, J., Cames, M., & Schwarz, W. (2009). *Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport*. Faculty of Science (FNWI). Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics (IBED).
- Feng, L., Tian, J., Long, W., Gong, w., Du, B., Li, D., & Chen, L. (2016). Decreasing NO_x of a Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine by Using In-Cylinder Emission Control Measures. *Energies*, 9(4), 304.
- Freeman, E., Woodruff, S. S., Worley, S. J., Lubker, S. J., Kent, E. C., Angel, W. E., Berry, D. I., Brohan, P., Eastmann, R., Gates, L., Gloeden, W., Ji, Z., Lawrimore, J., Rayner, N. A., Rosenhagen, G., & Smith, S. R. (2017). ICOADS Release 3.0: a major update to the historical marine climate record. *International Journal of Climatology*, 37, 2211-2232.
- Huang, L., Wen, Y., Zhang, Y., Zhou, C., Zhang, F., & Yang, T. (2020). Dynamic calculation of ship exhaust emissions based on real-time AIS data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 80.
- IMO. (2015). *Study of Emission Control and Energy Efficiency Measures for Ships in the Port Area*. London: International Maritime Organization.
- IMO. (2018). *72nd Meeting of the MEPC*. International Maritime Organization.

- International Organization for Standardization. (2017). *Petroleum products - Fuels (class f) - Specifications of marine fuels. ISO 8217.*
- International Organization for Standardization. (2020). *Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions. ISO 8178-1.*
- Jahangiri, S., Nikolova, N., & Tenekedjiev, T. (2018). An improved emission inventory method for estimating engine exhaust emissions from ships. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 374-381.
- Jalkanen, J., Brink, A., Kalli, J., Pettersson, H., Kukkonen, J., & Stipa, T. (2009). A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 9209-9223.
- Jalkanen, J., Johansson, L., Kukkonen, J., Brink, A., Kalli, J., & Stipa, T. (2012). Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 2641–2659.
- Khan, M. Y., Ranganathan, S., Agrawal, H., Welch, W. A., Laroo, C., & Miller, J. W. (2013). Measuring in-use ship emissions with international and U.S. federal methods. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(3), 284-291.
- Kwon, Y. J. (2008). Speed loss due to added resistance in wind and waves. *Nav. Archit.*, 3, 14-16.
- Lamas, M. I., & Rodríguez, C. G. (2012). Emissions from Marine Engines and NO_x Reduction Methods. *Journal of Maritime Research*, 9(1), 77-82.
- Lauenburg, M., Karl, M., Matthias, V., Quante, M., & Ramacher, M. O. (2021). City Scale Modeling of Ultrafine Particles in Urban Areas with Special Focus on Passenger Ferryboat Emission Impact. *Toxics*, 10(1), 3.
- MAN Diesel and Turbo. (2012). *Basic Principles of ships Propulsion.* s.l: MAN Group.
- MEPC.103(49). (2003). *Guidelines for on-board NO_x verification procedure - direct measurement and monitoring method. Annex 5.*

- MEPC.177(58). (2008). *Amendments to the Technical Code on Control of Emission Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines (NO_x Technical Code, 2008)*.
- MEPC.251(66). (2014). *Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto. Amendments to MARPOL Annex VI and the NO_x Technical Code 2008*.
- Merico, E., Donateo, A., Gambaro, A., Cesari, D., Gregoris, E., Barbaro, E., Dinoi, A., Giovanelli, G., Masieri, S., & Contini, D. (2016). Influence of in-port ships emissions to gaseous atmospheric pollutants and to particulate matter of different sizes in a Mediterranean harbour in Italy. *Atmospheric Environment*, 139, 1-10.
- Merkisz, J., & Siedlecki, M. (2017). Specific emissions analysis for a combustion engine in dynamometer operation in relation to the thermal state of the exhaust gas aftertreatment systems in a modified NRSC test. *VII International Congress on Combustion Engines*. Poznan (Polonia): MATEC Web Conferences 118, 00027.
- Moreno-Gutiérrez, J., & Durán-Grados, V. (2021). Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: Towards zero uncertainties. *Science of The Total Environment*, 750(1), 141471.
- Moreno-Gutierrez, J., Pájaro-Velázquez, E., Amado-Sánchez, Y., Rodríguez-Moreno, R., Caldery-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2019). Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data. *Science of The Total Environment*, 650(1), 575-584.
- Ng, S. K., Loh, C., Lin, C., Booth, V., Chan, J. W., Yip, A. C., Li, Y., & Lau, A. K. (2013). Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta. *Atmos. Environ*, 76, 102-112.
- Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279, 118477.
- Pei-Chi, W., & Cherng-Yuan, L. (2020). Cost-Benefit Evaluation on Promising Strategies in Compliance with Low Sulfur Policy of IMO. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 3.

- Peng, X., Wen, Y., Wu, L., Xiao, C., Zhou, C., & Han, D. (2020). A sampling method for calculating regional ship emission inventories. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89, 102617.
- Samulski, M. (2007). *Estimation of particulate matter emissions factors for diesel engines on ocean-going ships. (US EPA 2007).*
- Shi, X., He, K., Song, W., Wang, X., & Tan, J. (2012). Effects of a diesel oxidation catalyst on gaseous pollutants and fine particles from an engine operating on diesel and biodiesel. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 6, 463-469.
- Skjølsvik, K., Andersen, A. B., Corbett, J. J., & Skjelvik, J. M. (2000). *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships (MEPC 45/8 Report to International Maritime Organization on the outcome of the IMO Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships)*. MARINTEK Sintef Group, Carnegie Mellon University, Center for Economic Analysis, and Det Norske Veritas.
- SMED. (2020). *Emission factors for shipping in scenarios*. Swedish Environmental Protection Agency.
- Smith, T. W., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D. S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J. J., Hoen, S., . . . Pandey, A. (2015). *Third IMO GHG Study 2014*. International Maritime Organization (IMO).
- Stamatellou, A., & Stamatelos, A. (2017). Overview of Diesel particulate filter systems sizing approaches. *Applied Thermal Engineering*, 121, 537-546.
- Streets, D. G., Guttikunda, S. K., & Carmichael, G. R. (2000). The growing contribution of sulfur emissions from ships in Asian waters, 1988 - 1995. *Atmospheric Environment*, 34, 4425-4439.
- Tadros, M., Ventura, M., & Soares, C. G. (2020). Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SO_x Emissions. *Journal of Marine Science and Application*, 19, 473-484.

- Trant, T. A. (2017). Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. *Journal of Marine Science: Research & Development*, 7(6), 243.
- Trozzi, C., & De Lauretis, R. (2016). *International navigation, national navigation, national fishing, EMEP/EEA emission inventory guidebook*.
- Tzannatos, E. (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus e Greece. *Atmos. Environ*, 44, 400-407.
- Uriondo, Z., Durán-Grados, V., Clemente, M., Moreno-Gutiérrez, J., & Martín, L. (2011). Effects of charged air temperature and pressure on NO_x emissions of marine medium speed engines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Ed. ELsevier, 16(4), 288-295.
- US Environmental Protection Agency. (2017). *Category 3 Commercial Marine Vessel 2017 Emissions Inventory*.
- US EPA. (2014). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks; 1990-2012*.
- Wang, C., & Corbett, J. J. (2007). The costs and benefits of reducing SO₂ emissions from ships in the US West Coastal waters. *Transportation Research Part D*, 12, 577-588.
- Wang, C., Corbett, J., & Firestone, J. (2007a). Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories. *Environmental Science & Technology*, 42, 193-199.
- Wang, C., Corbett, J., & Jeremy, F. (2007b). Modeling Energy Use and Emissions from North American Shipping: Application of the Ship Traffic, Energy, and Environment Model. *Environmental Science and Technology*, 41(9), 3226-32.
- Weng, J., Shi, K., Gan, X., Li, G., & Huang, Z. (2020). Ship emission estimation with high spatial-temporal resolution in the Yangtze River estuary using AIS data. *Journal of Cleaner Production*, 248.
- WHO. (2000). *Guidelines for air quality*. World Health Organization.

- Winnes, H., Fridell, E., & Moldanová, J. (2020). Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 299.
- Wright, A. A. (2009). *Exhaust Emissions from Combustion Machinery* (Vol. 3). London: Institute of Marine Engineers. Science and Technology. ISBN 1-902536-17-7.
- Yang, Z., Tan, Q., & Geng, P. (2019). Combustion and Emissions Investigation on Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine with Low Sulfur Diesel Fuel. *Polish Maritime Research*, 26(1), 153-161.
- Yau, P. S., Lee, S. C., Corbett, J. J., Wang, C., Cheng, Y., & Ho, K. F. (2012). Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong. *Sci. Total Environ*, 431, 299-306.
- Zetterdahl, M., Moldanová, J., Pei, X., Pathak, R. K., & Demirdjian, B. (2016). Impact of the 0.1% fuel sulfur content limit in SECA on particle and gaseous emissions from marine vessels. *Atmospheric Environment*, 145, 338-345.
- Zhang, F., Chen, Y., Tian, C., Lou, D. L., Zhang, G., & Matthias, V. (2016). Emission factors for gaseous and particulate pollutants from offshore diesel engine vessels in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(10), 6319-6334.
- Zhang, F., Guo, H., Chen, Y., & Mattias, V. (2020). Size-segregated characteristics of organic carbon (OC), elemental carbon (EC) and organic matter in particulate matter (PM) emitted from different types of ships in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(3), 1549-1564.
- Zhang, L., Meng, Q., & Fwa, T. F. (2019). Big AIS data based spatial-temporal analyses of ship traffic in Singapore port waters. *Transportation Research Part E*, 129, 287-304.
- Zhou, F., Liu, J., Zhu, H., Yang, X., & Fan, Y. (2022). A Real-Time Measurement-Modeling System for Ship Air Pollution Emission Factors. *Marine Science and Engineering*, 10, 760.
- Zhu, Y., Zhou, W., Xia, C., & Qichen, H. (2022). Application and Development of Selective Catalytic Reduction Technology for Marine Low-Speed Diesel Engine:

Trade-Off among High Sulfur Fuel, High Thermal Efficiency, and Low Pollution Emission. *Atmosphere*, 13(5), 731.

ANEXO I

ANEXO I

ENSAYO EN BANCO DE PRUEBAS (MMPP)

1. Ensayo en banco de pruebas del motor principal de babor.

MAN B&W Diesel A/S

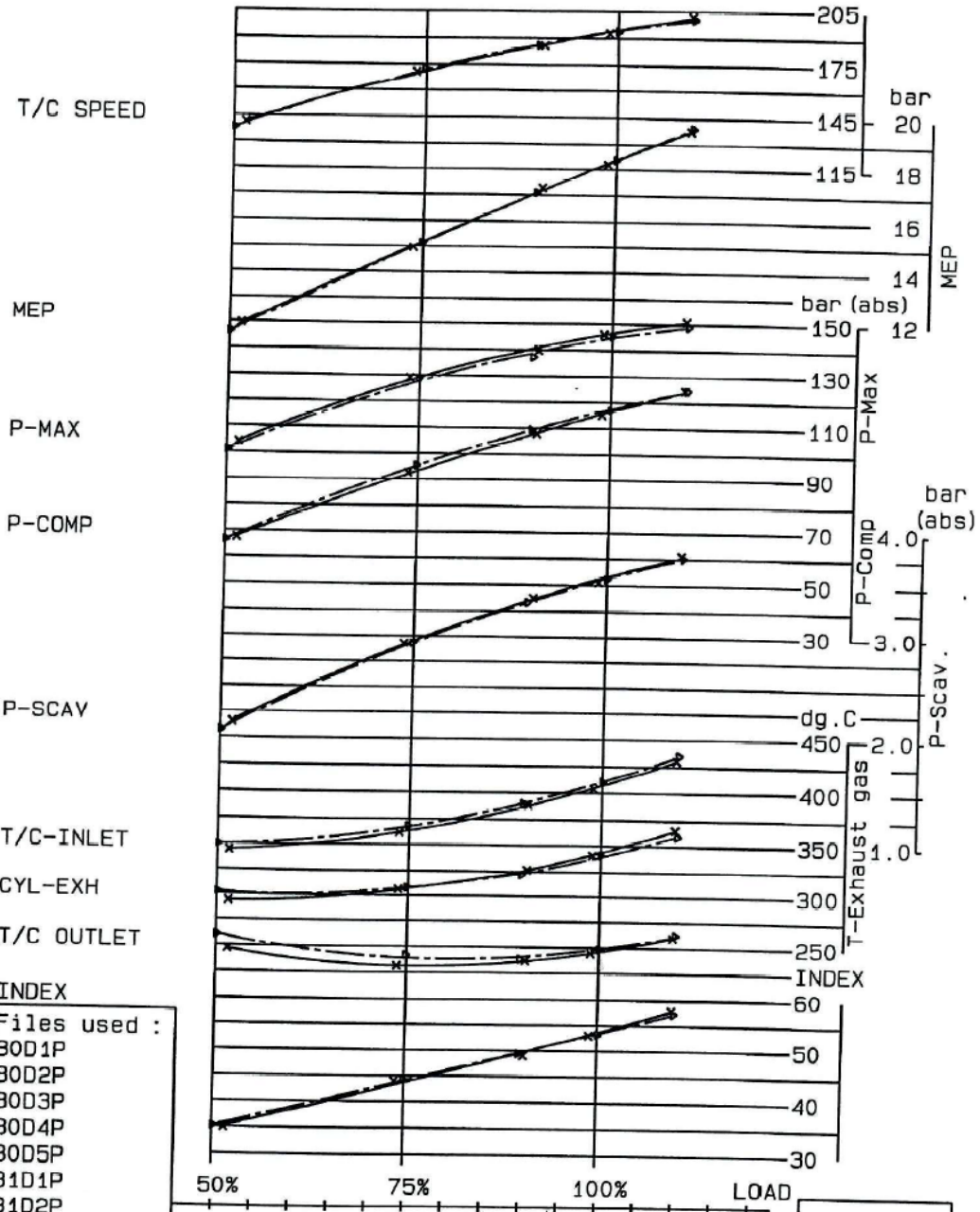


Engine tests

Load test (propeller/generator curve) summary (measured values)					
Test No.	D1P	D2P	D3P	D4P	D5P
Date	95-11-05				
Load %	50	75	90	100	110
BHP	4100	5864	7188	7867	8722
RPM	166.4	190.3	202.1	209.9	217
MEP (bar)	11.93	14.95	17.28	18.17	19.59
Fuel index	35	44	49	53	58
Ambient pressure	1010	1010	1010	1010	1010
Ambient temp.	27	24	27	29	29
T/C efficiency	77.94%	79.32%	79.93%	80.98%	81.23%
Pmax (bar)	103	129	139	145	150
Pcomp (bar)	66	93	108	115	125
Pscav (bar)	1.12	1.98	2.43	2.57	2.85
Pexh (bar)	0.98	1.77	2.21	2.36	2.65
Exh. temp. cyl.	295	305	332	351	377
Exh. temp. inlet T/C	345	361	394	414	442
Exh temp. outlet T/C	250	230	241	252	268
T/C speed	13990	17060	18640	19380	20380
SFOC (g/BHP _h)	136.20	132.80	133.10	133.20	134.10



4. DATA CORRECTED TO ISO AND MEA. P-MAX x100 r/min



- INDEX
- Files used :
 - 30D1P
 - 30D2P
 - 30D3P
 - 30D4P
 - 30D5P
 - 31D1P
 - 31D2P
 - 31D3P
 - 31D4P
 - 31D5P

9L35MC ALPHA 35030 + 35031 MOLS 1 + 2

E2400 Performance Group 96-01-24

MOLS1
MOLS2

2. Ensayo en banco de pruebas del motor principal de estribor.

MAN B&W Diesel A/S

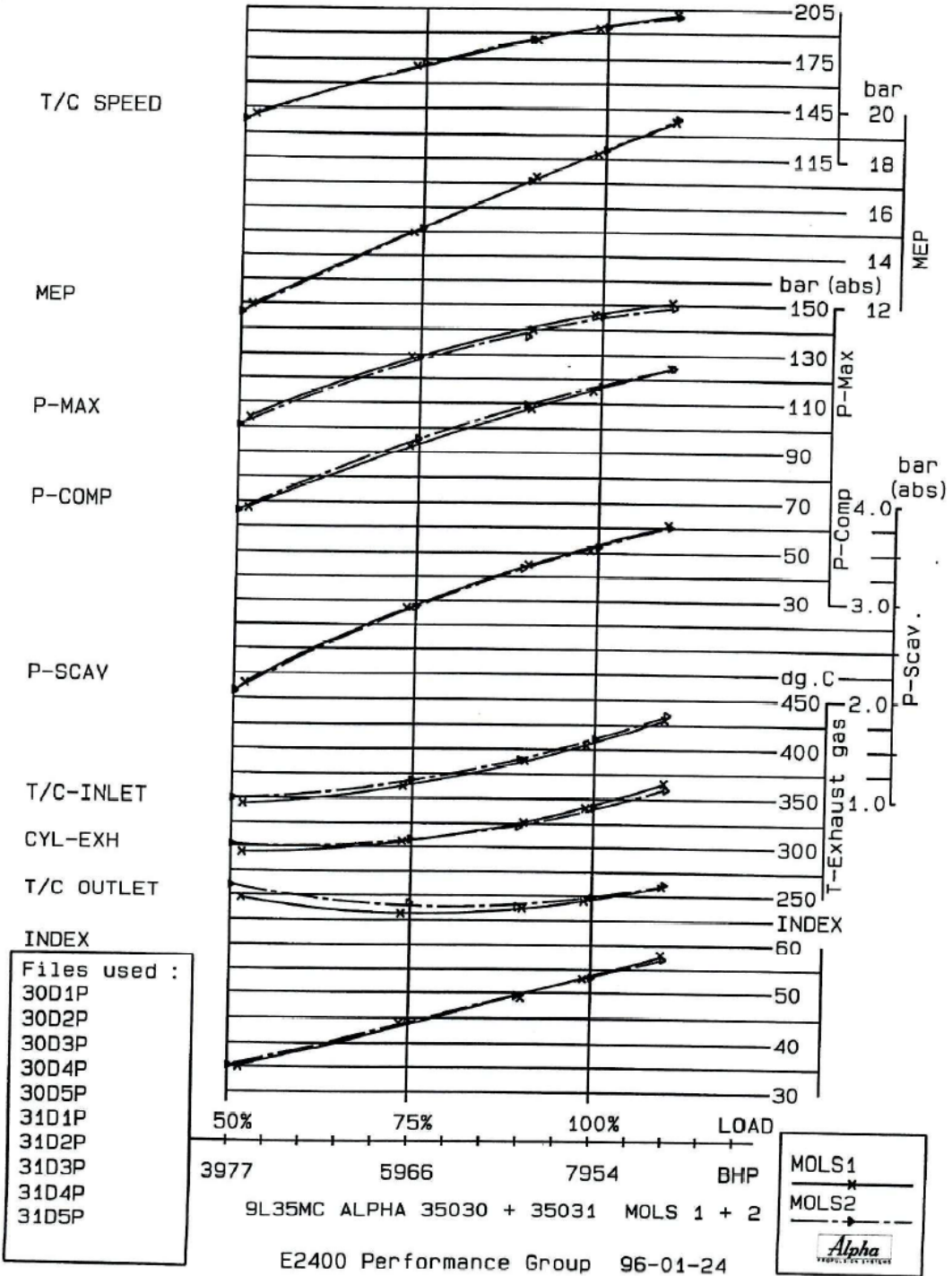


Engine tests

Load test (propeller/generator curve) summary (measured values)					
Test No.	D1P	D2P	D3P	D4P	D5P
Date	Friday 95.10.24				
Load %	50	75	90	100	110
BHP	3989	5955	7133	7955	8746
RPM	166.9	191	202.6	210.2	216.5
MEP (bar)	11.67	15.07	17.03	18.83	19.65
Fuel index	35	44	49	53	57
Ambient pressure	1018	1018	1018	1018	1018
Ambient temp.	22	24	26	26	26
T/C efficiency	64.77%	65.48%	65.60%	66.23%	62.98%
Pmax (bar)	100	128	136	144	149
Pcomp (bar)	66	95	109	117	125
Pscav (bar)	1.06	1.94	2.34	2.58	2.81
Pexh (bar)	0.91	1.75	2.14	2.25	2.6
Exh. temp. cyl.	294	304	322	343	362
Exh. temp. inlet T/C	341	365	390	412	438
Exh temp. outlet T/C	255	240	240	250	265
T/C speed	13580	17100	18460	19280	20020
SFOC (g/BHP_h)	134.90	131.10	130.80	131.00	132.00



4. DATA CORRECTED TO ISO AND MEA. P-MAX x100 r/min



ANEXO II

ANEXO II

PARÁMETROS DE PRUEBAS DE MAR BUQUE A

Condiciones del buque durante las pruebas de mar:

- Eslora en la línea de flotación: 131,126 (m)
- Calado en proa: 4,620 (m)
- Calado en popa: 4,570 (m)
- Desplazamiento (condiciones de prueba): 7.185 (m³)
- Desplazamiento (condiciones de modelo): 7.268 (m³)
- Superficie mojada: 2.747 (m²)
- Área de la sección transversal: 103 (m²)
- Factor de forma: 120 (m²)
- Número de hélices: 2
- Diámetro de la hélice: 3.800 (m)
- Temperatura del agua de mar: 5 (°C)
- Densidad del agua: 103,46 (kp s²/m⁴)
- Viscosidad cinemática del agua: 0,154⁻⁵ (m²/s)
- Temperatura del aire: 6 (°C)
- Presión atmosférica: 1023 (mbar)
- Coeficiente de resistencia del viento CM: 0,680

Viaje	Tiempo (h, min)	Velocidad del buque (kt)	Régimen (min ⁻¹)	Potencia (hp)
1	3,5	20,68	209,1	7836
2	3,26	21,45	209,4	7947
3	3,5	20,10	209,7	6832
4	4,1	10,74	209,5	6886
5	4,31	19,37	209,7	5492
6	21,4	18,93	180,8	4565
7	21,6	18,11	180,7	4489

Viaje	Rumbo (°)	Calado (m)	Velocidad del viento (kt)	Ángulo de dirección del viento (°)	Coeficiente de resistencia del viento CM
1	0	58	20,7	0,0 S	0,680
2	180	57	21,5	0,0 S	0,680
3	0,00	58	20,1	0,0 S	0,680
4	180	47	20,7	0,0 S	0,680
5	0	50	19,4	0,0 S	0,680
6	0	26	18,9	0,0 S	0,680
7	180	26	18,1	0,0 S	0,680

Viaje	Velocidad del buque (kt)	Coeficiente de avance (J)		
		J _{buque}	J _{mar abierto (modelo)}	J _{observado}
1	20,68	0,803	0,768	0,803
2	21,45	0,832	0,763	0,832
3	20,10	0,779	0,828	0,779
4	20,74	0,804	0,824	0,804
5	19,37	0,750	0,894	0,750
6	18,93	0,851	0,815	0,851
7	18,11	0,814	0,821	0,814

Viaje	K _Q *10	C (kt)	1-W _Q	DeltaW _Q	V _s *W _Q (kt)
1	0,2641	0	0,956	0,072	0,92
2	0,2668	0	0,917	0,031	1,78
3	0,2276	0	1,064	0,183	-1,29
4	0,2301	0	1,025	0,142	-0,52
5	0,1819	0	1,192	0,314	-3,72
6	0,2358	0	0,958	0,082	0,79
7	0,2320	0	1,009	0,135	-0,16

Nota: K_Q: Coeficiente de par; W_Q: Coeficiente de fracción de estela; C: Velocidad de la corriente; V_s: Velocidad del buque; DeltaW_Q: Diferencia con el W_Q obtenido en el modelo

Viaje	Velocidad del buque (kt)	Potencia (hp)	Correcciones				Potencia (hp)
			Temp. (hp)	Despl. (hp)	Viento (hp)	Resistencia al agua (hp)	
1	20,68	7677	-15	59	0	0	7722
2	21,45	7788	-20	60	0	-2	7826
3	20,10	6673	-27	51	0	0	6697
4	20,74	6727	-32	52	0	-4	6742
5	19,37	5333	-47	41	0	-1	5326
6	18,93	4428	-28	34	0	-203	4232
7	18,11	4352	-23	33	0	-165	4198

Velocidad del buque (kt)	Corrección (rpm)	Eficiencia Propulsión	Eficiencia Casco	Eficiencia Rotativa relativa	Eficiencia Total
20,68	208,8	0,674	0,904	0,991	0,604
21,45	209,1	0,672	0,940	0,991	0,626
20,10	209,4	0,680	0,814	0,991	0,549
20,74	209,2	0,681	0,842	0,991	0,568
19,37	209,3	0,650	0,728	0,991	0,469
18,93	178,8	0,681	0,908	0,991	0,612
18,11	179,1	0,680	0,865	0,991	0,583

Velocidad del buque (kt)	Coeficiente de resistencia total		Correlación en la resistencia		n.º Reynolds
	CT*1000 Pruebas	CT*1000 Modelo	CA*100 0 ITTC (International Towing Tank Conference)	CA*1000 Factor Hughes	RN*E9 15 °C
20,68	3,767	3,260	0,506	0,507	1,171
21,45	3,549	3,380	0,169	0,169	1,215
20,10	3,235	3,176	0,058	0,059	1,138
20,74	3,070	3,269	-0,200	-0,200	1,175
19,37	2,458	3,079	-0,623	-0,622	1,097
18,93	2,731	3,027	-0,297	-0,296	1,072
18,11	2,947	2,941	0,005	0,006	1,026

Mediciones registradas:

- Viento:

Se ha medido la dirección relativa y velocidad del viento mediante estación meteorológica compuesta de una veleta y un anemómetro situada en la parte superior de la superestructura del buque.

- Par en el eje de la hélice y revoluciones:

El par del eje ha sido medido mediante torsiómetro con bandas extensiométricas situadas en el eje lo más cercano a la bocina posible. Los resultados son proporcionales al diámetro del eje elevado al cubo y al módulo de corte o cizalladura del acero. Las revoluciones del eje han sido registradas mediante célula fotoeléctrica.

La potencia de la hélice depende del par y las revoluciones y es corregida debido a las pérdidas ocasionadas por el rozamiento de los cojinetes entre la posición donde se mide y la hélice. Con una correcta calibración anterior y posterior a las pruebas, se puede obtener una precisión del $\pm 2\%$ en la medición del par.

- Velocidad y rumbo:

La velocidad y el rumbo se han determinado mediante señal GPS aplicando correcciones diferenciales cuando ha sido necesario. El ángulo de deriva ha sido calculado mediante la diferencia entre el rumbo de la brújula y el rumbo real sobre el terreno.

- Temperatura del agua, gravedad específica y presión atmosférica:

Estos parámetros se han determinado mediante los siguientes instrumentos de medida: un termómetro, un hidrómetro y un barómetro.

Observaciones para las pruebas de mar:

- Estado de la mar:

El estado de la mar es observado visualmente y verificado mediante el uso de datos empíricos.

- Actividad del timón y profundidad del agua.

Estos datos han sido observados mediante la propia instrumentación de navegación.

- Condición de carga:

Se ha tomado lectura de las marcas de calado del buque antes y después de las pruebas.

Análisis de los resultados de las pruebas de mar de velocidad:

Las pruebas de mar se han realizado mediante siete salidas o trayectos realizados en mar abierto. Los resultados han sido analizados a través de un programa informático mediante el cual se han realizado correcciones debido a los siguientes parámetros:

- a) Corriente
- b) Rozamiento de los cojinetes
- c) Diferencias de salinidad y temperatura respecto a los valores estándares.
- d) Diferencia con el desplazamiento del buque utilizado en el modelo de prueba
- e) Fuerzas del viento
- f) Resistencia del agua (corrientes)
- g) Otros parámetros

- a) Para el análisis de la corrección por efecto de la corriente se empleó el método propuesto por Prohaska (1963) que asume como constante el paso de la hélice durante las pruebas de mar y una variación monótona de la velocidad de un trayecto a otro.

$$K_Q = \frac{P_D * 75}{2 * \pi * \rho * n^3 * D^5}$$

Donde:

K_Q : Coeficiente de torsión

P_D : Potencia de la hélice (hp)

ρ : Gravedad específica del agua de mar (kg/m^3)

n : Revoluciones por segundo de la hélice (rps)

D : Diámetro de la hélice en metros (m)

$$J_s = \frac{V_s \pm C}{n * D} = \frac{V_{OBS}}{n * D}$$

Donde:

J_s : Coeficiente de avance del buque

V_s : Velocidad del buque (m/s)

C : velocidad de la corriente (kg/m^3)

n : Revoluciones por segundo de la hélice (rps)

D : Diámetro de la hélice en metros (m)

V_{OBS} : Velocidad del buque observada por GPS (m/s)

Estos valores son comparados con las características del modelo de diseño de la hélice en aguas abiertas para poder determinar la velocidad del flujo hacia la hélice.

$$V_A = J_{open} * n * D = V_s * (1 - W_Q)$$

Donde:

V_A : Velocidad del flujo a la hélice en aguas abiertas (m/s).

J_{open} : Coeficiente de avance para aguas abiertas en el modelo (m/s)

n : Revoluciones por segundo de la hélice (rps)

D : Diámetro de la hélice en metros (m)

V_s : Velocidad del buque (m/s)

W_Q : Coeficiente de fracción de estela

Posteriormente se representa la curva a lo largo del tiempo de los parámetros $V_s * W_Q \pm C$ para todos los trayectos de prueba, pudiendo determinar la corriente en la mitad de la distancia entre las curvas de los recorridos a favor y en contra de la corriente.

$$V_{OBS} - V_A = V_s \pm C - V_A = V_s * W_Q \pm C$$

De manera alternativa, la corriente puede ser calculada asumiendo un coeficiente delta de fracción de estela (ΔW_Q) constante. ΔW_Q es la diferencia entre el coeficiente de fracción de estela obtenido en el modelo (condiciones de diseño) y el obtenido de las mediciones reales en las pruebas de mar del buque.

- b) Para las pérdidas por fricción en los cojinetes del eje, normalmente se asume una pérdida entre el 1 y el 3 % del par a las máximas revoluciones de giro. La pérdida asumida debe ser proporcional al número de revoluciones en cada momento.
- c) Los resultados han sido corregidos conforme a una temperatura estándar de 15 °C y una salinidad de 3,5 %, La corrección de la viscosidad se ha calculado como la diferencia en resistencia de fricción y posteriormente convertida a un valor referente a la potencia de la hélice utilizando el valor de eficiencia total del análisis. La corrección para la gravedad relativa es proporcional a la desviación de este valor con el estándar fijado.
- d) Las diferencias en el desplazamiento del buque en las condiciones del modelo se han corregido mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_{D_{corr}} = \left(\frac{\text{Volumen del buque}}{\text{Volumen del modelo}} \right)^{2/3} * P_{D_{obs}}$$

$$P_{D_{corr}} = \left(\frac{\text{Superficie mojada del buque}}{\text{Superficie mojada del modelo}} \right) * P_{D_{obs}}$$

Donde:

$P_{D_{corr}}$: Potencia de la hélice corregida (hp).

$P_{D_{obs}}$: Potencia de la hélice observada (hp).

- e) Los resultados de las mediciones relativos a la dirección y la velocidad del viento han sido representados en contra de la velocidad y rumbo del buque para obtener valores absolutos. El viento se ha representado en función del tiempo y se ha determinado un valor medio razonable para ser utilizado en las correcciones.

Los coeficientes de resistencia del aire son necesarios para calcular las fuerzas del viento. Al no disponer de datos de pruebas en túnel de viento, se han utilizado los valores de referencias propuestos por Aage (1971). La corrección se ha determinado mediante la siguiente ecuación:

$$P_{D_{corr}} = \frac{5 * \rho_{aire} * V_{OBS} * AW_x}{g * 75 * \eta_{total}} * (V_{OBS}^2 * CW_x * VW_R^2 * CW_R)$$

Donde:

$P_{D_{corr}}$: Potencia de la hélice corregida (hp).

ρ_{aire} : Gravedad específica del aire (kg/m^3)

AW_x : Área frontal por encima el agua (m^2)

g : Gravedad (m^2)

η_{total} : Eficiencia total del modelo de prueba

W_Q : Coeficiente de fracción de estela

V_{OBS} : Velocidad del buque observada por GPS (m/s)

CW_x : Coeficiente del viento

VW_R : Velocidad relativa del viento (m/s)

CW_R : Coeficiente de la dirección relativa del viento.

- f) Las correcciones como resultado a la resistencia que ofrece el agua poco profunda han sido calculadas de acuerdo al método propuesto por Sounders (1957).
- g) Adicionalmente se realizaron correcciones referentes al ángulo de deriva y al ángulo del timón gracias a los datos proporcionados por el modelo de prueba.

La temperatura del enfriador de agua se mantuvo fija durante cada prueba con un valor medio de 36 °C. Al objeto de buscar aproximación a las pruebas realizadas en banco de pruebas (gráficos ...), el resto de parámetros a medir fueron tomados cuando las temperaturas estaban estabilizadas.

Referencias:

1. Prohaska, C. W.: "Trial Trip Analysis for Six Sister Ships".
Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium, Report N.º Hy-2. Agosto 1963.
2. Aeage, Christian: "Wind Coefficients for Nine Ship Models".
Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium, Report N.º A-3. Mayo 1963.
3. Sounders, Harold E.: "hydrodynamics in Ship Desing"
Vol. II, p. 389-407.

ANEXO III

ANEXO III

INFORME NOON REPORT BUQUE A (MMPP)

FOS Fleet Summary

										Distance Total [nm]		M/E Fuel efficiency [kg/nm]		M/E FC SP [t]		M/E Fuel efficiency [kg/nm]		M/E FC [t]		M/E FC berth [t]		
										Average:	19,18	1,39	71,76	1,04	85,36	0,32	0,03					
										Maximum:	#NOMBRE?	#NOMBRE?	#####	#####	#####	#####	#####					
										Values change due to filtering												
										Time SP [hh:mm]	Time Manoeuvre [hh:mm]	Distance Total [nm]	M/E FC Total [t]	M/E Fuel efficiency [kg/nm]	M/E FC SP [t]	M/E Fuel efficiency [kg/nm]	M/E FC [t]	M/E FC berth [t]	Nr. of trips			
										Filtered Average:	01:30	00:28	19,18	1,39	71,76	1,04	85,36	0,32	0,07	164		
										Filtered Max:	01:46	00:53	22,35	1,99	101,84	1,49	84,02	0,47	0,24			
										Filtered Min:	00:57	00:17	17,50	1,04	4,35	3,57	0,38	0,01				
										Total:										Manual Input		
From/To	Departure	Start SP	End SP	Arrival	Time SP	Time Manoeuvre [hh:mm]	Distance Total [nm]	M/E FC Total [t]	M/E Fuel efficiency [kg/nm]	M/E FC SP [t]	M/E Fuel efficiency [kg/nm]	M/E FC [t]	M/E FC berth [t]	Master	RPM	MEL	RPM	ME2				
Gbratar-Tanger Med	15/4/21 4:48	15/4/21 4:57	15/4/21 6:01	15/4/21 6:18	01:04	00:36	38,90	1,27	87,6	0,98	62,3	0,32	0,02	Manual des manut dis manut di								
Gbratar-Tanger Med	16/4/21 4:55	16/4/21 5:00	16/4/21 6:09	16/4/21 6:24	01:09	00:27	39,93	1,21	84,3	0,93	59,5	0,28	0,02	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	20/4/21 4:58	20/4/21 5:05	20/4/21 6:12	20/4/21 6:32	01:07	00:22	19,11	1,33	89,8	1,07	69,3	0,26	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	21/4/21 4:55	21/4/21 4:59	21/4/21 6:07	21/4/21 6:26	01:08	00:25	19,02	1,27	87,0	1,02	64,6	0,25	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	22/4/21 4:44	22/4/21 4:52	22/4/21 6:30	22/4/21 6:25	01:28	00:23	18,80	1,28	87,9	0,97	62,3	0,31	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	23/4/21 4:51	23/4/21 5:00	23/4/21 6:13	23/4/21 6:28	01:25	00:23	18,81	1,35	72,1	0,99	65,3	0,33	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	27/4/21 10:08	27/4/21 10:35	27/4/21 11:16	27/4/21 11:29	01:01	00:20	38,31	1,53	83,7	1,22	81,2	0,31	0,01	nv	MV	165	165					
Gbratar-Tanger Med	28/4/21 3:48	28/4/21 3:55	28/4/21 4:58	28/4/21 5:14	01:03	00:23	18,72	1,53	81,6	1,19	77,3	0,34	0,01	nv	MV	165	165					
Gbratar-Tanger Med	29/4/21 3:50	29/4/21 3:57	29/4/21 5:02	29/4/21 5:18	01:05	00:23	19,04	1,57	82,6	1,25	79,4	0,33	0,01	nv	MV	165	165					
Gbratar-Tanger Med	30/4/21 3:42	30/4/21 3:49	30/4/21 4:50	30/4/21 5:04	01:03	00:21	18,62	1,43	79,5	1,17	75,5	0,31	0,01	nv	MV	172	172					
Gbratar-Tanger Med	3/5/21 4:03	3/5/21 4:30	3/5/21 5:07	3/5/21 5:17	00:57	00:17	18,48	1,50	81,1	1,25	81,4	0,25	0,01	nv	MV	172	172					
Gbratar-Tanger Med	5/5/21 4:05	5/5/21 4:12	5/5/21 5:21	5/5/21 5:38	01:09	00:24	18,84	1,31	89,6	1,03	67,7	0,28	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	6/5/21 4:27	6/5/21 4:34	6/5/21 5:34	6/5/21 5:48	01:00	00:21	38,50	1,46	79,1	1,15	75,3	0,31	0,01	nv	MV	165	165					
Gbratar-Tanger Med	9/5/21 4:01	9/5/21 4:09	9/5/21 5:20	9/5/21 5:43	01:11	00:29	39,74	1,39	70,5	1,06	68,7	0,27	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	10/5/21 4:32	10/5/21 4:39	10/5/21 5:39	10/5/21 5:56	01:00	00:24	18,84	1,42	89,1	1,04	69,9	0,31	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	12/5/21 4:21	12/5/21 4:28	12/5/21 5:37	12/5/21 5:54	01:09	00:24	18,64	1,43	76,9	1,13	71,0	0,33	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	14/5/21 4:55	14/5/21 5:01	14/5/21 6:05	14/5/21 6:20	01:04	00:21	38,70	1,54	82,3	1,20	77,0	0,34	0,01	nv	GU	155	155					
Gbratar-Tanger Med	24/5/21 4:58	24/5/21 5:06	24/5/21 6:16	24/5/21 6:34	01:30	00:26	19,99	1,37	71,9	1,04	66,3	0,31	0,01	nv	DD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	26/5/21 5:01	26/5/21 5:08	26/5/21 6:12	26/5/21 6:34	01:27	00:25	19,61	1,42	72,6	1,09	69,2	0,31	0,01	nv	DD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	27/5/21 4:57	27/5/21 5:05	27/5/21 6:13	27/5/21 6:31	01:08	00:26	19,07	1,37	71,6	1,03	65,8	0,33	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	30/5/21 4:56	30/5/21 4:56	30/5/21 6:12	30/5/21 6:32	01:08	00:28	39,06	1,34	70,1	1,01	63,2	0,33	0,01	nv	KD	0	0					
Gbratar-Tanger Med	2/6/21 4:55	2/6/21 5:05	2/6/21 6:16	2/6/21 6:33	01:13	00:25	20,29	1,41	89,4	1,12	67,7	0,29	0,01	nv	KD	0	0					
Gbratar-Tanger Med	3/6/21 4:52	3/6/21 5:00	3/6/21 6:15	3/6/21 6:31	01:11	00:29	19,63	1,25	86,1	0,98	69,6	0,26	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	4/6/21 4:53	4/6/21 5:00	4/6/21 6:07	4/6/21 6:23	01:22	00:23	19,17	1,37	71,6	1,06	67,2	0,30	0,01	nv	KD	0	0					
Gbratar-Tanger Med	6/6/21 5:02	6/6/21 5:10	6/6/21 6:17	6/6/21 6:35	01:07	00:26	38,18	1,38	72,2	1,06	67,0	0,32	0,01	nv	KD	0	0					
Gbratar-Tanger Med	8/6/21 4:59	8/6/21 5:08	8/6/21 6:15	8/6/21 6:33	01:07	00:27	18,89	1,33	70,4	1,01	64,2	0,32	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	9/6/21 4:57	9/6/21 5:05	9/6/21 6:12	9/6/21 6:39	01:07	00:25	18,89	1,31	89,2	1,02	64,8	0,28	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	10/6/21 4:54	10/6/21 5:01	10/6/21 6:12	10/6/21 6:38	01:11	00:28	19,79	1,35	89,1	1,04	69,9	0,31	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	12/6/21 5:02	12/6/21 5:30	12/6/21 6:15	12/6/21 6:30	01:05	00:23	18,56	1,24	86,7	0,94	61,7	0,30	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	15/6/21 4:52	15/6/21 4:59	15/6/21 6:18	15/6/21 6:33	01:29	00:22	39,17	1,22	83,5	0,95	59,5	0,27	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	16/6/21 4:50	16/6/21 4:57	16/6/21 6:08	16/6/21 6:24	01:11	00:23	38,73	1,30	89,2	1,00	64,6	0,29	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	17/6/21 4:47	17/6/21 4:55	17/6/21 6:03	17/6/21 6:18	01:28	00:29	39,79	1,31	89,7	1,06	69,8	0,27	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	19/6/21 4:46	19/6/21 4:53	19/6/21 6:06	19/6/21 6:21	01:13	00:22	39,92	1,20	89,6	0,93	59,1	0,29	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	20/6/21 4:36	20/6/21 4:44	20/6/21 5:54	20/6/21 6:08	01:09	00:22	38,89	1,30	88,8	1,02	65,8	0,28	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	23/6/21 4:47	23/6/21 4:54	23/6/21 6:07	23/6/21 6:23	01:13	00:23	19,04	1,34	70,3	1,08	68,4	0,26	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	24/6/21 4:48	24/6/21 4:55	24/6/21 6:05	24/6/21 6:21	01:30	00:22	18,82	1,26	67,1	0,96	61,2	0,31	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	26/6/21 4:59	26/6/21 5:06	26/6/21 6:12	26/6/21 6:27	01:06	00:24	18,70	1,32	70,8	1,03	66,7	0,29	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	29/6/21 4:44	29/6/21 4:51	29/6/21 6:10	29/6/21 6:25	01:19	00:22	18,95	1,27	67,1	0,93	62,5	0,29	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	30/6/21 4:49	30/6/21 4:57	30/6/21 6:04	30/6/21 6:20	01:07	00:24	19,20	1,21	83,0	0,93	59,1	0,28	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	1/7/21 5:02	1/7/21 5:13	1/7/21 6:27	1/7/21 6:43	01:14	00:27	19,48	1,20	61,4	0,92	57,3	0,27	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	2/7/21 4:54	2/7/21 4:55	2/7/21 6:03	2/7/21 6:17	01:28	00:27	18,62	1,26	87,6	0,99	64,4	0,27	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	4/7/21 4:44	4/7/21 4:50	4/7/21 5:59	4/7/21 6:13	01:09	00:20	18,54	1,35	72,9	1,09	69,6	0,27	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	7/7/21 4:47	7/7/21 4:54	7/7/21 6:05	7/7/21 6:21	01:11	00:23	38,65	1,35	72,2	1,05	68,4	0,30	0,01	nv	MV	155	155					
Gbratar-Tanger Med	8/7/21 4:48	8/7/21 4:56	8/7/21 6:09	8/7/21 6:25	01:13	00:24	39,37	1,40	72,1	1,08	67,2	0,31	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	9/7/21 4:52	9/7/21 4:59	9/7/21 6:09	9/7/21 6:26	01:09	00:25	39,38	1,40	88,7	1,06	62,7	0,34	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	10/7/21 4:57	10/7/21 5:06	10/7/21 6:12	10/7/21 6:29	01:26	00:26	39,21	1,32	89,6	0,99	62,1	0,33	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	14/7/21 4:53	14/7/21 5:02	14/7/21 6:10	14/7/21 6:26	01:08	00:25	20,30	1,26	86,0	0,96	61,5	0,30	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	15/7/21 5:00	15/7/21 5:08	15/7/21 6:13	15/7/21 6:30	01:04	00:25	39,06	1,32	89,2	0,99	63,1	0,32	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	18/7/21 4:48	18/7/21 4:56	18/7/21 6:05	18/7/21 6:25	01:09	00:28	38,94	1,38	70,9	1,08	69,3	0,30	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	21/7/21 4:47	21/7/21 4:55	21/7/21 6:02	21/7/21 6:17	01:27	00:27	18,83	1,29	69,3	1,01	66,1	0,26	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	21/7/21 4:52	21/7/21 5:00	21/7/21 6:04	21/7/21 6:21	01:04	00:25	18,81	1,29	88,3	0,98	62,9	0,31	0,01	nv	KD	155	155					
Gbratar-Tanger Med	23/7/21 5:03	23/7/21 5:11	23/7/21 6:26	23/7/21 6:53	01:35	00:37	20,11	1,33	66,3	1,03	61,6	0,30	0,01	nv	KD	0	0					
Gbratar-Tanger Med	25/7/21 4:53	25/7/21 5:02	25/7/21 6:18	25/7/21 6:39	01:14	00:32	19,29	1,47	76,2	1,14	71,2	0,33	0,01	nv	GT	155	155					
Gbratar-Tanger Med	29/7/21 5:00	29/7/21 5:08	29/7/21 6:18	29/7/21 6:35	01:08	00:27	19,41	1,32	67,9	0,99	62,2	0,33	0,01	nv	GT	155	155					
Gbratar-Tanger Med	30/7/21 5:33	30/7/21 5:38	30/7/21 6:48	30/7/21 6:52	01:46	00:26	20,25	1,32	69,3	1,03	62,4	0,30	0,01	nv	GT	155	155					
Gbratar-Tanger Med	4/8/21 5:04	4/8/21 5:15	4/8/21 6:21	4/8/21 6:39	01:06	00:29	18,40	1,38	4,3	0,98	3,6	0,34	0,06	GT	155	155						
Gbratar-Tanger Med	5/8/21 5:11	5/8/21 5:21	5/8/21 6:27	5/8/21 6:45	01:06	00:28	18,99	1,39	74,9	1,04	68,0	0,29	0,06	AR	155	155						
Gbratar-Tanger Med	6/8/21 5:47	6/8/21 5:55	6/8/21 7:11	6/8/21 7:32	01:16	00:29	19,31	1,33	76,8	1,14	68,4	0,30	0,09									

Pax	Total Vehicles	Total Cargo	Total Container	Mean Draft [m]	Trim [m]	Wave Height SP	Avg SOG SP [kn]	Max SOG SP [kn]	Avg TWD SP [kn]	Avg TWS SP [kn]	Distance SP [nm]	M/E FCSP [kWh]	M/E Fuel efficiency	Distance Man [nm]	M/E FC Man [kWh]	Distance Man PDD [nm]	M/E FC Man PDD [kWh]	Distance Man PDA [nm]	M/E FC Man PDA [kWh]	
24	0	23	0	5.10	0.20	1	14.94	16.41	272.90	11.30	18.79	15.67	0.93	59.5	3.25	0.28	0.65	0.08	2.60	0.21
24	0	23	0	5.10	0.20	0.5	15.40	16.66	253.95	21.25	29.28	15.67	1.07	68.3	3.44	0.26	0.73	0.08	2.71	0.18
24	0	22	0	4.95	0.10	1	15.42	16.22	269.80	14.24	21.34	15.82	1.02	64.6	3.20	0.25	0.59	0.07	2.61	0.18
22	0	21	0	5.15	0.10	1	12.88	15.63	251.23	21.36	30.76	15.49	0.97	62.3	3.30	0.31	0.64	0.09	2.67	0.22
34	0	31	0	5.15	0.10	1	14.90	15.72	88.18	21.13	26.81	15.54	1.03	66.3	3.27	0.33	0.61	0.09	2.66	0.24
17	0	16	0	5.00	0.20	1.5	15.85	17.49	245.84	26.72	30.77	15.06	1.22	81.2	3.25	0.31	0.70	0.08	2.56	0.23
27	0	27	0	5.10	0.40	1	16.26	17.19	279.55	14.06	21.44	15.34	1.19	77.3	3.58	0.34	0.71	0.08	2.67	0.26
28	0	28	0	5.10	0.40	1.5	16.22	16.96	270.79	15.25	20.25	15.68	1.25	79.4	3.36	0.33	0.68	0.08	2.68	0.25
27	0	25	0	5.00	0.20	0.5	16.60	17.42	285.60	12.10	17.04	15.47	1.17	75.5	3.15	0.31	0.56	0.09	2.49	0.22
27	0	24	0	5.00	0.40	0.5	16.91	18.04	255.14	13.43	20.53	15.32	1.25	81.4	3.16	0.25	0.74	0.08	2.41	0.17
30	0	30	0	5.05	0.30	1.5	14.53	15.97	96.64	14.27	21.75	15.67	1.03	65.7	3.16	0.28	0.57	0.08	2.60	0.20
30	0	31	0	5.00	0.20	0.3	16.43	17.20	162.42	9.92	14.31	15.27	1.15	75.3	3.23	0.31	0.70	0.10	2.53	0.22
32	0	28	0	4.90	0.40	0.5	14.86	15.86	276.81	14.58	18.62	15.59	1.06	68.1	3.31	0.27	0.74	0.08	2.57	0.19
33	0	30	0	5.00	0.20	0.5	16.43	17.08	298.46	13.14	18.47	15.14	1.15	75.7	3.33	0.35	0.67	0.09	2.65	0.26
31	0	30	0	4.90	0.40	0.5	15.01	15.76	279.07	17.10	22.66	15.59	1.11	71.0	3.04	0.33	0.57	0.09	2.47	0.24
16	0	15	0	5.00	0.20	0	15.60	16.65	275.50	20.55	26.60	15.60	1.20	77.0	3.10	0.34	0.59	0.09	2.51	0.24
15	0	14	0	4.97	0.30	1.5	14.83	15.61	265.09	16.92	24.90	15.98	1.06	66.3						
8	0	8	0	4.91	0.30	1.5	15.26	16.97	69.52	19.56	26.23	16.33	1.09	66.9						
11	0	10	0	4.91	0.31	2	15.33	16.49	73.49	14.16	21.19	15.68	1.03	65.8						
15	0	12	0	5.10	0.57	0	14.59	15.47	84.66	13.29	22.50	15.94	1.01	63.2						
8	0	7	0	4.98	0.35	0	14.78	15.66	264.33	13.32	21.14	16.99	1.12	65.7	3.30	0.29	0.65	0.08	2.65	0.21
18	0	15	0	5.04	0.44	0	14.01	15.91	135.15	7.92	11.60	16.50	0.98	59.5	2.94	0.26	0.45	0.07	2.48	0.19
15	0	14	0	5.16	0.45	0	15.39	16.21	232.47	5.47	9.09	16.05	1.08	67.2	3.13	0.30	0.61	0.09	2.51	0.21
7	0	6	0	4.92	0.39	0	15.61	16.23	136.55	10.54	14.39	15.83	1.06	67.0	3.34	0.32	0.65	0.10	2.69	0.22
8	0	6	0	4.98	0.43	0	14.85	16.01	85.04	13.15	22.61	15.67	1.01	64.2	3.22	0.32	0.70	0.09	2.52	0.23
13	0	13	0	4.99	0.04	0	15.27	16.12	144.24	11.56	17.82	15.82	1.02	64.8	3.08	0.28	0.57	0.10	2.51	0.18
13	0	10	0	4.85	0.10	0.3	15.07	16.01	123.79	8.62	14.54	16.35	1.04	63.9	3.27	0.31	0.65	0.09	2.61	0.22
12	0	10	0	4.75	0.10	0.3	14.98	15.68	169.94	6.42	8.92	15.26	0.94	61.7	3.30	0.30	0.65	0.08	2.65	0.21
10	0	9	0	4.85	0.10	0.5	12.24	15.50	275.52	17.45	32.46	15.99	0.95	59.5	3.18	0.27	0.67	0.08	2.51	0.18
13	0	11	0	4.75	0.10	0.5	13.36	15.03	254.13	20.31	28.18	15.53	1.00	64.6	3.20	0.29	0.69	0.07	2.51	0.22
11	0	10	0	4.75	0.10	0.5	14.19	15.13	242.93	22.14	30.93	15.50	1.04	66.8	3.29	0.27	0.71	0.08	2.58	0.19
5	0	4	0	4.75	0.10	0.5	13.37	15.06	288.12	14.53	19.87	15.48	0.91	59.1	3.44	0.29	0.75	0.08	2.69	0.21
13	0	9	0	0.00	0.00	0.5	13.67	15.57	286.10	22.32	30.17	15.55	1.02	65.8	3.34	0.28	0.70	0.07	2.64	0.21
3	0	3	0	4.75	0.10	0.5	14.04	15.08	257.41	20.69	33.54	15.77	1.08	68.4	3.27	0.28	0.64	0.08	2.63	0.19
5	0	5	0	4.75	0.10	1	14.25	15.61	260.97	19.69	24.57	15.63	1.06	67.1	3.20	0.31	0.69	0.10	2.51	0.21
8	0	8	0	4.85	0.10	0.5	15.17	15.92	111.04	16.30	17.48	15.48	1.03	66.7	3.22	0.29	0.74	0.08	2.48	0.21
9	0	6	0	4.75	0.30	1	12.36	15.48	259.06	22.59	38.98	15.66	0.98	62.5	3.19	0.29	0.66	0.08	2.54	0.21
5	0	5	0	4.65	0.10	0.5	14.69	15.45	123.07	10.04	13.80	15.80	0.93	59.1	3.40	0.28	0.72	0.09	2.68	0.18
12	0	10	0	4.90	0.20	0.4	13.30	15.98	110.13	7.92	14.72	16.09	0.92	57.3	3.38	0.27	0.79	0.08	2.60	0.20
5	0	4	0	4.80	0.20	0.5	14.19	15.38	266.13	18.22	25.91	15.50	0.99	64.1	3.12	0.27	0.64	0.07	2.48	0.19
2	0	2	0	4.65	0.10	1	14.29	15.69	248.42	21.82	34.11	15.49	1.08	69.4	3.03	0.27	0.57	0.07	2.45	0.20
8	0	7	0	4.80	0.20	0.5	14.33	15.30	259.25	20.18	26.59	15.36	1.05	68.4	3.29	0.30	0.67	0.07	2.62	0.22
5	0	4	0	4.87	0.39	0.5	14.64	15.57	286.99	19.17	26.13	16.09	1.08	67.2	3.28	0.31	0.76	0.10	2.52	0.21
19	0	8	0	4.90	0.40	1.5	14.86	16.09	35.41	19.69	24.57	15.63	1.06	67.1	3.20	0.31	0.66	0.08	2.60	0.20
11	0	9	0	4.90	0.31	1.5	15.13	15.98	64.19	19.79	27.97	15.93	0.99	62.1	3.27	0.33	0.73	0.10	2.54	0.23
7	0	7	0	4.89	0.32	0.5	14.77	15.80	127.50	11.21	17.37	15.59	0.96	61.5	3.51	0.30	0.82	0.09	2.68	0.21
14	0	12	0	4.95	0.32	0.5	14.80	16.02	63.70	18.66	26.01	15.75	0.99	63.1	3.31	0.32	0.63	0.10	2.68	0.23
15	0	11	0	4.93	0.33	0.5	14.02	15.54	271.66	24.94	38.22	15.63	1.08	69.3	3.31	0.30	0.63	0.08	2.68	0.22
6	0	5	0	4.86	0.32	0.5	14.27	16.02	249.98	18.78	30.52	15.26	1.01	66.1	3.42	0.29	0.66	0.09	2.76	0.19
10	0	6	0	4.87	0.32	0.5	15.18	15.85	262.92	7.73	13.66	15.46	0.98	63.2	3.35	0.31	0.71	0.09	2.64	0.22
9	0	10	0	4.89	0.33	0	14.19	16.22	81.54	9.80	17.66	16.71	1.03	61.6	3.40	0.30	0.72	0.09	2.68	0.21
2	0	2	0	4.83	0.32	0.5	13.98	16.20	290.17	23.73	36.33	15.97	1.14	71.2	3.32	0.33	0.74	0.10	2.59	0.23
6	0	4	0	4.85	0.32	0.5	14.65	15.83	64.84	14.45	23.11	15.94	0.99	62.2	3.47	0.33	0.74	0.10	2.73	0.23
4	0	2	0	4.84	0.31	0.5	n.d.	0.00	n/DIV/0	n/DIV/0	0.00	16.48	1.03	62.4	3.86	0.30	81.01	5.15	-75.15	-4.85
5	0	4	0	4.84	0.32	1	14.70	15.25	260.67	6.20	11.83	275.47	0.98	3.6	43.02	0.34	15.34	0.11	27.68	0.23
12	0	10	0	4.78	0.65	0.3	13.77	15.35	263.64	22.02	34.66	15.25	1.04	68.0	3.34	0.29	0.75	0.07	2.59	0.23
9	0	9	0	4.93	0.15	0.5	13.41	15.22	276.29	26.13	39.85	16.62	1.14	68.4	3.29	0.30	0.64	0.09	2.65	0.20
1	0	1	0	4.72	0.03	0.7	13.58	14.87	258.56	25.40	38.66	16.00	1.10	68.8	3.26	0.29	0.64	0.07	2.62	0.22

ANEXO IV

ANEXO IV

CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS



Article

The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain)

Vanessa Durán-Grados, Rubén Rodríguez-Moreno, Fátima Calderay-Cayetano, Yolanda Amado-Sánchez, Emilio Pájaro-Velázquez, Rafael A. O. Nunes, María C. M. Alvim-Ferraz, Sofia I. V. Sousa and Juan Moreno-Gutiérrez

Special Issue

Emission Control in Sustainable Transportation System for Better Environment

Edited by








Dr. Bowen Xiao, Dr. Binbin Peng and Dr. Xiaodan Guo



<https://doi.org/10.3390/su141912507>

Article

The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain)

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

¹ Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, University of Cádiz, 11519 Cádiz, Spain

² LEPABE—Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

* Correspondence: juan.moreno@uca.es

† Current affiliation: Thermal Engines Department Polígono Río San Pedr, University of Cádiz, 11510 Puerto Real, Spain.

Abstract: Gaseous and particulate emissions from oceangoing ships have a significant effect on the quality of air in cities. This study estimates mainly the influence of NO_x, SO_x, and particulate matter (PM_{2.5}) on air quality in the Strait of Gibraltar (Spain) using the authors' own Ship's Energy and Emissions Model (SEMEM) and the California Puff air quality model (CALPUFF) in 2017. The Algeciras Bay Industrial Zone recorded the highest levels of pollutants, and the Palmones area was identified as a major hotspot, with mean daily ship-sourced SO_x concentrations >215 µg/m³, while the highest concentrations of PM₁₀ reached 8.5 µg/m³ inside the Strait, and the mean yearly contribution of PM_{2.5} reached 0.86 µg/m³ in the city of Algeciras. The incidence of maritime traffic emissions on the levels of particle emissions, CO, HC, NMVOC, and CO₂ reached values of up to 20–25% in all the receivers defined in the study.

Keywords: shipping emissions; air quality calculation model; GHG; emissions calculation model; pollutants from ships



Citation: Durán-Grados, V.; Rodríguez-Moreno, R.; Calderay-Cayetano, F.; Amado-Sánchez, Y.; Pájaro-Velázquez, E.; Nunes, R.A.O.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Sousa, S.I.V.; Moreno-Gutiérrez, J. The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain). *Sustainability* **2022**, *14*, 12507. <https://doi.org/10.3390/su141912507>

Academic Editors: Bowen Xiao, Binbin Peng and Xiaodan Guo

Received: 8 August 2022

Accepted: 28 September 2022

Published: 30 September 2022

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



Copyright: © 2022 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 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Background and Introduction

Ships' propulsion systems have a negative impact on air pollution [1,2] and GHG emissions [3] and long-term effects on human health and environmental quality. Overall deaths due to these effects are estimated to have risen to 87,000 deaths per year from 2007 to 2013 [4].

Air pollution, both indoors and outdoors, is the largest environmental risk to public health (diseases and conditions that make us physically unwell, such as infections, allergies, tiredness, headaches, respiratory issues [5], etc.). It produces both short-term and long-term illness and potentially reduces life expectancy. Air quality is determined by the environmental conditions and the amount of particles and polluting gases that the air contains. The maritime transport sector, which is one of the least-regulated anthropogenic sources of emissions, contributes significantly to air pollution, particularly in coastal areas near major ports. In this sector, a recent study [6] estimated that maritime transport emissions accounted for 3500 premature deaths from PM_{2.5} and O₃ across the USA in 2013. This study is a contribution to any current or future epidemiological analyses carried out in the area of the Strait of Gibraltar, which can be considered an area of major scientific interest. Epidemiological studies are based both on the results of emission models in which pollutants (from ships in this case) are quantified one by one and serve as input data for the air quality model. The extensive epidemiology literature has also documented the association of fine particulate air pollution with mortality. Most of this research consists of time series studies of the effects of particle exposures experienced over a relatively few

days before death. Three follow-up cohort studies in the United States and a recent pilot study from Europe evaluated the effects of long-term average ambient concentrations of fine particles and other air pollutants over many years [7].

On the other hand, European maritime emissions are a significant share of global ship emissions of GHGs; shipping emissions contribute to local air quality problems; and at a global scale, ship emissions of both air pollutants and GHGs have a net cooling effect [8].

Therefore, the promotion of sustainable shipping and sustainable maritime development is one of the major priorities of the IMO in the coming years [9]. The reason for this is that the future growth of ship traffic will affect the composition of the atmosphere, contributing to worsening air quality. These emissions are also generated while vessels are at berth and affect not only major ports, but also medium- and small-scale ports [10]. Approximately 13%, 12%, and about 3–4% of total global emissions of NO_x , SO_x [11], and PM [12], respectively, are emitted by ships. Most (87%) of these are attributed to international shipping activity [13], while domestic shipping was responsible for about 9% of total shipping emissions of CO_2 and fishing for around 4%. Examining the makeup of the shipping fleet reveals that 55% was generated by container ships, bulk carriers, and oil tankers. Note that the available time data do not have discounted periods of Saharan intrusion dust. However, very little is known about the magnitude and effects of air pollution due to marine vessels [14].

Comparing European Union (EU) standards and the new World Health Organization (WHO) air quality guidelines published in 2021, the former are less strict than the latter. In 2019, 97% of the EU urban population was exposed to concentrations of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) above the new WHO guideline level of $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [15].

On this topic, it is also relevant to take into account the results of a study applied for the Iberian Peninsula [16] showing that in the case of the Strait of Gibraltar, CO_2 , NO_x , sulfate, and SO_x had the highest values: 1330, 24, 1.03, and $11.6 \text{ t yr}^{-1} \text{ km}^{-2}$, respectively. For these reasons, the authors decided to use two different models from those of said study and exclusively applied them to the Strait of Gibraltar area.

Since the world-famous Strait of Gibraltar has a long maritime history and currently plays a crucial role in shipping trade, we have considered it necessary to conduct the air quality study presented here. The Strait is one of the main shipping traffic lanes in Europe (115,708 ships/year; 2017; www.gibraltarport.com). In this case, only 92,000 ships were analysed. This study provides new information (air quality) on this traditional water lane (no war ships, fishing vessels, dredgers, tugs, or auxiliary boats).

An epidemiological study from our own published research paper [17], applied to the Iberian Peninsula, concluded that in terms of premature mortality per 100,000 inhabitants, NO_2 air pollution contributed to 36.5 deaths, 48.8 deaths, and 57.5 deaths in Barcelona, Valencia, and the Strait of Gibraltar, respectively. For all-cause mortality, $\text{PM}_{2.5}$ emissions from ships contributed to 12.5, 20.4, and 24.1 deaths per 100,000 inhabitants in Barcelona, Valencia, and the Strait of Gibraltar, respectively.

In this study, the resulting concentrations will be applied to the epidemiological model. There are 16 air quality monitoring stations in the area studied, whose accuracy of measurements will largely depend on weather conditions. However, this study quantifies emissions by emission focus (ship) first. These results are introduced as input data in the air quality model in such a way that the resulting measures of the stations can differentiate those that come from the marine transport and those that come from other industries. This is the most significant contribution of this study. In the section "Results and Discussion", the different situations are analysed. To develop this study, it is necessary to use two models: (a) an emission model and (b) an air quality model. SENEM's own model for calculating emissions and CALPUFF (both are described in Supplementary Material) for air quality were used in this study.

In order to obtain results that are as true to life as possible, this study uses the SENEM model to quantify emissions from ships. This model, unlike other models, such as STEEM [18] or STEAM [13], quantifies the power delivered by propulsion engines taking

into account all the parameters which influence the resistance to the ship advancing. The complete procedures are defined in the SENEM model published by the authors of this paper [19].

In the case studied in this manuscript, based on the SENEM, such assessments are based on air quality dispersion models in which the amounts of primary pollutants (CO_2 , CH_4 , N_2O , NMVOC, NO_x , SO_x , CO, and PM) emitted directly into the atmosphere are calculated using 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 [20].

The main objective of this study is to quantify the influence of emissions from ships on air quality for each emitted pollutant across the Strait of Gibraltar, the limits of which are shown in Figure 1. In order to describe the maritime traffic in the Strait of Gibraltar in detail, the first step was to develop an inventory of shipping routes and their characteristics observed ship-by-ship. Databases from the Automatic Identification System (AIS) crossed with the Lloyd's Register Fairplay allowed for the highly accurate reconstruction of almost 100% of the routes of high-tonnage vessels cruising in the Strait of Gibraltar during 2017.



Figure 1. Strait of Gibraltar—area studied.

To quantify the concentration of each pollutant in the air, the second step involved the use of the CALPUFF chemistry–transport model. CALPUFF simulated all the scenarios envisaged in the Strait of Gibraltar.

2. Methodology

Inventories of shipping emissions were compiled using shipping traffic data from 2017 obtained from the Automatic Identification System (AIS); 92,000 individual ship movements were recorded. In this case, primary pollutants (CO_2 , CH_4 , N_2O , NMVOC, NO_x , SO_x , CO, and PM) were studied.

The Strait of Gibraltar is a narrow stretch of sea that links the Atlantic Ocean to the Mediterranean Sea and is bordered by the Iberian Peninsula to the north and Morocco to the south (Figure 1). It covers an extension of 2640 km^2 and is about 60 kilometres long and between 14 and 44 kilometres wide. The total population in the region in 2017 was about 2,349,738 inhabitants, distributed across 4 provinces: Ceuta, 77,389; Gibraltar, 32,194; Tangier, 1,000,000; and Cádiz, 1,240,155.

2.1. Emissions Model

To study the contribution of maritime and port traffic in the area of the Bay of Algeciras and the Strait of Gibraltar on air quality in the province of Cádiz, it is necessary to first identify the emission sources to consider and quantify their corresponding emissions. To minimise uncertainties, producing an emissions inventory that is as accurate as possible is very important. For these reasons, it is necessary to know the total amount of emissions attributable to shipping activities [21].

Four main shipping routes have been identified that could affect pollutant levels in the province of Cádiz (Figure 1):

- Strait of Gibraltar: ships crossing the Strait in an east–west–east direction (without docking or heading for port).
- Algeciras Port: passenger ships, container ships, and tankers (manoeuvring and berthing in port).
- Tarifa–Tangier shipping lane: boats sailing the Strait in a north–south–north direction, covering the Tarifa–Tangier route.
- Ceuta Port: boats crossing the strait in a north–south–north direction, covering the Ceuta Port route.

Therefore, for the definition of the scenario to be simulated, emissions are considered under normal conditions for the months of March to October and under adverse weather conditions for the months of January, February, November, and December.

This study uses the SENEM model [19], using g/kWh as the base unit of emission factors. SENEM takes into consideration a range of factors affecting the value of the main engine load factor, such as hull and propeller maintenance and the efficiency of the propulsion system, waves, current, and the wind. The SENEM model calculates the emission from ships in all modes of navigation: cruising, manoeuvring, anchoring, and at berth.

This model was validated and compared with the Ship Traffic Energy and Environmental Model, STEEM [18], and the Ship Traffic Emissions Assessment Model, STEAM [13], in a study applied to domestic traffic conducted in the Strait of Gibraltar [19].

In this sense, the ships at berth also emitted pollutants due to hoteling activities. The high concentration of ships in port areas means that they receive a significant amount of these emissions. This is the case of Algeciras, the most important port of the Strait of Gibraltar.

Emissions during 2017 were modelled using data of the pollutants emitted calculated by the SENEM model. This model quantifies the power delivered by propulsion engines, taking into account, among other factors, the weather conditions (Equation (S1), Supplementary Material).

During most months of the year, the weather conditions did not affect the energy consumption, but for 120 days mainly in January, February, November, and December, the weather conditions were very strong, as the wind rose shows (Figure 2). The speed loss was of one knot, and for this reason, to maintain the same speed, the power delivered increased, as did fuel consumption and emissions.

As an example, a comparative study developed [22] on six ships in the Strait of Gibraltar showed the total energy consumption (kWh) both for calm water and taking into account the worst weather, hull, and propulsion system performance conditions. Differences of up to 20% were found in some cases.

In this case, by applying the SENEM model, a one knot loss in speed for each ship was considered when Equation (S1) [19] was applied.

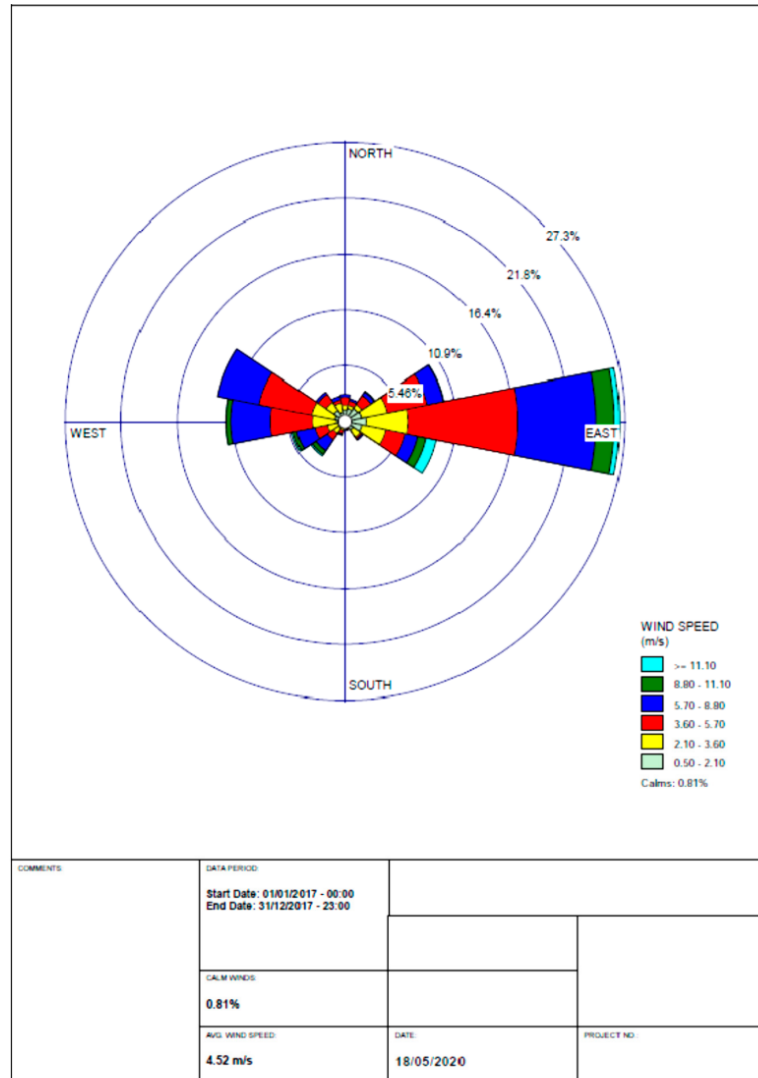


Figure 2. Wind rose in the Strait of Gibraltar during 2017.

2.2. Air Quality Model

To calculate the effects of emissions from these ships, dispersion models can be used. For example, ISCT3 and AERMOD v.5.2 [23], SMOKE [24], CMAQ-DDM, and SILAM, [25]. The CALPUFF model was used in this case (Figure 3). The methodology followed to perform the study is described in the Supplementary Materials.

The physical and chemical processes are simulated using CALPUFF, which uses mathematical and numerical techniques to simulate the dispersion of air pollutants into the atmosphere and how they react. They are based on meteorological inputs and source information from ships' emissions. However, there is considerable uncertainty surrounding both the modelling of air quality and the compilation of inventories of shipping emissions.

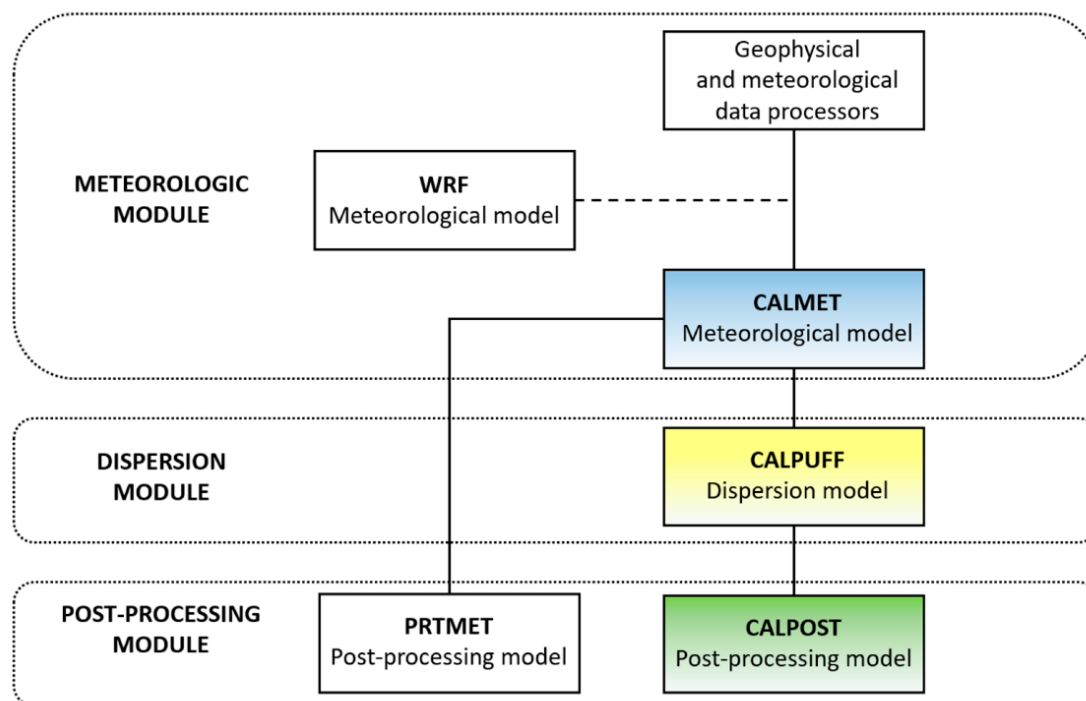


Figure 3. CALPUFF air quality model.

With regards to the epidemiology model, a pilot study from Europe involving a long follow-up period reported an increase in mortality among subjects subjected to high ambient concentrations of fine particles and other air pollutants over many years [7].

The dispersion of ship emissions was modelled using CALPUFF [26], one of the preferred models of the U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) [27].

The model was designed for two scenarios: considering shipping emissions and not considering shipping emissions and had a horizontal resolution of 500 m × 500 m (long–lat) and an hourly data output for 2017. Emissions from other sources were obtained from the Andalusian Air Quality Monitoring and Control Network Stations (RVCCAA) [28].

To design an air quality model to simulate how seafaring traffic contributes to the levels of pollutants emitted, the following steps were followed: (a) selection of the studied area, (b) characterization of the meteorological conditions in these area, (c) selection of the topography and use of the land, (d) characterization of the sources of emissions, and (e) definition of the interest points (discrete receptors, Figure 4).

The meteorology in the Strait of Gibraltar area plays a fundamental role, particularly in the dispersion of pollutants. Thus, to achieve a more accurate measurement, a dispersion model together with a meteorological module (CALMET) was used. The methodology used is described in the Supplementary Material.

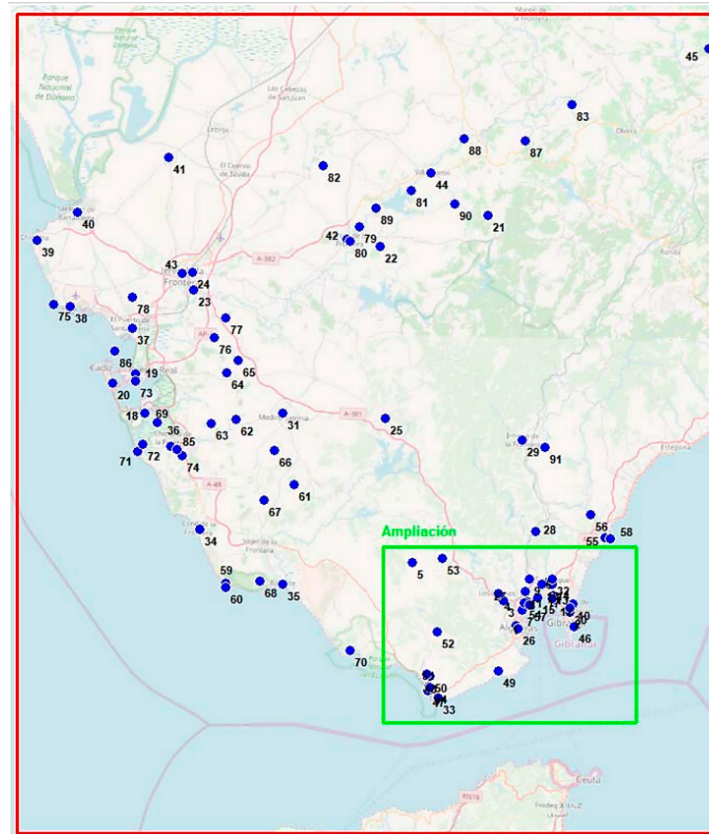


Figure 4. Discrete receptor locations.

3. Results and Discussion

3.1. Quantifying Pollutant Emissions

To avoid confusion or redundancy between the models used (SENEM and CALPUFF), it is convenient to consider that the SENEM model data are only used as input data for the CALPUFF model.

Once the CALPUFF dispersion model was calibrated, the contribution of pollutant emissions from maritime traffic to air quality levels in the study area was measured. The pollutants analysed in the study, based on the fuels usually used by ships, are SO_x , NO_x , CO, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, HC, NMVOC, and CO_2 . In order to show the increase in these pollutants, the CALPUFF model was configured both considering and not considering shipping emissions.

It would be appropriate to note that the highest contributions of shipping emissions to the concentration levels were recorded during spring and summer (18% higher than during winter, Table 1). This pattern seems to be related to the increase in ship traffic during the summer, which led to increased contribution to the pollutant concentration levels.

Table 1. Seasonal amounts of emitted air pollutants from shipping in the Strait of Gibraltar, including ships at berth, in 2017 (t yr⁻¹).

Pollutant.	Spring	Summer	Autumn	Winter	Total
NO _x	4150.2	4686.1	4058.1	3866.4	16,760.8
SO _x	1195.5	1350	1169	1113.9	4828.4
PM ₁₀	144.6	163.25	141.36	134.69	583.9
PM _{2.5}	23.15	26.14	22.63	21.58	93.5
CO ₂	207,643.6	234,462.4	202,979.5	193,561.6	838,647.1
CO	184.26	208	180.1	171.84	744.2
HC	167	191.9	166.1	161.6	686.6
NM VOC	146.9	168.8	146.1	142.2	604

For calculating auxiliary engine power, Table S6 (Supplementary Material) was used.

The SENEM model used the Kwon method [29] to predict speed loss due to added resistance in abnormal weather conditions (irregular waves and wind) when Equation (S1) [19] was applied. The Kwon model has the advantage that it is easy and practical to use.

The total results for the Strait of Gibraltar can be found in Table 2. This table shows the emissions of PM_{2.5}, SO_x, and NO_x for eight months of calm water conditions and four months in which the weather was bad. In 2017, 590 t/year of PM_{2.5}, 4830 t/year of SO_x, and 16,760.8 t/year of NO_x were emitted in the Strait of Gibraltar.

Table 2. Pollutant emissions from maritime transport in the Strait of Gibraltar in 2017 (kt).

Course	CO ₂	NO _x	CO	HC	PM _{2.5}	SO _x	NM VOC
Calm water	550	10.95	0.48	0.44	0.39	3.16	0.68
Bad weather	289	5.75	0.26	0.24	0.20	1.67	0.36
TOTAL	839	16.7	0.74	0.68	0.59	4.83	1.04

3.2. Concentrations Contributed by Ship Emissions Based on the Air Quality Model

For generation of the wind field, Calmet has a micrometeorology module that describes the characteristics of the boundary layer on land and on water. Therefore, the following data were required to run the Calmet meteorological model (the meteorological model is described in Supplementary Material).

In order to evaluate exceedances and/or non-compliances of all the pollutants from ships, the annual mean concentrations for each inland grid cell were compared to reference standards and guidelines (WHO and EU).

The highest concentrations when shipping emissions were included (considering all grid cells of the domain) were as follows: for SO_x: 29.8, 12.9, and 1.3 µg/m³ (percentile 99.73 hourly, percentile 99.18 daily, and annual average, respectively) for the La Línea de la Concepción area; for NO_x: 8.7 to 99.6 µg/m³ (annual average and percentile 99.79 hourly, respectively) in the western area of the Strait; for PM₁₀: 0.43 µg/m³ annual average and 0.86 hourly percentile 90.41 and 0.21 µg/m³ annual average for PM_{2.5} in the western area of the Strait.

The results showed (µg/m³) no exceedances of the EU annual limit standard for SO_x, NO_x, PM_{2.5}, or PM₁₀. Figure 5 shows how the emissions from maritime transport contributed to the average hourly, daily and annual emission levels of SO_x, NO_x, PM_{2.5} and PM₁₀ in the Algeciras Bay.

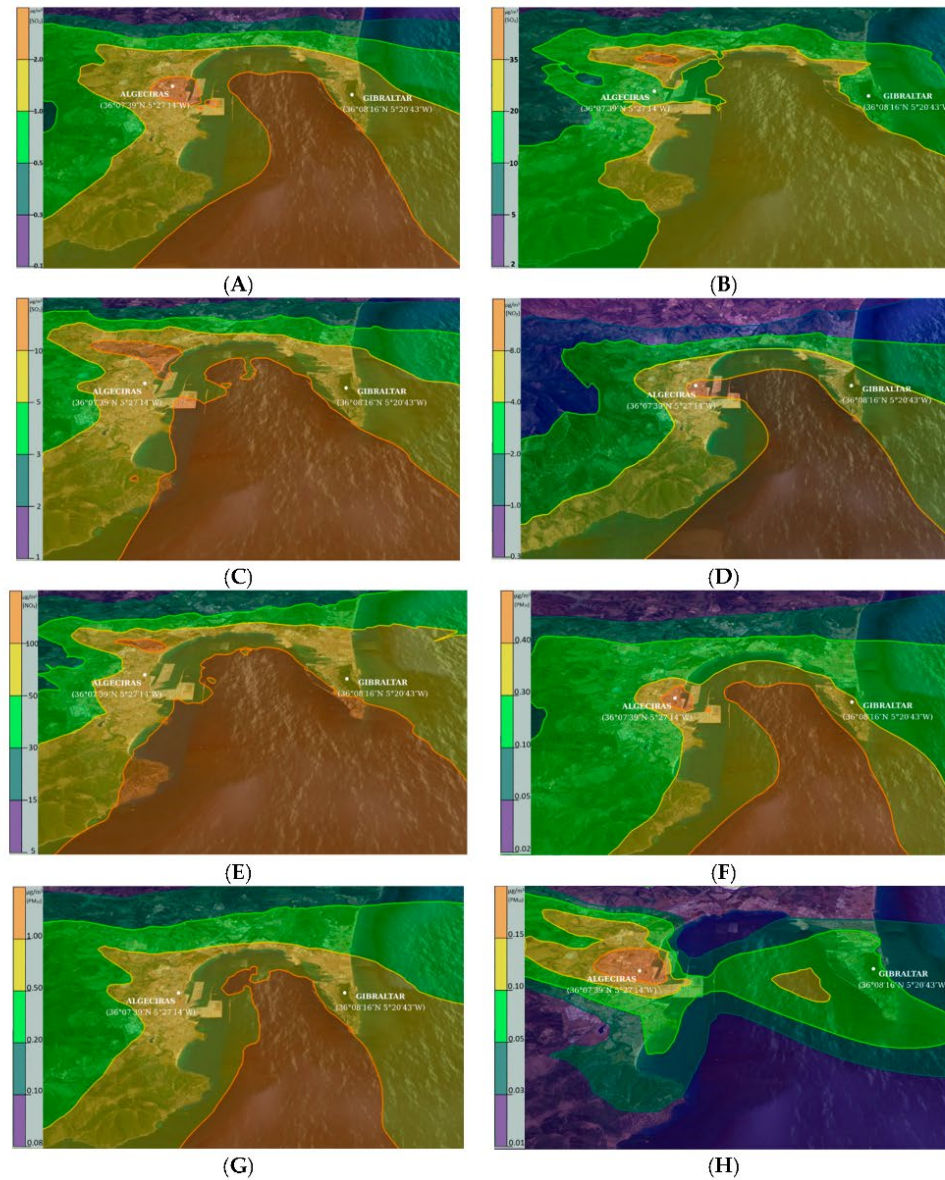


Figure 5. Contribution of emissions from maritime transport to mean annual emission levels ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Algeciras Bay. (A) Mean annual SO_2 . (B) Mean hourly SO_2 values, percentile 99.73. (C) Mean daily SO_2 values, percentile 99.18. (D) Mean annual NO_x . (E) Hourly NO_x values, percentile 99.79. (F) Mean annual PM_{10} . (G) Mean daily PM_{10} values, percentile 90.41 (H) Mean annual $\text{PM}_{2.5}$.

3.3. Comparison with Actual Values Measured at Air Quality Stations

To calculate the contribution of maritime traffic emissions to air quality levels in the study area, the results obtained with the CALPUFF dispersion model were compared to the RVCCAA air quality stations. This analysis has been performed only for the pollutants measured at the stations: SO_x , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, and CO.

The annual average levels recorded at the stations represent the sum of the contributions of all the emission sources in the environment (industry, road traffic, maritime traffic, domestic sector, etc.). Therefore, the difference between the value measured at the station and the value simulated by the dispersion model for the contribution of maritime traffic corresponds to the contribution of other environmental sources.

The percentiles are a statistical parameter that represents hourly or daily values. This means that the measure of the percentile recorded at the station is not the sum of the contributions of the percentiles of all sources of the environment, as is the case in the annual average. Tables 3–5 present the actual results measured at air quality stations compared to the results of the model developed for the simulation of the dispersion of emissions from maritime traffic.

Table 3. Compared SO_x results of both simulated and measured marine traffic (µg/m³), 2017.

Air Quality Monitoring Stations	Annual Average		Percentile 99.73 1 h		Percentile 99.18 24 h	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Algeciras EPS	12	3	52	15	26	7
La Línea	11	1	49	21	23	7
Los Barrios	8	1	37	28	22	8
E1: Colegio Los Barrios	12	1	46	18	26	6
E2: Alcornocales	8	0	34	2	22	1
E3: Colegio Carteya	7	0	33	10	21	3
E4: Rinconillo	11	1	48	30	20	13
E5: Palmones	12	1	39	24	22	9
E6: Estación de FFCC San Roque	7	0	74	10	29	3
E7: El Zabal	12	1	42	17	24	5
Cortijillos	9	1	93	17	48	5
Campamento	8	1	89	21	40	6
Economato	10	1	87	21	42	5
Escuela de hostelería	6	0	45	13	23	3
Guadarranque	21	1	217	20	95	7
Madrevieja	4	0	75	10	27	3
Puente Mayorga	13	1	111	25	52	6
San Fernando	9	0	15	1	14	0
Río San Pedro	-	1	-	1	-	0
Av. Marconi	4	9	8	1	7	0
Prado del Rey	5	0	18	0	15	0
Arcos	3	0	8	1	22	0
Cartuja	4	0	10	1	7	0
Jerez Chapín	7	0	13	1	11	0
Limit value National Decree 102/2011	20		350		125	

Note: (1) Measured. (2) Marine traffic simulated.

Table 4. Compared NO_x and NO₂ results of both simulated and measured marine traffic (µg/m³), 2017.

Air Quality Monitoring Stations	Annual Average NO _x		Annual Average NO ₂		Percentile 99.79 1 h Annual Average NO ₂	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Algeciras EPS	44	9	33	9	119	60
La Línea	35	5	23	4	105	76
Los Barrios	22	3	16	2	89	79
E1: Colegio Los Barrios	18	1	11	1	71	36
E2: Alcornocales	10	0	8	0	53	8
E3: Colegio Carteya	20	1	14	1	99	30
E4: Rinconcillo	39	5	23	5	110	100
E5: Palmones	38	4	24	4	115	71
E6: Estación de FFCC San Roque	26	1	16	1	98	26
E7: El Zabal	33	3	22	3	108	67
Cortijillos	25	2	16	2	113	39
Campamento	19	4	12	3	88	68
Economato	17	3	10	2	58	58
Escuela de hostelería	28	1	15	1	84	35
Guadarranque	31	3	22	3	126	66
Madrevieja	17	1	12	1	87	31
Puente Mayorga	-	4	-	3	-	71
San Fernando	18	0	13	0	77	7
Río San Pedro	18	0	13	0	76	6
Av. Marconi	25	0	15	0	85	7
Prado del Rey	11	0	6	0	17	1
Arcos	11	0	7	0	28	2
Cartuja	17	0	10	0	63	4
Jerez Chapín	28	0	18	0	110	4
Limit value National Decree 102/2011	30		40		200	

Note: (1) Measured. (2) Marine traffic simulated.

The results obtained after the application of the dispersion model are shown in Table 3, showing the annual mean, the 99.18 percentile daily, and the 99.73 percentile of the mean hourly values of the emission of SO_x.

Regarding the 99.73 percentile of the average hourly levels of SO_x emission caused by maritime traffic emissions, it should be noted that the maximum value achieved at stations of the Air Quality Network was 29.8 µg/m³ at station E4: Rinconcillo. Moreover, in the receptors located in the inhabited areas of the study area, the highest value reached was 23.2 µg/m³ in the receptor located in the town of La Línea de la Concepción. In both cases, these receptors are located close to the coastline and therefore close to the emission sources. Note that both values are far from the limit value of 350 µg/m³ established in Royal Decree 102/2011.

The measure of the percentile recorded at the station is not the sum of the contributions of the percentiles of all sources of the environment, which means that the maximum impact caused by the source will depend on the direction of the wind. This justifies the differences

of measures between the El Rinconcillo and Economato stations under southerly wind conditions (Table 4).

Table 5. Compared PM₁₀ and PM_{2.5} results of simulated and measured marine traffic ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2017.

Air Quality Monitoring Stations.	Annual Average PM ₁₀		Percentile 99.41 24 h PM ₁₀		Annual Average PM _{2.5}	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Algeciras EPS	27	0.4	42	0.9	9	0.2
La Línea	30	0.3	43	0.7	24	0.1
Los Barrios	20	0.2	27	0.5	16	0.1
E1: Colegio Los Barrios	21	0.1	31	0.3	-	0.0
E2: Alcornocales	18	0	27	0.1	8	0.0
E3: Colegio Carteya	23	0.1	36	0.3	-	0.0
E4: Rinconcillo	25	0.3	39	0.8	-	0.1
E5: Palmones	26	0.2	40	0.6	-	0.0
E6: Estación de FFCC San Roque	-	0.1	-	0.2	-	0.0
E7: El Zabal	28	0.2	43	0.5	-	0.0
Cortijillos	-	0.1	-	0.4	-	0.0
Campamento	-	0.2	-	0.6	-	0.0
Economato	-	0.1	-	0.5	-	0.0
Escuela de hostelería	-	0.1	-	0.3	-	0.0
Guadarranque	-	0.2	-	0.6	-	0.0
Madrevieja	-	0.1	-	0.3	-	0.0
Puente Mayorga	-	0.2	-	0.6	-	0.0
San Fernando	23	0	34	0	10	0.0
Río San Pedro	30	0	44	0	-	0.0
Av. Marconi	25	0	38	0	8	0.0
Prado del Rey	28	0	41	0	-	0.0
Arcos	28	0	45	0	-	0.0
Cartuja	30	0	48	0	-	0.0
Jerez Chapín	27	0	44	0	-	0.0
Limit value National Decree 102/2011	40		50		25	

Note: (1) Measured. (2) Marine traffic simulated.

As with SO_x, the stations most affected by NO_x and NO₂ emissions from maritime traffic are located in the Bay of Algeciras. In terms of annual averages, the stations that reflect a greater contribution of maritime traffic (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) are Algeciras EPS, E4: Rinconcillo, and La Línea, with Algeciras EPS recording the greatest contribution—9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of NO_x and NO₂—against the actual values measured at that station of 44 and 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. For the percentile 99.79 hourly NO₂, note that this is the maximum hourly number of 18 (since the Royal Decree 102/2011, allows 18 exceedances). The stations most affected in this case are E4: Rinconcillo, Los Barrios, and La Línea. E4: Rinconcillo is the station with the greatest impact, with 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (compared to 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ measured by the station). As Table S7 (Supplementary Material) shows, there are some stations for which the levels of emissions caused by maritime traffic (simulated with CALPUFF) are very similar to the actual measurements, so it can be concluded that there may be time episodes in which maritime traffic is exclusively responsible for the high values (for example, in E4:

Rinconcillo and Economato). This can happen with southerly winds, during which neither station would be affected by emissions from other sources of the environment.

Uncertainties in particle measurement from combustion are higher than for other pollutants. The PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission factor values applied in this study depend on the sulphur content of the fuel and the state of combustion. In this study, the optimum combustion conditions and the most favourable conditions for sulphur content in the fuel were assumed. This could be the reason why the particulate emission factor values provided by maritime transport are so low.

In the east and west domains, primary shipping emissions contributed $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per year to the $PM_{2.5}$ in the atmosphere and $9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to the SO_x concentrations. Figure 6 shows the evolution of the average hourly values of SO_x emissions.

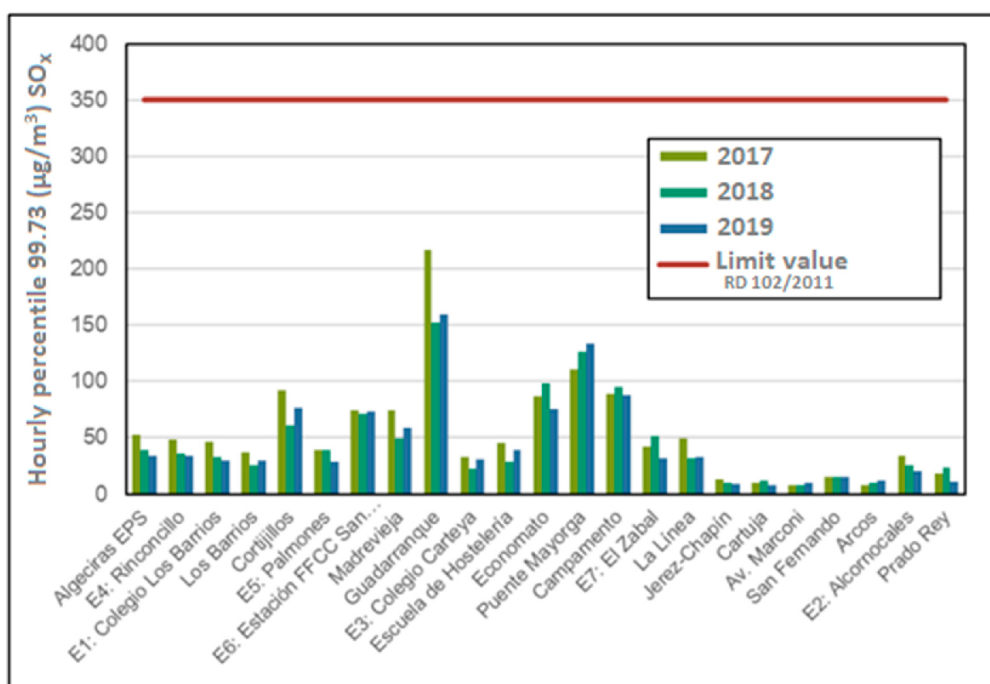


Figure 6. Evolution of 99.73 percentile of the average hourly values of SO_x emissions.

The contributions in the area of the Strait of Gibraltar, were more than 90% for NO_x and SO_x , 25–50% for $PM_{2.5}$, and 20–35% for PM_{10} .

3.4. Discussion

A comparison of the results obtained for SO_x , NO_x , PM_{10} , $PM_{2.5}$, and CO pollutants with the CALPUFF dispersion model at RVCCAA air quality stations is then made against the actual values measured at those stations to calculate the contribution of maritime traffic emissions to air quality levels in the study area.

Similar results have been obtained for other similar studies carried out in the Mediterranean Sea [30–32].

As regards the annual average levels recorded at the stations, it must be noted that they represent the sum of the contributions of all emission sources in the environment (industry, road traffic, maritime traffic, domestic sector, etc.).

Air quality impact assessment methodology leads to inevitable uncertainties, and all steps from the emissions model to air pollution were included in this study. Nonetheless, some overestimations may occur, thus results must be analysed with caution. Regarding the exposure assessment, the most significant uncertainties came from the choice of the pollutants, the general shape of the Emissions factors values and their applicability from each place and the population exposed. The air pollution is a known complex mix of gases, but in this case, only those from shipping were studied. The nature of emissions from ships describes PM_{2.5} fraction as the most widely used and accepted indicator, but in this study, the air quality impacts associated with exposure to NO₂ were also evaluated.

Therefore, the difference between the measured value at the station and the simulated value with the dispersion model for the contribution of maritime traffic would correspond to the contribution of the other sources.

A series of conclusions can be drawn from their analysis. The levels of SO_x emissions caused by maritime traffic emissions evaluated at stations of the Air Quality Monitoring and Control Network, inhabited areas, and areas of ecological interest remain below the limits established in Royal Decree 102/2011 for the protection of human health and ecosystems. The contribution of emissions from ships to the average annual levels of emission of SO_x is very small compared to the limit value of 20 µg/m³ established by this decree. As can be seen, the maximum value recorded in discrete receptors located in ecological areas is 1.3 µg/m³ in the “Eastern Strait SCI” receptor.

Finally, regarding the influence on the daily averages of SO_x, the maximum percentile caused by the ships is 30 µg/m³ at station E4: Rinconcillo for the stations of the Air Quality Network and 7.3 µg/m³ in the receptor located in the municipality of La Línea de la Concepción for receptors located in inhabited areas. These values are far from the limit value of 125 µg/m³ established in the legislation in force.

With regards to particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5}, it should be noted that the levels found at air quality stations as a result of emissions from maritime traffic are lower than expected compared to the limit values established in Royal Decree 102/2011 for both the annual average (40 µg/m³) and the 90.41 daily percentile (50 µg/m³) of PM₁₀ and the annual average of PM_{2.5} (25 µg/m³). The stations that present the greatest contribution from the maritime sector (in µg/m³) to the average annual levels of emission of PM₁₀ are Algeciras EPS, E4: Rinconcillo, and La Línea. However, in all cases, the simulated values are below 0.5 µg/m³ compared to the actual levels measured at stations of around 18–30 µg/m³. For the 90.41 daily percentile of PM₁₀, this is the maximum daily number of 35 (since the Royal Decree 102/2011 allows 35 exceedances of the daily limit value of 50 µg/m³). The stations most affected in this case are also Algeciras EPS, E4: Rinconcillo, and La Línea, presenting simulated values in each case below 1 µg/m³ (the actual values measured at these stations are between 27–48 µg/m³). Finally, after analysing the results of the average annual levels of PM_{2.5} in the air quality stations, those most affected by maritime traffic were found to be the same as for PM₁₀ (including also Los Barrios), with estimated levels at all these stations below 0.3 µg/m³ compared to the actual levels measured between 8 and 24 µg/m³. As an example, Figure 5 shows the SO_x concentrations. Palmones was identified as a major hotspot with mean daily ship-sourced concentrations >215 µg/m³. On the other hand, the highest concentrations of PM₁₀ from ships reached 8.5 µg/m³ inside the Strait.

3.5. Uncertainties and Limitations

The complexity of chemical transport models is very significant, and for this reason, it is difficult to specify all the sources of uncertainties; this is due to the appropriateness of the meteorological data, emission inventory, and the imperfections of chemical mechanisms and physical processes in the modelling system corresponding to the emissions inventory, which produces a major cause of uncertainty. In the case of the SENEM model, unlike other known models, this uncertainty is limited to emission factors (specific fuel oil consumption, fuel type, fuel sulphur content, etc.). Power prediction (weather contributions, fouling, squat,

sea currents, auxiliary engine power profiles, engine load estimation, power transmission, propeller properties), is controlled in the SENEM model.

On the other hand, uncertainties concerning emission factors may be larger for products of incomplete combustion, such as CO, non-methane volatile organic compounds (NMVOCs), OC, EC, and CO₂ or NO_x because these are strongly related to engine load, engine generation, and service history. All these circumstances have been taken into account in this study [13].

Keeping the uncertainties of the atmospheric dispersion simulations in mind, efforts were made to run the CALPUFF model as accurately and in as detailed a manner as possible. Moreover, although it has been possible to identify variations in emissions and concentrations near port areas, the resolution that was used was too coarse to make a detailed analysis of emissions and concentrations inside port areas. The CALPUFF model considers the O₃ loss by NO_x titration, the sunlight effects, and the NO_x-to-VOC ratio that promotes O₃ production, which is an approximation allowing for the minimization of the effects of the non-linear O₃ chemistry.

4. Conclusions

Following the implementation of the model and the subsequent analysis of the results obtained, the following conclusions are drawn:

- The levels of pollutants recorded at existing air quality stations in the province of Cádiz during the period 2017–2019 are below the limit values set in the Spanish Royal Decree 102/2011; European Commission, 2018 [33]; and WHO, 2018 [34] concerning the improvement of air quality for the protection of human health, vegetation, and ecosystems.
- The “Bahía de Algeciras Industrial Zone (ES0104)” recorded the highest levels and the greatest differences from the other zones (“Zona Bahía de Cádiz (ES0124)”; “Zonas rurales (ES0123)”) for SO_x.
- The pollutants presenting the highest levels of emission as a result of maritime traffic in the area of the Bay of Algeciras and the Strait of Gibraltar are SO_x and NO₂.
- In the specific case of the annual average values of SO_x and NO₂, the contribution of maritime traffic to air quality levels may be around 20–25% for the most susceptible receptors, especially in the area of Algeciras. In the case of the percentile analysis, maritime traffic can have a significantly greater impact, especially in the case of NO₂.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/su141912507/s1>, Figure S1: RVCCAA stations present in the province of Cádiz; Figure S2: Ozone station locations; Figure S3: Routes and line points studied; Figure S4: Location of the weather stations considered in the dispersion model; Table S1: Characteristics of the air quality monitoring stations “Algeciras Bay industrial area”; Table S2: Characteristics of the air quality monitoring stations “Cádiz Bay area”; Table S3: Characteristics of the air quality monitoring stations “rural area”; Table S4: Baseline Emission Factors (g/kWh) for main and auxiliary engines; Table S5: Air quality stations that record ozone values; Table S6: Main and auxiliary engines power and load factors by ship type in cruising mode; Table S7: Specification WRF model. References [35–47] are cited in the supplementary materials.

Author Contributions: J.M.-G. and V.D.-G.: conceptualization, methodology, writing—original draft, funding acquisition, supervision. R.R.-M. and F.C.-C.: methodology, formal analysis. Y.A.-S. and E.P.-V.: investigation. R.A.O.N.: air quality model. M.C.M.A.-F. and S.I.V.S.: conceptualization and data curation. V.D.-G.: head of the project. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Consejería de Salud (Andalusian Government) and FEDER, grant number PI-0094-2017. Project “The influence of Maritime Traffic on Human Health. Proposal of a new model for calculating mortality and morbidity in the province of Cádiz (Spain)”. And funded by National funds through FCT/MCTES (PIDDAC), grand number LA/P/0045/2020 (ALiCE) and UIDB/00511/2020-UIDP/00511/2020 (LEPABE). And also funded by FEDER funds through

COMPETE2020-Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and by national funds (PIDDAC) through FCT/MCTES, grand number POCI-01-0145-FEDER-032201 (EMISSIP).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Cullinane, K.; Cullinane, S. Atmospheric Emissions from Shipping: The Need for Regulation and Approaches to Compliance. *Transp. Rev.* **2013**, *33*, 377–401. [CrossRef]
- Eyring, V.; Isaksen, I.S.A.; Bernsten, T.; Collins, W.J.; Corbett, J.J.; Endresen, O.; Stevenson, D.S. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmos. Environ.* **2010**, *44*, 4735–4771. [CrossRef]
- Crist, P. Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential from International Shipping (No. 2009-11). OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Paper. 2009. Available online: <http://hdl.handle.net/10419/68758> (accessed on 7 August 2022).
- Winebrake, J.J.; Corbett, J.; Green, E.H.; Lauer, A.; Eyring, V. Mitigating the Health Impacts of Pollution from Ocean-going Shipping: An Assessment of Low-Sulfur Fuel Mandates. *Environ. Sci. Technol.* **2009**, *43*, 4776–4782. [CrossRef] [PubMed]
- World Health Organization. Air Pollution. Available online: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 (accessed on 7 August 2022).
- Caiazza, F.; Ashok, A.; Waitz, I.A.; Yim, S.H.L.; Barrett, S.R. Air pollution and early deaths in the United States. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005. *Atmospheric Environ.* **2013**, *79*, 198–208. [CrossRef]
- Laden, F.; Schwartz, J.; Speizer, F.E.; Dockery, D.W. Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* **2006**, *173*, 667–672. [CrossRef] [PubMed]
- EEA. Report Highlights Shipping's Impact on Air Quality and Climate Change. 2013. Available online: <https://sdg.iisd.org/news/eea-report-highlights-shippings-impact-on-air-quality-and-climate-change/> (accessed on 7 August 2022).
- IMO. Prevention of Air Pollution from Ships. 2017. Available online: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> (accessed on 7 August 2022).
- Viana, M.; Amato, F.; Alastuey, A.; Querol, X.; Moreno, T.; Dos Santos, S.G.; Hecce, M.D.; Fernández-Patier, R. Chemical Tracers of Particulate Emissions from Commercial Shipping. *Environ. Sci. Technol.* **2009**, *43*, 7472–7477. [CrossRef] [PubMed]
- Smith, T.W.; 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 2014*; International Maritime Organization: London, UK, 2015.
- Klimont, Z.; Kupiainen, K.; Heyes, C.; Purohit, P.; Cofala, J.; Rafaj, P.; Borken-Kleefeld, J.; Schöpp, W. Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon. *Atmos. Chem. Phys.* **2017**, *17*, 8681–8723. [CrossRef]
- Jalkanen, J.-P.; Johansson, L.; Kukkonen, J. A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas in 2011. *Atmospheric Chem. Phys.* **2016**, *16*, 71–84. [CrossRef]
- Mueller, D.; Uibel, S.; Takemura, M.; Klingelhoefer, D.; Groneberg, D.A. Ships, ports and particulate air pollution—An analysis of recent studies. *J. Occup. Med. Toxicol.* **2011**, *6*, 1–6. [CrossRef]
- European Environment Agency. Air Quality in Europe. 2021. Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/air-quality-in-europe-2021> (accessed on 7 August 2022).
- 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.I.V. Shipping emissions in the Iberian Peninsula and the impacts on air quality. *Atmos. Chem. Phys.* **2020**, *20*, 9473–9489. [CrossRef]
- Nunes, R.A.; Alvim-Ferraz, M.C.; Martins, F.G.; Peñuelas, A.L.; Durán-Grados, V.; Moreno-Gutiérrez, J.; Jalkanen, J.-P.; Hannuniemi, H.; Sousa, S.I. Estimating the health and economic burden of shipping related air pollution in the Iberian Peninsula. *Environ. Int.* **2021**, *156*, 106763. [CrossRef] [PubMed]
- Sarvi, A.; Fogelholm, C.-J.; Zevenhoven, R. Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 1. Influence of engine operation mode and turbocharger. *Fuel Process. Technol.* **2008**, *89*, 510–519. [CrossRef]
- Moreno-Gutiérrez, J.; Durán-Grados, V. Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: Towards zero uncertainties. *Sci. Total Environ.* **2020**, *750*, 141471. [CrossRef] [PubMed]
- 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. [CrossRef]
- Miola, A.; Ciuffo, B.; Marra, M.; Giovine, E. *Analytical Framework to Regulate Air Emissions from Maritime Transport*; JRC European Commission National Environmental Research Institute: Luxembourg, 2010. [CrossRef]
- Durán-Grados, V.; Amado-Sánchez, Y.; Calderay-Cayetano, F.; Rodríguez-Moreno, R.; Pájaro-Velázquez, E.; Ramírez-Sánchez, A.; Sousa, S.; Nunes, R.; Alvim-Ferraz, M.; Moreno-Gutiérrez, J. Calculating a Drop in Carbon Emissions in the Strait of Gibraltar (Spain) from Domestic Shipping Traffic Caused by the COVID-19 Crisis. *Sustainability* **2020**, *12*, 10368. [CrossRef]

23. US EPA. *Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data, February 2000*; US EPA: Washington, DC, USA, 2010.
24. Fung, F.; Zhu, Z.; Becque, R.; Finamore, B. *Prevention and Control of Shipping and Port Air Emissions in China*; Natural Resources Defense Council: New York, NY, USA, 2014.
25. Sofiev, M.; Vira, J.; Kouznetsov, R.; Prank, M.; Soares, J.; Genikhovich, E. Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin. *Geosci. Model Dev.* **2015**, *8*, 3497–3522. [CrossRef]
26. Guideline on Air Quality Models, Appendix W to 40 CFR Part 51. Available online: <https://www.epa.gov/scram/2017-appendix-w-final-rule> (accessed on 7 August 2022).
27. Rood, A.S. Performance evaluation of Aermot, Calpuff, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset. *Atmos. Environ.* **2014**, *89*, 707–720. [CrossRef]
28. RVCCAA. Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire de Andalucía. Available online: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/atmosfera/la-calidad-del-aire/red-de-vigilancia-y-control-de-la-calidad-del-aire-de-andalucia> (accessed on 7 August 2022).
29. Kwon, Y.J. Speed loss due to added resistance in wind and waves. *Nav. Archit.* **2008**, *3*, 14–16.
30. Bardouki, H.; Liakakou, H.; Economou, C.; Sciare, J.; Smolik, J.; Ždímal, V.; Eleftheriadis, K.; Lazaridis, M.; Dye, C.; Mihalopoulos, N. Chemical composition of size-resolved atmospheric aerosols in the eastern Mediterranean during summer and winter. *Atmos. Environ.* **2003**, *37*, 195–208. [CrossRef]
31. Eleftheriadis, K.; Colbeck, I.; Housiada, C.; Lazaridis, M.; Mihalopoulos, N.; Mitsakou, C.; Smolik, J.; Zdímal, V. Size distribution, composition and origin of the submicron aerosol in the marine boundary layer during the eastern Mediterranean “SUB-AERO” experiment. *Atmos. Environ.* **2006**, *40*, 6245–6260. [CrossRef]
32. Piazzola, J.; Mihalopoulos, N.; Canepa, E.; Tedeschi, G.; Prati, P.; Zampas, P.; Bastianini, M.; Missamou, T.; Cavaleri, L. Characterization of aerosols above the Northern Adriatic Sea: Case studies of offshore and onshore wind conditions. *Atmos. Environ.* **2016**, *132*, 153–162. [CrossRef]
33. European Commission. Air Quality Standards. 2018. Available online: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed on 7 August 2022).
34. WHO. Ambient (Outdoor) Air Quality and Health. 2018. Available online: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed on 27 January 2022).
35. Entec UK Limited. *Quantification of Emissions from Ships Associated with Ship Movements between Ports in the European Community*; European Commission: Luxembourg, 2002.
36. U.S. Environmental Protection Agency. Category 3 Commercial Marine Vessel 2017 Emissions Inventory. (see Methodology Documentation for EPA’s Commercial Marine Emissions Estimates). Available online: <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2017-national-emissionsinventory-nei-data> (accessed on 7 August 2022).
37. Samulski, M. *Estimation of Particulate Matter Emissions Factors for Diesel Engines on Ocean-Going Ships*; US EPA: Washington, DC, USA, 2017.
38. Starcrest Consulting Group. Port of Long Beach, 2019. San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report. Available online: <https://www.portoflosangeles.org/environment/air-quality/air-emissionsinventory> (accessed on 7 August 2022).
39. IVL Svenska Miljöinstitutet/IVL Swedish Environmental Research Institute. *Ship Fuels and Energy Efficiency Improvements*; IVL Svenska Miljöinstitutet AB: Göteborg, Sweden, 2004.
40. US EPA. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2012. Available online: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2012> (accessed on 7 August 2022).
41. MEPC 63/23; Annex 8, 2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships. IMO: London, UK, 2012.
42. Kristensen, H.O. *Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines*; Project no. 2010–56, Emissions be slut-nings støtte system, Work Package 2, Report n^o. 05; Technical University of Denmark: Kongens Lyngby, Denmark, 2012.
43. Kunz, P.; Gorse, P. Development of high-speed engines for natural gas operation in tugs. In Proceedings of the Tugology ‘13, London, UK, 14–15 May 2013.
44. MARINTEK; Nielsen, J.B.; Stenersen, O. *Emission Factors for CH₄, NO_x, Particulates, and Black Carbon for Domestic Shipping in Norway*; Revision 1, Report MT22 A 10-199; Norwegian Marine Technology Research Institute: Trondheim, Norway, 2010.
45. CALPUFF. *Dispersion Model (Version 5): A User’s Guide*; Earth Tech, Inc.: Concord, MA, USA, 2000.
46. Turner, D.B. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*; USEPA, ASRL: Research Triangle Park, NC, USA, 1970.
47. Morris, R.E.; Kessler, R.C.; Douglas, S.G.; Styles, K.R.; Moore, G.E. *Rocky Mountain Acid Deposition Model Assessment: Acid Rain Mountain Mesoscale Model (ARM3)*; U. S. Environmental Protection Agency, Atmospheric Sciences Research Laboratory: Research Triangle Park, NC, USA, 1988.



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, Yolanda Amado-Sánchez, Fátima Calderay-Cayetano, Rubén Rodríguez-Moreno, Emilio Pájaro-Velázquez, Antonio Ramírez-Sánchez, Sofia I. V. Sousa, Rafael A. O. Nunes, Maria C. M. Alvim-Ferraz and Juan Moreno-Gutiérrez



<https://doi.org/10.3390/su122410368>

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.I.V.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: 11 December 2020



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.

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.

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, ² engine load factor applied by Starcrest Vessel Boarding Program, ³ Max. speed ($V_{reference}$),

⁴ Max. Draught (t_{ref}).

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):

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

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 $n = 3.5$ [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 $\left(\frac{t_{transient}}{t_{ref}}\right)^{\left(\frac{2}{3}\right)}$ 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. $P_{\text{delivered}}$ 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 Algeiras 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 Daily¹		6214	0.0755	0.275	1.84	2.52	21.96	99.93	3.33
TOTAL Daily²		121,486	1.466	5.34	15	20.6	428.8	1932.9	64.1
TOTAL¹		559,260	6.80	24.75	166.30	227.32	1976.4	8993.70	299.7
TOTAL²		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]:

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

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	NM VOC	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.

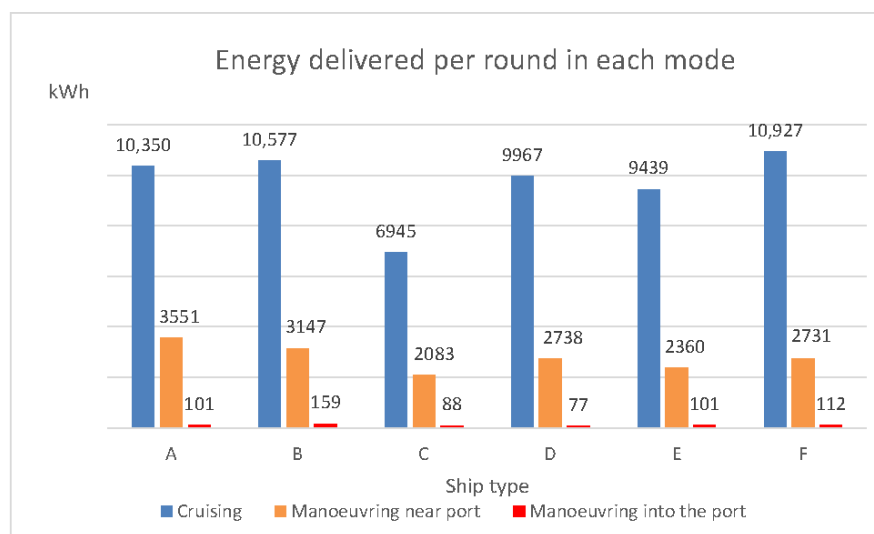
**Figure 1.** Energy delivered from the main engine (ME) (kWh) per round trip, and mode.

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.

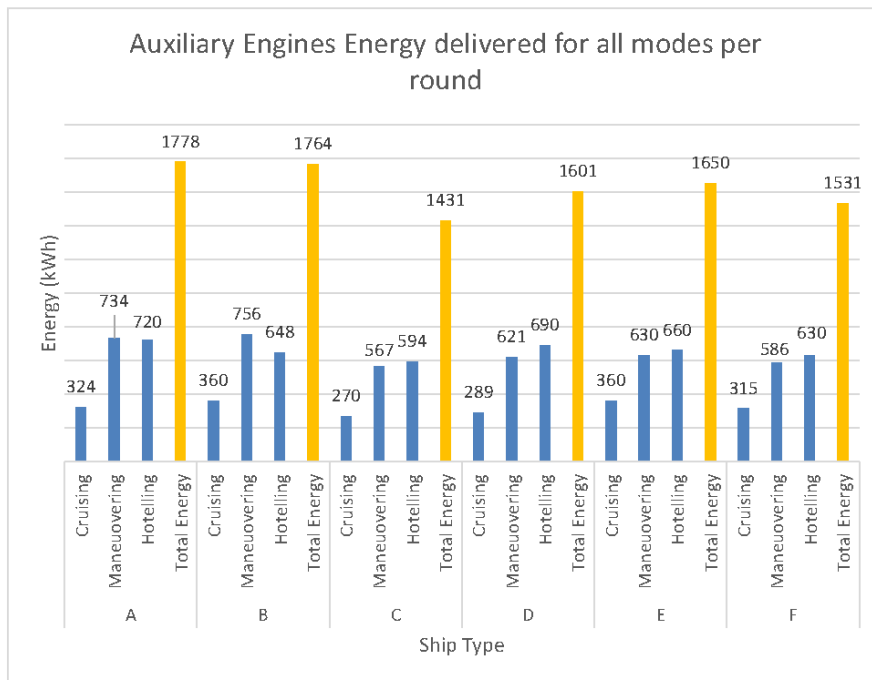


Figure 2. Energy delivered from the AE (kWh) per ship, round trip, and mode.

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

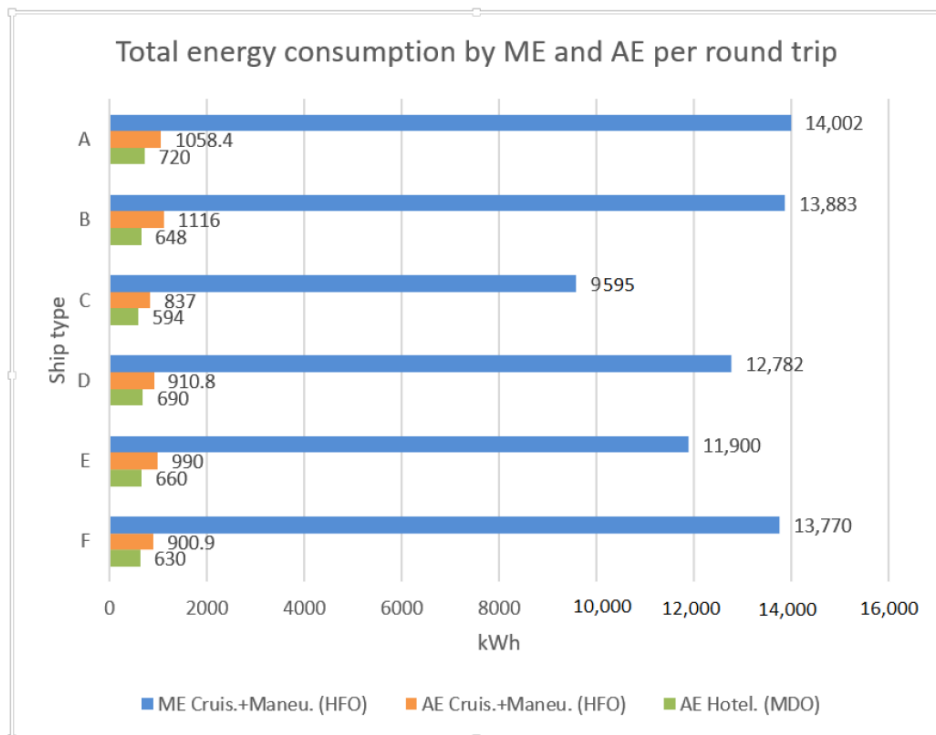


Figure 3. Total energy per round trip in calm conditions for the ME and AE (kWh).

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).

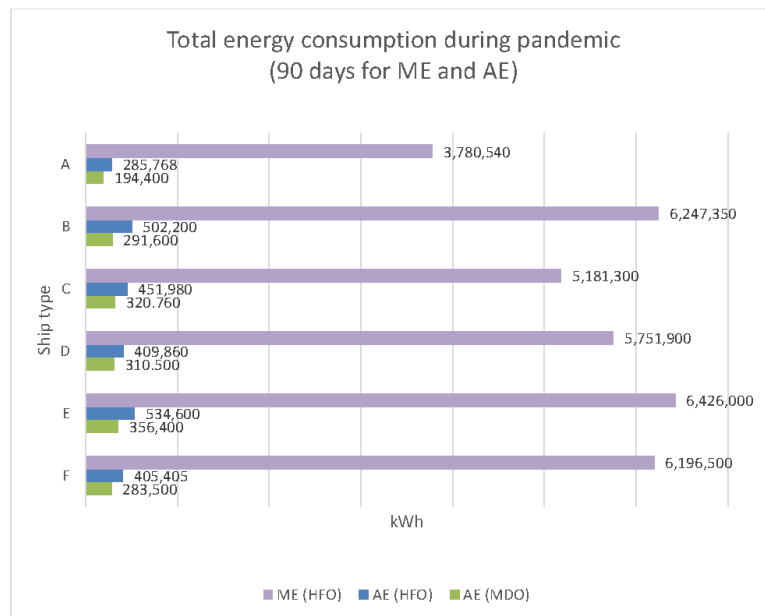


Figure 4. Total energy consumption during the pandemic (90 days) by ME and AE.

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.

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.

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

Table 6. Cont.

TYPE	Fuel Type	CO ₂	CO	SO _X	NO _X	PM ₁₀	PM _{2.5}
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

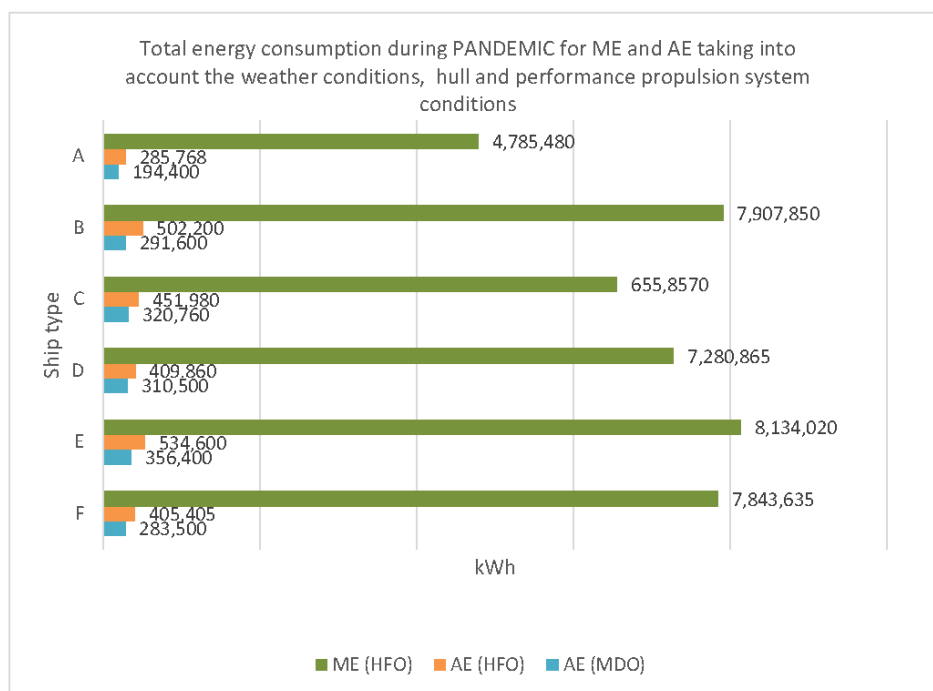


Figure 5. Total energy consumption during the pandemic for ME and AE taking into account the weather, hull, and performance propulsion system conditions”.

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 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.I.V.S., R.A.O.N. and M.C.M.A.-F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

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. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
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. [[CrossRef](#)]
5. Deniz, C.; Durmuşoğlu, Y. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey. *Sci. Total Environ.* **2008**, *390*, 255–261. [[CrossRef](#)]
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. [[CrossRef](#)]
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. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
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. [[CrossRef](#)]
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. [[CrossRef](#)]
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. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Endresen, Ø.; Sørgård, 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. [[CrossRef](#)]

15. European Climate Pact. Energetic Strategy 2030. Available online: <https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/pact.2020> (accessed on 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. [[CrossRef](#)]
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. [[CrossRef](#)]
18. Defra. *UK Ship Emissions Inventory*; Final Report November; Defra: Marsham Street, London, UK, 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. [[CrossRef](#)]
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> (accessed on 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. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Luo, S.; Ma, N.; Hirakawa, Y. Evaluation of resistance increase and speed loss of a ship in wind and waves. *J. Ocean Eng. Sci.* **2016**, *1*, 212–218. [[CrossRef](#)]
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. Available online: https://www.researchgate.net/publication/237764562_Methodology_for_calculating_emissions_from_ships_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/>).

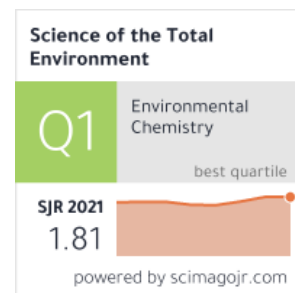


Impact Factor (2019)

6,55

CiteScore (2019)

8,6



Article

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

Autores Juan Moreno-Gutiérrez, Emilio Pájaro-Velázquez, Yolanda Amado-Sánchez, Rubén Rodríguez-Moreno, Fátima Calderay-Cayetano, Vanesa Durán-Grados

Science OF THE
Total Environment



<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>



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

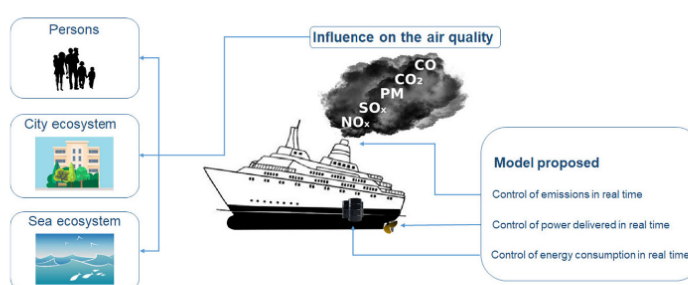
^a University College of Marine, Nautical and Radio-Electronic Engineering, Energy Efficiency in Maritime Transport Research Group, University of Cadiz, Campus de Excelencia Internacional del Mar, Spain

^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.

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

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	$P_{transient} = \frac{P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1}\right)^n \left(\frac{V_{transient}}{V_1}\right)^n}{\eta_w \eta_f}$	Variable (Eqs. (6) and (7))	IMO	Constant value, n = 3
Jalkanen	$P_{transient} = \epsilon_p * P_{installed} \left(\frac{V_{transient}}{V_{design} + V_{delv}}\right)^n$	Variable (Eqs. (6) and (7))	ENTECC (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	$P_{transient} = \frac{P_1 \left(\frac{V_{transient}}{V_1}\right)^n \left(\frac{V_{transient}}{V_1}\right)^n}{\eta_w \eta_f}$	Variable (Eqs. (6) and (7))	Compilation of ARB, ENTECC (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: ($\frac{D}{v}$) (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:

- P₁ and V₁ 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:

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

where:

- P_t, V_t and t_t are respectively the instantaneous (transient) power, speed and draught at time t; P₁, V₁ t₁ 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.

$$SFOC : SFOC_{Relative} \times SFOC_{base} \tag{6}$$

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

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:

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

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 data-base 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	MDO 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 SOx, 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

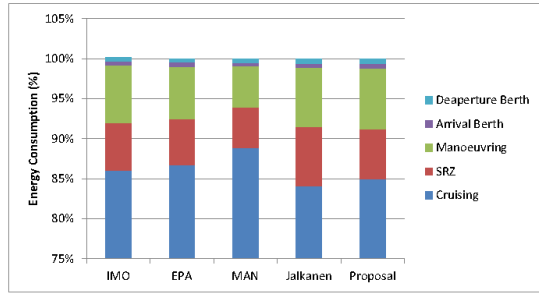


Fig. 1. Energy consumption by Main Engines, from each of the five methods: proportion of total accounted for by each operating mode (percent). Correction: Departure from berth, Arrival at berth.

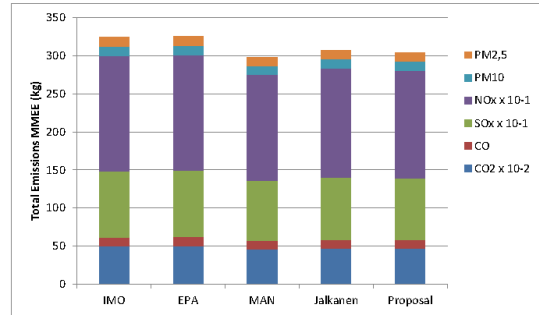


Fig. 3. Total emissions (kg) by Main Engines, from each of the methods analysed: proportion of total accounted for by each pollutant studied (percent).

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

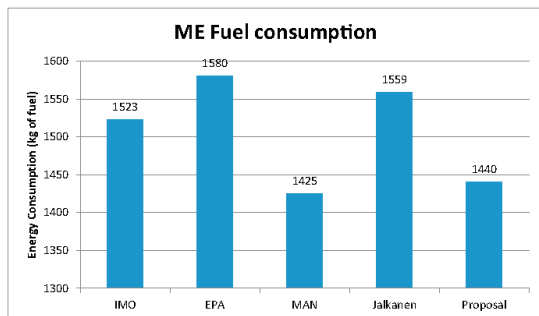


Fig. 2. Energy consumption by Main Engine (kg of fuel), from each of the five methods, for all operating modes.

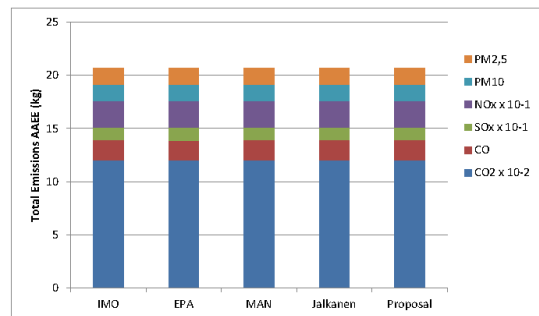


Fig. 4. Total emissions (kg) by Auxiliary Engines, from each of the methods analysed: proportion of total accounted for by each pollutant studied (percent).

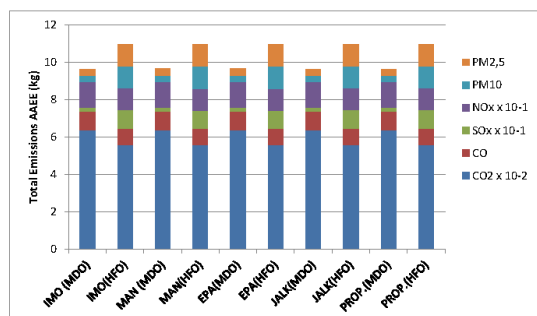


Fig. 5. Total emissions (kg) AE per pollutant and method studied and fuel used.

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. SMHI, 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.I., 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>.
- Segersson, David, 2013. A dynamic model for shipping emissions. Adaptation of Airviro and application in the Baltic Sea. SMHI, 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., Rauti, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D.S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J.J., Hoen, M., Chesworth, S., Pandey, A., 2014.

- 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., Hammings, 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.