



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Estudio de la influencia de la resistencia añadida en olas en las emisiones contaminantes de buques

Universidad politécnica de Cartagena

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

Autora: África Marrero del Rosario
Tutor: Dr. José Enrique Gutiérrez Romero



Índice

1. Introducción.....	11
2. Emisiones del transporte marítimo	14
2.1. Normativa de emisiones atmosféricas.....	17
2.2. Zonas de control de emisiones	21
3. Transporte marítimo	26
3.1. Importancia del transporte marítimo a nivel global	26
3.2. Transporte marítimo de corta distancia.....	28
3.3. Transporte marítimo como un complemento al transporte por carretera	31
4. Buque en estudio	34
4.1. Características típicas de los buques Ro-Ro	34
4.2. Terminal de carga rodada.....	38
4.3. Características del buque en estudio.	40
5. Ruta de navegación del buque en estudio.....	50
5.1. Tráfico marítimo en el Mar Mediterráneo.....	51
5.2. Ruta marítima del buque en estudio	52
6. Hidrodinámica	61
6.1. Resistencia total del buque en aguas tranquilas	61
6.2. Resistencia añadida en olas	66
7. Procedimiento de cálculo para la obtención de la potencia real demandada del buque	74
7.1. Validación de la metodología.....	74
7.2. Obtención de la resistencia total y potencia real demandada del buque Ro-Ro	79
8. Procedimiento de cálculo de las emisiones contaminantes del buque Ro-Ro...	106
8.1. Cálculo de emisiones del buque Ro-Ro	107
9. Soluciones para la reducción de emisiones	125
9.1. Cambiar combustible de HFO a MDO.....	125
9.2. Uso de HFO con Scrubber	128
9.3. Uso del gas natural licuado	136
9.4. Presupuestos de las soluciones para la reducción de emisiones.....	139
9.5. Comparación de las diferentes alternativas.....	150
10. Conclusiones	153
11. Referencias.....	156



Índice de figuras

Figura 1 Fuentes de la contaminación atmosférica mundial Fuente: (AEMM,2016)	14
Figura 2 Mapa de zonas ECA y futuras zonas ECA Fuente: Ing.Marítima,2017	15
Figura 3 Diagrama de años de cumplimiento de la normativa MARPOL de emisiones Fuente: Convenio MARPOL	19
Figura 4 Diagrama de años de cumplimiento de la normativa MARPOL de emisiones SOx Fuente: Convenio MARPOL	20
Figura 5 Mapa de áreas de control de emisiones Fuente: maquinasdebarcos.blogspot.com	21
Figura 6 Cadena de transporte marítimo Fuente: Elaboración propia	26
Figura 7 Puerto españoles Fuente: Puertos del Estado	26
Figura 8 Autopistas en el mar desde España Fuente: Comisión Europea,2010	29
Figura 9 Ventajas del TMCD Fuente: Elaboración propia	32
Figura 10 Disposición estructural de los buques Ro-Ro Fuente: Exponav.org	34
Figura 11 Disposición de la carga en los buques Ro-Ro Fuente: Ralmsem Ro-Ro	35
Figura 12 Rampas de buques Ro-Ro Fuente: Naviera Armas	36
Figura 13 Factores que intervienen en las terminales de carga rodada Fuente: VenicePort	38
Figura 14 Esquema terminal Ro-Ro Fuente: WWL	39
Figura 15 Guía del motor Wärtsilä Fuente: Wärtsilä engines	41
Figura 16 Modelado del buque Ro-Ro Fuente: Elaboración propia	44
Figura 17 Ruta Barcelona- Génova- Livorno Fuente: Costa Project- ValenciaPort	52
Figura 18 Principales puertos base del TMCD Fuente: Costa Project- ValenciaPort	53
Figura 19 Puertos base del buque Ro-Ro Fuente: Elaboración propia	54
Figura 20 Situación del puerto de Barcelona Fuente: Costa Project-ValenciaPort	54
Figura 21 Estructura del operados portuario SETRAM - Fuente: SETRAM	56
Figura 22 Situación del puerto de Livorno Fuente: Costa Project- ValenciaPort	57
Figura 23 Situación del puerto de Génova Fuente: Costa Project- ValenciaPort	58
Figura 24 Coeficiente de resistencia añadida Fuente (Arriba Pérez,2007)	67
Figura 25 Resistencia añadida no dimensiona Fuente (Arriba Pérez,2007)	69
Figura 26 Resultados de la resistencia añadida $Fr=0.2$ Fuente: Elaboración propia	77
Figura 27 Resultados de la resistencia añadida $Fr=0.3$ Fuente: Elaboración propia	77
Figura 28 Resultados de la resistencia añadida $Fr=0.4$ Fuente: Elaboración propia	78
Figura 29 Procedimiento de cálculo Fuente: Elaboración propia	80
Figura 30 Volúmenes de control Fuente: Elaboración propia	81
Figura 31 Mapa de boyas I Fuente: Elaboración propia	82
Figura 32 Mapa de boyas II Fuente: Elaboración propia	82
Figura 33 Superficie libre Fuente Elaboración propia	84
Figura 34 Salida del fluido Fuente Elaboración propia	85
Figura 35 Procedimiento de elección de malla Fuente: Elaboración propia	85
Figura 36: Superficie libre Fuente Elaboración propia.	88
Figura 37 Campo de presiones Fuente Elaboración propia	89



Figura 38 Asignación de la velocidad nula en el eje Y Fuente Elaboración propia.....	89
Figura 39 Asignación de la velocidad en el eje X Fuente Elaboración propia.....	90
Figura 40 Asignación de la velocidad nula en el eje Z Fuente Elaboración propia	90
Figura 41 Comparativa de la potencia Fuente: Elaboración propia	99
Figura 42 Resistencia total zona 1 Fuente: Elaboración propia	101
Figura 43 Resistencia total zona 2 Fuente: Elaboración propia	102
Figura 44 Resistencia total zona 3 Fuente: Elaboración propia	102
Figura 45 Resistencia total zona 4 Fuente: Elaboración propia	103
Figura 46 Resistencia total zona 5 Fuente: Elaboración propia	103
Figura 47 Resistencia total zona 50 Fuente: Elaboración propia	104
Figura 48 Esquema de cálculo de emisiones Fuente: Elaboración propia	106
Figura 49 Emisiones de CO ₂ Fuente Elaboración propia	113
Figura 50 Emisiones de SO _x Fuente Elaboración propia.....	113
Figura 51 Emisiones de NO _x Fuente Elaboración propia	114
Figura 52 Emisiones de PM _x Fuente Elaboración propia	114
Figura 53 Emisiones de CO ₂ condición 2 Fuente Elaboración propia	115
Figura 54 Emisiones de SO _x condición 2 Fuente Elaboración propia	115
Figura 55 Emisiones de NO _x condición 2 Fuente Elaboración propia	116
Figura 56 Emisiones de PM _x condición 2 Fuente Elaboración propia	116
Figura 57 Emisiones contaminantes Fuente Elaboración propia.....	117
Figura 58 Boyas y emisiones Fuente: Elaboración propia	118
Figura 59 Boyas y emisiones II Fuente: Elaboración propia.....	118
Figura 60 Ruta por carretera Fuente: Elaboración propia	120
Figura 61 Comparación de emisiones CO ₂ Fuente: Elaboración propia.....	123
Figura 62 Scrubber tipo abierto Fuente: Alfa Laval.....	129
Figura 63 Scrubber tipo cerrado Fuente: Alfa Laval.....	130
Figura 64 Equipo Scrubber Fuente: Alfa Laval.....	131
Figura 65 Instalación global de los equipos Scrubber Fuente: Alfa Laval.....	132
Figura 66 Diferentes métodos de suministrar GNL. Fuente: Costa Project-ValenciaPort	137
Figura 67 Distribución triangular de Monte Carlo Fuente: Elaboración propia.....	142
Figura 68 Procedimiento de análisis de las alternativas desde la perspectiva económica Fuente: Elaboración propia.....	145



Índice de tablas

Tabla 1 Emisiones NO _x Fuente: Convenio MARPOL	19
Tabla 2 Áreas de control de emisiones Fuente: Elaboración propia	21
Tabla 3 Riesgos y beneficios de zonas ECA y SECA Fuente: Elaboración propia	24
Tabla 4. Dimensiones principales del buque Ro-Ro Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 5. Parámetros de estabilidad y coeficientes Fuente: Elaboración propia	40
Tabla 6 Características del Heavy Fuel Oil Fuente: Elaboración propia	42
Tabla 7 Combustible para los MMPPs Fuente: Elaboración propia	42
Tabla 8 Capacidad de tanques de almacén de HFO Fuente: Elaboración propia.....	43
Tabla 9 Capacidad de los tanques de almacén de MDO Fuente: Elaboración propia....	43
Tabla 10 Características de la condición de carga 1 Fuente: Elaboración propia	45
Tabla 11 Características hidrostáticas condición de carga 1 Fuente: Elaboración propia	46
Tabla 12 Características de la condición de carga 2 Fuente: Elaboración propia	47
Tabla 13 Características hidrostáticas condición de carga 2 Fuente: Elaboración propia	48
Tabla 14 Emisiones de los buques Ro-Ro en general en el mar Mediterráneo Fuente: Costa Project- ValenciaPort.....	51
Tabla 15 Operación del buque Fuente: Elaboración propia	54
Tabla 16 Estadísticas del puerto de Barcelona Fuente: Autoridad portuaria del puerto de Barcelona.....	55
Tabla 17 Estadísticas del puerto de Barcelona tráfico mensual de automóviles Fuente: Autoridad portuaria del puerto de Barcelona	56
Tabla 18 Estadísticas del puerto de Barcelona de la carga general del TMCD Fuente: Autoridad portuaria del puerto de Barcelona	57
Tabla 19. Datos de la carena Wigley Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 20 Periodos a estudiar en la validación Fuente elaboración propia.....	75
Tabla 21 Velocidades a estudiar en la validación Fuente Elaboración propia	75
Tabla 22 Resultados de la carena Wigley Fuente: Elaboración propia	76
Tabla 23 Volumen de control interior Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla 24 Volumen de control exterior Fuente: Elaboración propia	81
Tabla 25 Matriz de caso de estudio con Hs Fuente: Elaboración propia	83
Tabla 26 Matriz de caso de estudio con Hmax Fuente: Elaboración propia	83
Tabla 27 Sensibilidad de malla 1 Fuente: Elaboración propia	86
Tabla 28 Resultados Raw Carena 1 Hs Fuente: Elaboración propia.....	86
Tabla 29 Resultados Raw Carena 2 Hs Fuente: Elaboración propia.....	87
Tabla 30 Elección de malla CFD Fuente: Elaboración propia	91
Tabla 31 Resultados resistencia carena 1 Fuente: Elaboración propia.....	91
Tabla 32 Resultados resistencia carena 2 Fuente: Elaboración propia.....	91
Tabla 33 Resultado de w/t y rendimientos Fuente: Elaboración propia.....	92
Tabla 34 Resultados de la carena 1 Fuente: Elaboración propia.....	92
Tabla 35 Resultados de la carena 2 Fuente: Elaboración propia.....	93



Tabla 36 Rango de aplicación Holtrop-Mennen Fuente: Holtrop-Mennen.....	93
Tabla 37 Resultado de las comprobaciones Fuente: Elaboración propia	94
Tabla 38 Apéndices Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 39 Cálculo del coeficiente 7 Fuente: Holtrop-Mennen	96
Tabla 40 Resultados de la resistencia de Holtrop-Mennen Fuente: Elaboración propia	98
Tabla 41 Resultados de resistencia y de potencia de Holtrop-Mennen Fuente:Elaboración propia.....	98
Tabla 42 Comparación potencia carena 1 Fuente: Elaboración propia.....	99
Tabla 43 Porcentaje de error entre los diferentes métodos Fuente: Elaboración propia	99
Tabla 44 Resultados de la potencia carena 1 Fuente: Elaboración propia	100
Tabla 45 Resultados de la potencia carena 2 Fuente: Elaboración propia	100
Tabla 46 Números de Froude a estudiar Fuente Elaboración propia	101
Tabla 47 Horas de navegación por zonas Fuente: Elaboración propia	106
Tabla 48 Formulación de emisiones Fuente Elaboración propia	107
Tabla 49 Procedimiento de cálculo de emisiones Fuente: Elaboración propia	108
Tabla 50 Datos del buque Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 51 Tecnología y factores de emisión	110
Tabla 52 Emisiones a partir de la potencia instalada Fuente: Elaboración propia	112
Tabla 53 Emisiones de navegación carena 1 Fuente: Elaboración propia	112
Tabla 54 Emisiones carena 2 Fuente: Elaboración propia	114
Tabla 55 Comparación de las emisiones Fuente: Elaboración propia.....	117
Tabla 56 Desglose de ruta por carretera Fuente: Elaboración propia.....	121
Tabla 57 Factores de emisión por combustible usado Fuente: Elaboración propia	121
Tabla 58 Consumos de emisiones de CO ₂ Fuente: Elaboración propia	122
Tabla 59 Comparación de las emisiones de CO ₂ Fuente: Elaboración propia	122
Tabla 60 Especificaciones técnicas de la solución NaOH Fuente: Alfa Laval	133
Tabla 61 Sistema de circuito abierto Fuente: Elaboración propia.....	134
Tabla 62 Circuito cerrado del sistema Scrubber Fuente: Elaboración propia	134
Tabla 63 Cantidad del NaOH Fuente: Elaboración propia.....	134
Tabla 64 Cantidad de solución de NaOH Fuente: Elaboración propia	135
Tabla 65 Cantidad de lodos del sistema de circuito cerrado Fuente: Elaboración propia	135
Tabla 66 Presupuesto por niveles Fuente: Elaboración propia.....	141
Tabla 67 Parámetros de Monte Carlo Fuente: Elaboración propia	142
Tabla 68 Resultados de la simulación de Monte Carlo Fuente: Elaboración propia....	142
Tabla 69 Coste de la instalación Scrubber Fuente: Danish Maritime Authority.....	143
Tabla 70 Valor del flete para diferentes navieras Fuente: Elaboración propia	143
Tabla 71 Pérdidas por inutilización Fuente: Elaboración propia	144
Tabla 72 Costes y rendimientos de distintas soluciones económicas Fuente: Valencia Port	144
Tabla 73 Costes de adquisición y uso de GNL Fuente: Elaboración propia	145
Tabla 74 Costes de inutilización del buque Fuente: Elaboración propia	145
Tabla 75 Amortización del buque base anual Fuente: Elaboración propia	146
Tabla 76 Costes de combustible (HFO) Fuente: Elaboración propia.....	146
Tabla 77 Costes de los diferentes combustibles a utilizar Fuente: Elaboración propia	147



Tabla 78 Coste de servicios y tasas portuarias Fuente: Elaboración propia.....	147
Tabla 79 Beneficios anuales para HFO Fuente: Elaboración propia.....	148
Tabla 80. Beneficios anuales para MDO Fuente: Elaboración propia	148
Tabla 81. Beneficios anuales para Scrubber Fuente: Elaboración propia	149
Tabla 82 Beneficios anuales para GNL Fuente: Elaboración propia	149
Tabla 83 Comparación del valor del flete Fuente: Elaboración propia.....	149



Acrónimos

CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
ECA	<i>Emission Control Areas</i>
EEDI	<i>Energy efficiency design index</i>
EEOI	<i>Energy Efficiency Operational Indicator</i>
EGCS	<i>Exhaust Gas Cleaning System</i>
FEM	Finite Element Method
GNL	Gas Natural Licuado
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i>
MARPOL	Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques
MCR	Maximum Continuum Rating
MDO	<i>Marine Diesel Oil</i>
MGO	<i>Marine Gas Oil</i>
mL	Metro lineal
MM.AA	Motor auxiliar
MM.PP	Motor principal
OMI	Organización Marítima Internacional
Ro-Ro	<i>Roll-on Roll-off</i>
SECA	<i>Sulphur Emission Control Area</i>
SEEMP	<i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i>
SFC	Consumo específico de combustible
SOLAS	Convenio Internacional para la Seguridad de la vida Humana en el Mar
STS	<i>Ship to Ship</i>
TCS	<i>Tanks containers</i>
TMCD	Transporte Marítimo de Corta Distancia
TPS	<i>Terminal to Ship by pipeline</i>
TTS	<i>Truck to Ship</i>
UE	Unión Europea
UTI	Unidad de Transporte Individual



Agradecimientos

Muestro mis más sinceros agradecimientos a mi tutor de proyecto, quien me ofreció todos sus conocimientos y fue una pieza clave en cada etapa del mismo, tanto por su lado profesional como humano.

Expresar mi agradecimiento a CIMNE por su apoyo a través de la red de aulas CIMNE ETSINO, por facilitar el software técnico para la realización de este proyecto.

A mis compañeros, con quienes he podido compartir experiencias, alegrías, frustraciones, tristezas que nos han llevado a formar una pequeña familia y han logrado que me sintiese como en casa a pesar de la distancia.

Por último, agradecer a mi familia y en especial a mis padres, por ser incondicionales y apoyarme en cada paso que doy. A ella por su fuerza y a él por sacar la mejor versión de mí misma. Así, como agradecer a Marta y a Benji por no soltar nunca mi mano por muy escarpado que fuera en camino.



*“Detén el tiempo en tus manos,
haz esta noche perpetua,
para que nunca se vaya de mí,
para que nunca amanezca”*

Roberto Cantoral

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



1. Introducción

En el presente estudio se van a analizar las emisiones de los buques Ro-Ro para poder cuantificar el daño que éstos hacen al medioambiente. Esto se va a llevar a cabo a partir del estudio de la resistencia añadida en olas, obtenida mediante el análisis del comportamiento en la mar del buque durante su ruta de navegación. Esto tiene como finalidad obtener la potencia real demandada por el buque en cada instante de la navegación de éste.

Ante la posibilidad de que pueda entrar en vigor que el área del Mar Mediterráneo sea considerada como zona SECA (Sulphur Emission Control Area) en 2020, donde los buques no podrán navegar con combustibles con alto contenido en azufre o si es así, sus emisiones deben ser equivalentes a los combustibles de bajo contenido en azufre, todos los buques que naveguen en el Mediterráneo debe enfrentarse al reto de evaluar sus emisiones y tomar las medidas necesarias para paliar el problema de las mismas.

Las líneas de tráfico marítimo que más daño hacen al medioambiente son aquellas que se realizan de manera regular dentro de la zona, el mar Mediterráneo se enfrenta a una amplia segmentación de buques que navegan por sus aguas bajo el régimen de transporte marítimo de corta distancia como línea regular, por lo tanto, la frecuencia de navegación y su repetitividad hace que el daño que hace sea mayor que en otra condición.

El estudio se presenta dentro del marco de trabajo que lleva a analizar de manera exhaustiva todas las alternativas posibles para la reducción de emisiones, no obstante, antes de llegar a la solución, se debe evaluar los daños, para ello este trabajo presenta una metodología de cálculo de emisiones que se acerque a la realidad sin tener que monitorizarlas.

La elección del buque Ro-Ro fue basada en las conclusiones obtenidas del estudio del tráfico marítimo en aguas del mar Mediterráneo occidental realizado por la autoridad portuaria de Valencia. El estudio comienza con los principales intereses medioambientales y tecnológicos que llevan a los países europeos a plantearle a la OMI la posibilidad de que el mar que alberga el 18% del tráfico marítimo mundial sea nombrado con una zona libre de emisiones de gases contaminantes. Estudiando los buques que navegan en régimen de línea regular en el Mar Mediterráneo se extrae que hay seis tipos de buques que navegan principalmente en el Mar Mediterráneo Occidental en régimen regular, éstos son los buques portacontenedores tipo Feeder, los cuales encabezan la lista, esto resalta no solo que cada vez las mercancías son paletizadas y transportadas en portacontenedores sino se comprende el por qué, actualmente existen tantos estudios de emisiones sobre este tipo de buques, en segundo y tercer lugar se encuentran los buques Ro-Pax y Ro-Ro, se pueden englobar en una misma familia de transporte, la complejidad de las cargas rodadas hace que éste tipo de buques cada vez más polivalente siga manteniendo sus altas cuotas en el transporte marítimo, siguiendo a éstos se encuentran los buques car carrier, seguido de los buques de pasajeros y finalmente, los buques de carga general (Pérez, Mestre, Sáez, & Lara, 2016).

De los buques portacontenedores hay diversos estudios que ayudan a estimar las emisiones de los mismos, debido a que son los buques de carga más eficientes en la actualidad, ya que todo aquello que se pueda introducir en un contenedor se puede transportar mediante buques portacontenedores. Sin embargo, los buques de carga rodada



han tenido una menor importancia en el estudio de emisiones a pesar de su grado de participación en el mercado europeo.

El trabajo se estructura en diez capítulos donde en el segundo capítulo se tratarán las emisiones del transporte marítimo, así como la normativa que actualmente las rige para su eliminación. A continuación, en el tercer capítulo se hablará de la importancia del transporte marítimo y en particular del transporte marítimo de corta distancia desarrollado en España. A partir del capítulo cuatro se hará hincapié en el buque en estudio tanto en las características generales de la tipología de buque a estudiar, así como el buque en particular que se ha elegido a desarrollar en este estudio. En el capítulo cinco se mostrará la ruta de navegación que lleva a cabo el buque y sobre la cual se efectuarán los cálculos para el estudio de las emisiones. Luego se tratará de manera teórica los conocimientos básicos sobre la resistencia en aguas tranquilas y la resistencia añadida, y en consiguiente se tratará el uso de la mecánica de fluidos computacional. Seguidamente, en el capítulo siete y ocho se realizará el procedimiento de cálculo tanto para la obtención de la potencia total demandada por el buque, así como las emisiones que esto supone. En consecuencia, de los datos de emisiones obtenidos en el capítulo ocho, se mostrarán diferentes alternativas para la reducción de las mismas en el capítulo nueve. Finalmente, en el décimo capítulo se reflejarán las conclusiones obtenidas del estudio realizado.

CAPÍTULO 2

EMISIONES DEL TRANSPORTE MARÍTIMO



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



2. Emisiones del transporte marítimo

El 90% del volumen de carga que se transporta a nivel mundial es trasladada mediante el comercio marítimo, y gracias a sus mejoras constantes en términos de eficiencia hace que su presencia pueda aumentar frente a otros medios de transporte. Este aumento no solo supone una mejora económica para el sector naval, sino que debe enfrentar a los daños que este medio de transporte causa al medioambiente, así como un fuerte impacto en la salud humana. Este impacto negativo tiene su principal causante en los gases de exhaustación debido a la combustión de los motores de los buques. Estos gases tienen entre sus componentes óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas sólidas (PM)₂, dióxido de carbono (CO₂) los cuales son regulados por unas autoridades europeas cada vez más conscientes de la problemática que el transporte marítimo ocasiona. Debido a este impacto negativo la Organización Marítima Internacional (OMI) desarrolló el Convenio Internacional MARPOL con el objetivo de la completa eliminación de la polución entre ellos la eliminación de la contaminación atmosférica. En este estudio cobrará gran importancia el Anexo VI del Convenio MARPOL, el cual establece los límites máximos de emisión a la atmósfera, de los principales gases contaminantes. Además, se permite fijar límites más estrictos en áreas más vulnerables, esto es, donde la consecuencia de la contaminación atmosférica ha llegado a unos límites irreversibles para la salud medioambiental y humana. (López, 2015)

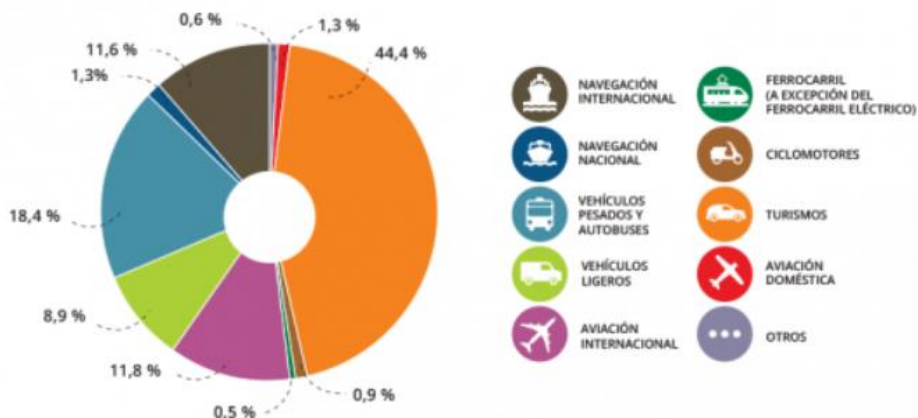


Figura 1 Fuentes de la contaminación atmosférica mundial Fuente: (AEMM,2016)

El Mar Mediterráneo podría convertirse en el año 2020 en una zona donde los límites de emisiones sean más estrictos, no obstante, la designación como área de control de emisiones (ECA) requiere que se demuestre el impacto negativo que las emisiones debidas a los gases de exhaustación tiene en esta zona. Si se lleva a cabo el análisis del tráfico marítimo a partir del volumen de carga, del número de buques y de la frecuencia en las principales rutas, entre otros parámetros, se podrá revelar si la condición de área de control es apta para su aplicación a una zona en concreto

El intenso tráfico marítimo en el mar Mediterráneo y su incremento en el futuro inmediato convierte la zona del Mediterráneo en una idónea para la implantación de una zona ECA, lo que permitirá reducir la contaminación provocada por los buques. Es por ello, que este estudio ayudará a la determinación del daño que actualmente ejercen los buques tipo Ro-Ro en esta zona.



Para regular el contenido máximo que se puede emitir, se sigue la regulación de la Directiva 1999/32/EC de la Unión Europea que toma como referencia los límites de azufre del Anexo VI del Convenio MARPOL, el tipo de combustible permitido en los puertos de la Unión Europea y las obligaciones relacionadas con el uso de los combustibles contemplados en la Directiva y con la puesta en el mercado de determinados combustibles.

El Anexo VI del Convenio MARPOL tiene como objetivo minimizar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, su contribución a la contaminación del aire tanto a nivel local como global y los problemas medioambientales que genera. El Anexo establece límites para las emisiones de óxido de azufre (SO_x) y óxido de nitrógeno (NO_x) procedente de los buques.

La Directiva 2012/33/EU, con el fin de adaptar la legislación europea a las modificaciones del Anexo VI, introduce límites de azufre más estrictos para los combustibles marítimos en las zonas SECA (1% hasta el 31 de diciembre de 2014 y 0,10% a partir del 1 de enero de 2015), así como en las zonas marítimas fuera de las zonas SECAs (3,5% y, en principio, 0,50% a partir del 1 de enero de 2020). Sin embargo, no existe una legislación vinculante de la UE sobre las emisiones de NO_x , pero hay tres límites de emisiones de acuerdo con la regla para los motores de Nivel I, II y III y partículas sólidas procedentes de los buques (Europea, 2013). Las actuales áreas de control de emisiones, así como las futuras áreas propuestas por la OMI son las mostradas en la Figura 2.

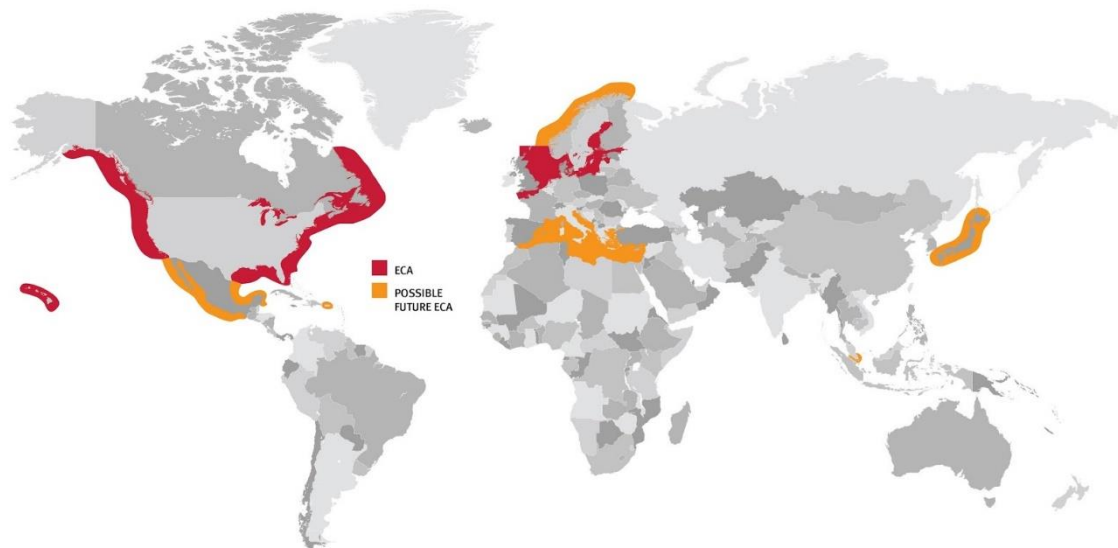


Figura 2 Mapa de zonas ECA y futuras zonas ECA Fuente: Ing.Marítima,2017

Estos cambios en la regulación de emisiones se ha debido a que la atmósfera ha empeorado sus condiciones volviéndose cada más irrespirable, la capa de ozono es cada vez más fina con el paso del tiempo y esto afecta de manera significativa al cambio climático.

Las nuevas regulaciones hacen que exista una lucha entre el medio ambiente y el coste económico, para un armador cumplir la normativa no solo supone tener el buque durante un periodo de tiempo no operativo sino además hacer frente a los costes que este cambio supone. Es por ello que la evaluación de la alternativa a emplear en caso de tener que adaptarse a una regulación de emisiones menos permisiva debe ser exhaustiva, todos los costes suponen un aumento del flete, que deben pagar los consumidores.



Por otro lado, se encuentran aquellos puertos que deben cumplir la legislación global impuesta por la OMI y los que además deben cumplir la normativa específica de aquellos que la requieran por encontrarse dentro de zonas SECA o ECA, el beneficio ambiental se mide en este caso como la pérdida de beneficios económicos, corriendo el riesgo que los buques cambien sus rutas a puertos cercanos donde la normativa no tenga tantas restricciones en cuanto a emisiones se refiere. Cambiar los puertos base (que ocurre en menor medida) o de puertos de escala, supone un aumento del flete para poder hacer frente a los costes lo que puede derivar en un cambio de medio de transporte.

El principal competidor del transporte marítimo es el transporte por carretera el cual de usarse como alternativa se estaría corriendo el riesgo de aumentar las emisiones por unidad de carga transportada (European Environment Agency, 2013). Las nuevas tecnologías y sus políticas de emisiones hacen que cada vez el transporte por carretera sea un transporte más respetuoso con el medio ambiente. Aunque su capacidad de carga es menor, por lo que el transporte marítimo sigue siendo el que menos emisiones produce por unidad de carga transportada gracias a que se pone en práctica las economías de escala.

Las preocupaciones por la saturación de las carreteras debido a la posibilidad de que el transporte por carretera siga creciendo tan rápidamente como hasta ahora, hace que, aunque en los últimos 25 años la carretera haya sido uno de los principales contribuyentes del desarrollo de la Unión Europea y en particular a la consecución efectiva del mercado interior.

El transporte por carretera tiene fuertes ventajas en comparación al transporte marítimo, entre ellas se encuentran su velocidad, su flexibilidad, fiabilidad y bajo coste, se apoyan en una densa infraestructura viaria cuyo coste es sufragado en la mayoría de los países miembros de la Unión Europea, por los presupuestos públicos. Esto juega un papel importante en la cuota de mercado del transporte por carretera sobre el transporte interno total de la Unión Europea. Pero, puede llegar a ser insostenible debido a la saturación de autovías y autopistas. Ahí es donde el transporte marítimo cobrará un papel primordial como transporte complementario para dar cabida al transporte de mercancías. Se habla del transporte marítimo como una alternativa que complementa al transporte por carretera pero que no lo sustituya.

De los numerosos estudios relacionados con la contaminación atmosférica producida por el transporte marítimo, se concluye que, junto a los buques petroleros, son los buques portacontenedores y bulkcarriers los que más contribuyen a las emisiones contaminantes, puesto que son los actores principales en el mercado global. No obstante, en el transporte marítimo de corta distancia son los buques como los Ro-Ro o Ferries los que predominan en el mercado, éstos buques no tienen unas dimensiones excesivas y su tendencia en cuanto a su construcción no es hacerlos cada vez con mayor capacidad de carga (como los buques transoceánicos), sino conseguir un buque óptimo que sea capaz de transportar la carga necesaria cumpliendo las condiciones de tiempo y coste necesarios para competir con otros medios de transporte, aunque sea necesario realizar más de una vez dicha ruta para el nivel de carga necesario a transportar.

El Transporte Marítimo de Corta Distancia (TMCD) maneja herramientas como la inteligencia artificial para lograr barcos óptimos que cumplan la función de este tipo de ruta de forma efectiva.



2.1. Normativa de emisiones atmosféricas

Durante la adopción del Convenio MARPOL de 1973 se abordó la cuestión de cómo afectaba y como se debería controlar la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, en concreto de la emisión de aquellas sustancias nocivas de los gases de escape, no obstante, en ese momento no se tomaron las premisas necesarias para regular las emisiones de los buques. Sin embargo, en otros foros ya se comenzaba a tratar los problemas que la contaminación atmosférica ocasiona no solo al medio ambiente sino además a la salud humana. Fue siete años más tarde cuando la OMI mientras se estudiaba la calidad del fuel oil decidió examinar también la contaminación atmosférica. Dando como resultados que:

Las emisiones de dióxido de azufre de los buques se encontraban entre 4,5 y 6,5 millones de toneladas por año, casi un 4% de las emisiones mundiales de azufre. Y las emisiones de óxido de nitrógeno de los buques daban como resultado 5 millones de toneladas por año, casi el 7% del total mundial.

Tras varios años de deliberaciones llevadas a cabo por el Comité de protección del medio marino, se lanzó la resolución A.719(17) sobre la Prevención de la contaminación atmosférica ocasionado por los buques, creándose un nuevo Anexo al Convenio MARPOL sobre la contaminación atmosférica.

El convenio MARPOL en su Anexo VI: “Reglamento para la Prevención de la Contaminación del Aire de los buques” aplica a todos los buques de los Estados de abanderamiento que han ratificado el Protocolo de 1997 del Convenio MARPOL, representando en la actualidad casi el 90 % del tonelaje mundial. Además, los requisitos del Anexo VI también se aplican a los buques de los Estados no signatarios, que operen en aguas bajo la jurisdicción de las Partes en el Protocolo de 1997. Estos buques están obligados a tener las declaraciones de conformidad con el Anexo VI, expedido por, la Administración de abanderamiento. (OMI, 2011)

El capítulo 3 del Anexo VI del Convenio MARPOL abarca una serie de diferentes contaminantes y/o las operaciones a bordo que afectan a la calidad del aire que se muestran a continuación:

- a) Sustancias que agotan la capa de ozono
- b) Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- c) Óxidos de azufre (SO_x)
- d) Componentes Orgánicos Volátiles (COV)
- e) Incineración a bordo
- f) Calidad del fuel oil

Se estudiará exclusivamente los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x), además del dióxido de carbono (CO₂) y las emisiones de partículas (PM_x) tanto las PM₁₀ como las PM_{2.5}

En cuanto a los requerimientos relativos a los óxidos de nitrógeno (NO_x), la Resolución MEPC.176(58), adoptada el 10 de octubre de 2008, introduce entre otras enmiendas la nueva regla 13, la cual contiene nuevos requerimientos relativos a los óxidos de nitrógeno (NO_x).



- a) La presente regla se aplicará:
 - i. a todo motor diésel con una potencia de salida superior a 130 kW, instalado a bordo de un buque construido el 1 de enero del año 2000 o posteriormente; y
 - ii. a todo motor diésel con una potencia de salida superior a 130 kW, que haya sido objeto de una transformación importante el 1 de enero del año 2000 o posteriormente.
- b) La presente regla no se aplicará:
 - i. a los motores diésel de emergencia, a los motores instalados a bordo de botes salvavidas ni a ningún dispositivo o equipo previsto para ser utilizado únicamente en caso de emergencia; ni
 - ii. a los motores instalados a bordo de buques que estén solamente dedicados a realizar viajes dentro de las aguas sometidas a la soberanía o jurisdicción del Estado cuyo pabellón están autorizados a enarbolar, a condición de que tales motores estén sometidos a otra medida de control de los NO_x establecida por la Administración.
- c) No obstante lo dispuesto en el apartado a) del presente párrafo, la Administración podrá permitir que la presente regla no se aplique a los motores diésel que se instalen en los buques construidos antes de la fecha de entrada en vigor del presente Protocolo o en los buques que sean objeto de una transformación importante antes de esa fecha, a condición de que éstos estén exclusivamente dedicados a realizar viajes hacia puertos o terminales mar adentro situados en el Estado cuyo pabellón están autorizados a enarbolar.

Hay tres límites de emisiones de acuerdo con la regla para los motores de Nivel I, II, III (internacionalmente llamado Tier I, II, III) con potencia superior a 130 kW los cuales tendrán que estar equipados con los respectivos certificados EIAPP y aprobados por el Código técnico NO_x.

Reducción progresiva de las emisiones NO_x teniendo en cuenta:

- Fecha de construcción
- Cilindrada y potencia de los motores diésel
- Motores diésel marinos de más de 130 kW de potencia

Nivel I (Tier I)

- Motores diésel marinos con una potencia de salida superior a 130 kW instalados en un buque construido (fecha de puesta de quilla) a partir del 01/01/2000 y antes del 01/01/2011 o que haya sido objeto de una transformación importante, aunque la fecha de puesta de quilla fuese anterior \geq 01/07/2010
- Los motores diésel marinos con una potencia de más de 5.000 kW y una cilindrada de más de 90 litros, instalados en un buque construido a partir del 01/01/1990 y antes del 01/01/2000 \geq 01/07/2010.

Nivel II (Tier II)

- Los motores diésel marinos instalados en un buque a partir del 1 de enero 2011 o la sustitución por un motor idéntico a partir de esta fecha.

Nivel III (Tier III)

- Se aplicará a los motores diésel marinos instalados en un buque en explotación en las ECAs construidos a partir del 1 de enero de 2016 o la sustitución por un motor



idéntico a partir de esta fecha. Solo es aplicable a los barcos que están operando en las ECAs. Fuera de las ECAs, se aplica el Nivel II.

Las emisiones permitidas en cada nivel son las siguientes mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1 Emisiones NO_x Fuente: Convenio MARPOL

RPM	Emisiones NO _x (g/kWh)			Reducción relativa respecto al nivel I
	< 130	130 ≤ n < 2000	≥ 2000	
Nivel I	17.0	45n ^{-0.2}	9.8	-
Nivel II	14.4	44n ^{-0.23}	7.7	15.5%-21.8%
Nivel III	3.4	9n ^{-0.2}	2.0	80%

A continuación, se muestra un diagrama de tiempo donde se refleja los años en los cuales deberá entrar en vigor los niveles (Tier) de los límites de emisiones de NO_x.



Figura 3 Diagrama de años de cumplimiento de la normativa MARPOL de emisiones Fuente: Convenio MARPOL

Los requerimientos relativos a los óxidos de azufre (SO_x) tratan el contenido de azufre de todo fuel oil utilizado a bordo de los buques no excederá los siguientes límites:

- 4,50 % masa/masa antes del 1 de enero de 2012.
- 3,50 % masa/masa el 1 de enero de 2012 o posteriormente.
- 0,50 % masa/masa el 1 de enero de 2020 y posteriormente.

No obstante, cuando los buques operen dentro de las zonas de control de emisiones los datos expresados anteriormente sufren una gran variación mostrada a continuación:

El contenido de azufre del fueloil utilizado a bordo no excederá los siguientes límites

- 1,50 % masa/masa antes del 1 de julio de 2010
- 1,00 % masa/masa el 1 de julio de 2010 y posteriormente
- 0,10 % masa/masa el 1 de enero de 2015 y posteriormente

Siendo obligatorio el cambio por escrito de los procedimientos de fuel oil que deben estar disponible a bordo a partir del 1 de julio 2010.

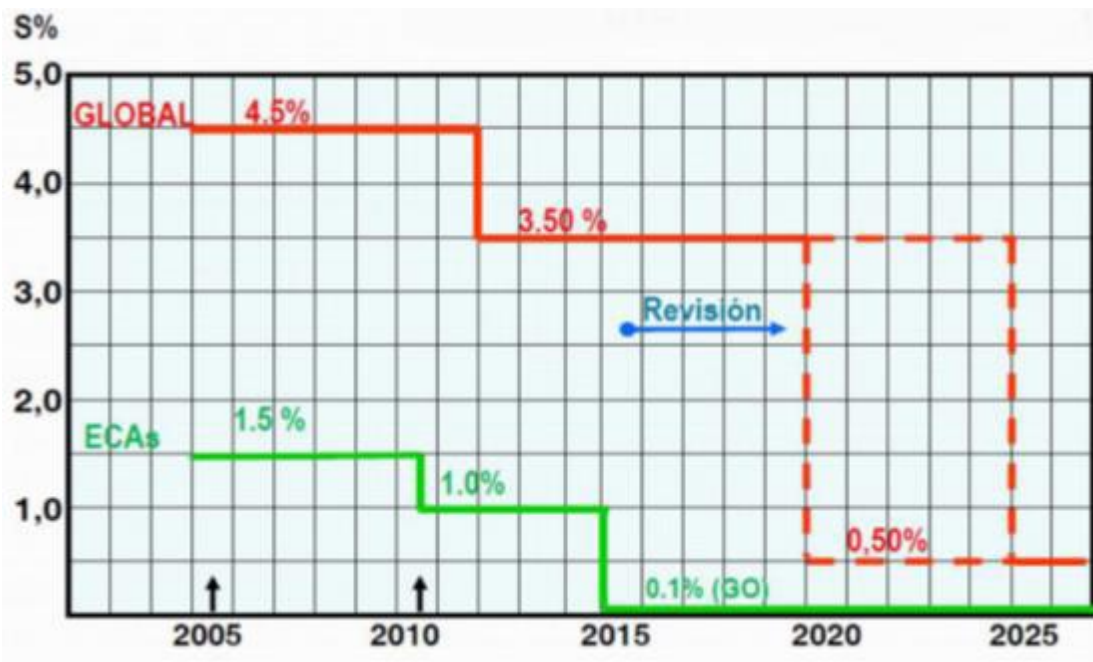


Figura 4 Diagrama de años de cumplimiento de la normativa MARPOL de emisiones SO_x Fuente: Convenio MARPOL

La revisión reflejada en el calendario de reducción de SO_x se refiere a que las partes implicadas, con la información base desarrollada por el grupo de expertos, puede decidir si es posible cumplir que los buques tengan un contenido de azufre menor de 0,5 % a partir del 1 de enero de 2020. Si se adopta una decisión, ya que no es posible que los buques cumplan esta norma, entonces entrará en vigor el 1 de enero de 2025.

La regulación sobre CO₂ y emisiones de gases de efecto invernadero se basan en el Protocolo de Kioto, adoptado en 1997, y con vigencia desde 2005, en su Artículo 2.2 pidió a la OMI la reducción paulatina de las emisiones de gases de efecto invernadero de los combustibles marinos.

La OMI ha considerado tres alternativas principales para controlar las emisiones de CO₂ con origen marino:

1. La adopción de un índice de eficiencia energética del buque. (Energy efficiency design index – EEDI) para nuevos buques.
2. Adopción de un plan de eficiencia energética del buque (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP) para todos los buques de más de 400 GT a partir del 1 de enero de 2013.
3. Índice de eficiencia energética operacional (Energy Efficiency Operational Indicator – EEOI) para buques existentes.

Existen otras medidas de mercado que aún están pendientes de aprobación y que podrían basarse en algunas de las siguientes alternativas:

1. Establecer un límite máximo para las emisiones y un programa de comercio de derechos de emisión (cap&trade).
2. Imponer un Impuesto sobre combustibles marinos.



2.2. Zonas de control de emisiones

Uno de los aspectos más importantes que ratifica el éxito del transporte marítimo es la sostenibilidad, la cual lo dota de la cualidad de limitar las emisiones y residuos emitidos al ambiente, minimizar el impacto ambiental y la producción de ruido de cualquier tipo. Para lograr esta sostenibilidad y mantener unos límites de emisiones por debajo del valor que pueda ser peligroso para el medio ambiente y las personas, estos últimos años la OMI ha endurecido sus normativas de emisiones de gases de exhaustación por parte de los buques, tanto de NO_x , SO_x , PM_x , así como, la mejora de la eficiencia energética para reducir las emisiones de CO_2 .

Sin embargo, la ética medioambiental no es tratada por igual en todas las regiones del mundo. Es por eso que además de la normativa base exigida por la OMI, existen zonas con restricciones mayores en cuanto a las emisiones de estos gases. Éstas son conocidas como zonas ECA (*Emission Control Area*) y SECA (*Sulphur Emission Control Area*)

Las zonas SECA son áreas donde las emisiones de azufre contaminantes vertidas a la atmósfera producidas por la quema de combustibles marinos están estrictamente controladas, teniendo un máximo de emisión inferior a lo permitido por la OMI en otras zonas, esto se produce ante un crecimiento de la lluvia ácida en el norte de Europa que pone en entredicho la permisibilidad de la normativa y exige una mayor reducción. Son zonas de control exclusivo de SO_x . Mientras que las zonas ECA es un término que abarca más allá de las restricciones de SO_x teniendo en cuenta las emisiones del NO_x .

Actualmente las zonas declaradas como áreas de control de emisiones según la Organización Marítima Internacional son las mostradas en la Tabla 2. La Figura 5 muestra un mapa con la delimitación de las zonas ECA y SECA.

Tabla 2 Áreas de control de emisiones Fuente: Elaboración propia

Áreas	Zona declarada	Gases de los que restringe su emisión
Mar Báltico	SECA	SO_x
Mar del Norte	SECA	SO_x
América del norte	ECA	SO_x , NO_x , PM_x
Zona caribeña de Estados Unidos	ECA	SO_x , NO_x , PM_x



Figura 5 Mapa de áreas de control de emisiones Fuente: maquinasdebarcos.blogspot.com



Las zonas próximas a la costa son donde se suele encontrar los mayores núcleos de población y, por tanto, los principales afectados de la contaminación atmosférica, no solo por cuestiones medioambientales, sino también de salud. Controlar las emisiones en zonas sensibles reduce los efectos perjudiciales de las mismas sobre la vida humana.

Aunque de manera directa se pueda tener una exposición a todos los buques que lleguen al puerto del estado que corresponda, las emisiones no se quedan estáticas y recorren millas a través de las costas es por ello que no solo es esencial restringir las emisiones de agentes contaminantes atmosféricos en los puertos, sino además en las zonas de navegación cercanas a estos y zonas urbanas situadas cerca de la costa. Las áreas de emisiones restringidas tendrán una mayor funcionalidad si tiene continuidad a lo largo de la costa, es por ello que cuando la OMI decide asignar una zona como ECA o SECA tiene en cuenta que se pueda cumplir dicha continuidad, y que los países que formen parte de esta normativa tenga una política medioambiental que permita el cumplimiento de la misma.

La evidencia indica que el tráfico marítimo crece al mismo ritmo que se abren nuevos mercados, rutas de paso o la mejora de la situación económica y política mundial. A esta casuística se une que la flota existente asciende a más de 50.000 buques, que ocasiona un mercado de combustible marino muy significativo. Se estima que el conjunto mundial de combustibles residuales mueve sus cifras en torno a los 200 millones de toneladas anuales mientras que los combustibles destilados como pueden ser el caso del Diésel o Gasóleo alcanzan cifras alrededor de unos 35 millones de toneladas anuales. Contribuyendo según la OMI al 2.7% de la contaminación atmosférica total de dióxido de carbono (CO₂). (Pérez, Mestre, Sáez, & Lara, 2016)

La normativa OMI sobre emisiones, así como las áreas de control rompen con la débil regulación del pasado que consentía contaminar sin tener ninguna penalización por ello. Es por ello que la Unión Europea ha aplicado las normas sobre el contenido de azufre de los combustibles marinos establecidas en el Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78 de la OMI, y se han incorporado en la Directiva 2005/33/EC1. En octubre de 2008 el Anexo VI de MARPOL fue modificado con la introducción de nuevos requisitos para el contenido de azufre a nivel mundial, y también límites más estrictos en las ECAs o SECAs. Así como un calendario de emisiones, donde establece los años en los que regulación es más dura y se debe emitir menos.

Aunque la UE (Unión Europea) haya tomado la iniciativa en la lucha contra el cambio climático, hay que tener en cuenta que la calidad del aire es transportada a grandes distancias, y, como tal, el área incluida en la solicitud de las ECAs o SECAs tiene mayor sentido si es continua a lo largo de las costas. La idea de cubrir todo el litoral europeo con las mismas restricciones de emisiones a la atmósfera tiene sentido en cuanto a unificar las leyes europeas y garantizar el derecho de todos los ciudadanos a la salud y el medio ambiente, pero supondría un perjuicio notable en la competitividad económica de los puertos europeos frente a los que no lo son. En el Mar Mediterráneo conviven puertos europeos junto con aquellos que no lo son, esto supone un riesgo para los puertos europeos situados cerca de éstos. Ya que puede verse modificado los puertos base de las rutas ante esta situación, ya que un cambio en la política de emisiones no solo afecta a las emisiones en sí sino además el buque debe adaptarse, estos cambios pueden afectar de manera directa a la economía del naviero y de aquellos que quieran transportar carga ya que el flete aumenta, debido a que los costes variables debido a combustible y operación del buque aumentan.



Si se amplían las ECAs o SECAs en Europa, el mercado actual de la UE es probable que sufra un desvío en las rutas y en los puertos, hacia aquellos que no están sujetos a control de emisiones, y también es posible que los modos de transporte integrado se modifiquen hacia un desplazamiento a favor de los puertos menos costosos y menos respetuosos con el medio ambiente. Es por ello que los puertos deben cobrar un papel cada vez más importante ya que del equilibrio entre normativa y servicios dependerá el futuro del transporte marítimo en Europa. Debido a esto la OMI ha decidido ser cauta a la hora de asignar zonas ECA y SECA.

En la actualidad las navieras eligen los puertos donde embarcar o desembarcar por un número de razones diversas, incluyendo las instalaciones disponibles, la ubicación geográfica y el acceso a los canales de distribución terrestres (ferrocarril y carreteras). En principio, la designación de ECAs o SECAs no debería afectar a las razones mencionadas para la elección de un puerto sobre otro, y el aumento de los costes de combustible asociados con la operativa en una zona protegida tendría que ser pequeño comparado con los costes totales de combustible de los buques de navegación marítima, ya que el tiempo que operan en las ECAs o SECAs sería sólo una pequeña parte del tiempo total de funcionamiento de un buque.

En el caso de los puertos origen o destino que pertenecen a ECAs o SECAs la consecuencia inevitable es un aumento del costo del flete que repercute en la mercancía transportada. En cambio, si se habla de puertos de escala la situación cambia porque los buques intentarán mantener los costes bajos y buscarán puertos donde las restricciones sean menores dentro de su ruta. Esto se debe a que cualquier cambio que se lleve a cabo en el transporte marítimo o en sus instalaciones son subvencionadas por el consumidor, no ocurre como en el transporte terrestre donde infraestructuras y nuevos cambios son subvencionados por los pertinentes gobiernos y autoridades.

Una de las posibles consecuencias negativas de la aplicación de los combustibles de baja emisión de azufre podría incluir un cambio de actividad del transporte del mar hacia tierra. Y esto significaría la consiguiente congestión y contaminación vial, y aumento de los precios del combustible, así como desmejorar los esfuerzos actuales para reducir el transporte por carretera mediante el desarrollo del transporte marítimo de corta distancia (Short Sea Shipping) (Menendez, 2016).

Las ECAs y SECAs tienen una serie de riesgos y beneficios que han de ser expuestos y tenidos en cuenta antes de determinar que un área determinada pase a ser designada como tal, entre los riesgos que enfrentan estas áreas donde se restringen las emisiones se encuentran:

- El aumento del precio en el flete debido a los cambios que debe efectuar el buque en cuanto a combustible o en su operación, esto puede llevar a la pérdida de competitividad de los puertos, así como un posible desvío de las rutas de transporte a otros países fuera de las SECAs y ECAs. Adaptarse a la nueva normativa implica adecuar el buque, estas modificaciones suelen tener altos costes.
- Riesgos de la pérdida de competencia en el negocio del bunkering.

En cuanto a los beneficios que conllevan a esta designación se encuentra la disminución de la contaminación generada por los buques lo que lleva a la preservación de la salud humana y del medio ambiente. Reducir el nivel de las emisiones nos lleva a un desarrollo



industrial ms eficiente, así como la estimulación de las energías renovables, esto produce un desarrollo naval ecológico (Olier Aguilar & Álvarez Lara, 2015).

Tabla 3 Riesgos y beneficios de zonas ECA y SECA Fuente: Elaboración propia

Implantación zonas ECAs/SECAs	Riesgos	Beneficios
	Aumento del precio en el flete	Disminución de la contaminación generada
	Pérdida de competitividad en los puertos	Preservación de la salud humana
	Posible desvío de las rutas de transporte a otros países fuera de las ECAs y SECAs	Preservación del medio ambiente
	Adecuación costosa a la nueva normativa	Desarrollo industrial eficiente
	Pérdida de competencia en el negocio del bunkering	Estimulación de energías renovables
	Modificación de los modos de transporte.	Desarrollo naval ecológico
	Incertidumbre política en las ECAs y SECAs	Competencia equiparada en todos los países

En conclusión, a implantación de las ECA y SECA tienen una gran desventaja tal y como se muestra en la tabla 3 y es que la regulación debilita la competitividad, no obstante, las regulaciones son esenciales para la salud y el medio ambiente, y pretenden una industria naval de innovación dentro de una competitividad equilibrada. Las consecuencias a corto plazo serían principalmente económicas con un impacto inmediato, que se traducirían en un aumento considerable de los costos marítimos dentro de las ECAs y SECAs. En cuanto a los beneficios son más difíciles de cuantificar, y con repercusión a medio y largo plazo.

CAPÍTULO 3

TRANSPORTE MARÍTIMO



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



cualquier tipo de mercancía en las condiciones de seguridad y rapidez óptimas es por ello que puertos como el de la Bahía de Algeciras mueve cada semestre una media de 51,8 millones de toneladas, seguido por los 36,2 millones de toneladas que mueve el puerto de Valencia o los 24,2 millones de toneladas movidas por el puerto de Barcelona. Aunque la mercancía general es el grupo más numeroso de mercancía manipuladas alcanzando un 46,6% del total (Puertos del Estado, 2017).

El transporte marítimo, además está regulado de forma exhaustiva en el ámbito internacional, lo que hace que sea un transporte seguro, y en la mayoría de los casos, el más respetuoso con el medio ambiente teniendo en cuenta los factores de escala que se producen en el transporte.

Los efectos de escala en los buques se producen gracias a que en un solo trayecto el buque es capaz de transportar un nivel de mercancía mayor que en otros medios de transporte, por lo tanto, para que otro transporte pueda llevar ese mismo nivel de mercancías necesita realizar un mayor número de trayectos creciendo así las emisiones.



3.2. Transporte marítimo de corta distancia

La ruta que realiza el buque Ro-Ro, seleccionado para este trabajo, se sitúa dentro del marco denominado tráfico marítimo de corta distancia. El tráfico marítimo de corta distancia se define como el movimiento de mercancías y pasajeros, por mar, entre puertos situados en territorio de la Unión Europea, o entre estos puertos y puertos situados en países no europeos, con una línea de costa en los mares ribereños que rodean Europa. Esto incluye los servicios *feeder*, a lo largo de la costa y con islas, ríos o lagos. Engloba prácticamente todo el tráfico marítimo de origen o destino no transoceánico de los puertos europeos (Menendez, 2016).

El transporte marítimo de corta distancia encuentra su sentido en la contribución de la formación de cadenas logísticas marítimo – terrestres para lograr la solución más competitiva de transporte.

La necesidad del transporte marítimo de corta distancia recae en que las carreteras están cada vez más saturadas y la logística *Just-in-time* que hasta ahora ofrece el transporte por carretera está en peligro, por lo tanto, el transporte marítimo puede ofrecer una solución viable a la par que respetuosa con el medio ambiente. En el Mediterráneo se encuentran grandes problemas de transporte terrestre, lo que resalta la importancia del transporte marítimo de corta distancia por sus aguas (Puertos del Estado, 2017).

Entre sus ventajas dentro de la cadena logística en el transporte de mercancías y/o personas mediante transporte marítimo se encuentran las siguientes:

- El Transporte marítimo de corta distancia es respetuoso con el medio ambiente en comparación con el resto de medios de transporte, el transporte marítimo es el menos contaminante y es el que menos cantidad de CO₂ emite por tonelada y kilómetro. Aun así, su impacto es importante en cuanto a emisiones se refiere es por ello que se hace latente las restricciones para conseguir que las emisiones sean las menores posibles.
- El transporte marítimo emite entre dos y tres veces menos de CO₂ que el transporte por carretera. El problema es la emisión de otros gases perjudiciales como son los NO_x o el SO₂.
- Esto ha impulsado medidas para que los hidrocarburos que consumen los buques reduzcan su cantidad de azufre o bien disponer a estos de sistemas que absorban las cantidades de SO₂ producidas en los motores y las calderas de los buques.
- Aplicando las nuevas medidas de reducción del azufre en los combustibles marinos, llegando a niveles de un 0,1% en contenido de azufre, por lo que la emisión de SO₂ se reduce prácticamente al mínimo.
- Mayor seguridad, los índices de siniestralidad del transporte marítimo, en comparación con el resto de modos de transporte es muy inferior.
- Menor saturación/congestión de las infraestructuras y menor coste de las infraestructuras marinas, en el transporte marítimo no existe saturación de navegación en las vías marítimas. La única saturación que puede existir en el transporte marítimo, es la saturación infraestructural en los puertos.

Pero, también tiene ciertos hándicaps, el transporte marítimo de corta distancia es parte de un transporte multimodal, perteneciente a una cadena logística y por ello, es intrínsecamente más complejo tanto para su realización como para su contratación.



La infraestructura portuaria a diferencia de muchas infraestructuras terrestre no encuentra su financiación principal en los presupuestos generales de los estados. Las infraestructuras marítimas las pagan los usuarios, un principio conocido como “user pays”, según el cual los que financian la infraestructura portuaria son los cargadores y navieros. Esto lleva a los navieros a aumentar el coste del flete, mucho más en aquellos casos donde el combustible sea más caro debido a que se usan combustibles destilados.

No solo pagan por el uso de las infraestructuras portuarias, los buques y las cargas deben de recibir los otros tipos de servicio que influyen en su coste y operatividad como es el caso de remolcadores, suministro de combustible cuando este esté fondeado entre otros. Esto encarece el transporte marítimo.

La mayor desventaja frente al transporte por carretera es la gran flexibilidad del transporte por carretera en horarios y destinos, este inconveniente es difícil de cuantificar. Por carretera se elige la hora de salida de los productos y de llegada, también se eligen los destinos. Sin embargo, el transporte marítimo tiene unos horarios de destino preestablecidos, que pueden llevar a la empresa de transporte, aumentar sus costes de transporte a cambio de una mayor flexibilidad.

Al transporte marítimo de corta distancia le acompaña las autopistas del mar diseñadas para dotar de flexibilidad a este tipo de transporte y que la desventaja con respecto al transporte terrestre sea mínima, éstas pretenden dotar al mar de una especie de “vía” permanente, que se puede entender como un puente o una autopista virtual. Es por ello que es imprescindible establecer rutas prefijadas, con puertos de origen y destino claramente definidos (Menendez, 2016). Estos puertos, una vez determinados, no deberán ser cambiados al menos en un plazo corto de tiempo. Por otra parte, deben señalar puntos intermedios donde tocarán tierra, estando dichos puntos sujetos a las mismas limitaciones que los puertos de origen y destino final. En la Figura 8 se observan las principales rutas que tienen como origen España.



Figura 8 Autopistas en el mar desde España Fuente: Comisión Europea, 2010



Las autopistas del mar dotan de un horario claramente definido el cual los usuarios pueden utilizarlo, por tanto, será imprescindible determinar las frecuencias de entradas y salidas en cada uno de los puertos que formen parte de la red y los horarios pertinentes.

Estas deben ofrecer un transporte puerta a puerta, cuyo coste y nivel de calidad le permitan un estándar de competitividad en el servicio que pueda ser equiparable al ofrecido en el transporte terrestre. De no ser así deberá ser evaluada al cabo de un cierto periodo de tiempo ya que su objetivo principal es dar la capacidad al transporte marítimo a competir en igualdad con el transporte por carretera.

En el Mar Mediterráneo la red de servicios marítimos de corta distancia es una realidad, y provoca una significativa redistribución de tráfico. Esto no ocurre en el transporte marítimo de corta distancia en el Atlántico español ya que no disfruta de una situación tan avanzada como la del Mediterráneo Occidental. Es por ello que la ruta a estudiar se engloba dentro de lo que se llama transporte marítimo de corta distancia usando autopistas del mar.



3.3. Transporte marítimo como un complemento al transporte por carretera

El transporte marítimo se sitúa como una solución viable ante una saturación del transporte terrestre, pero este debe centrar los esfuerzos en hacerlo cada vez mejor en cuanto a tiempos, emisiones y coste. Estos tres factores son los que llevarán al éxito o al fracaso al transporte marítimo de corta distancia en determinadas zonas. Apoyan esta solución, muchos motivos como son su infraestructura, la cual no está saturada y su admisión a elevadas tasas de crecimiento, su consumo energético específico el cual es reducido, sus estadísticas de seguridad son excelentes entre otros.

El transporte marítimo es un medio muy seguro ya que su seguridad está regulada en el ámbito internacional por medio de numerosos convenios de la organización marítima internacional (OMI).

La posibilidad de trasladar el transporte por carretera al mar se basa en la aparición de nuevos servicios marítimos, cuyo recorrido es inferior al de la carretera, sobre todo a medida que los orígenes y destinos se sitúan más al sur tanto en la península ibérica como en la itálica. Así como el volumen de carga transportada, éste es mayor en buques, en un solo trayecto se transporta un mayor volumen de carga que el transporte por carretera y la distancia recorrida es menor.

El tráfico marítimo de corta distancia más viable actualmente en el Mediterráneo es el que se basa en la operativa de carga y descarga de carga rodada, asociado a los buques Ro-Ro (Roll on – Roll off). La operativa Ro-Ro permite embarcar y desembarcar camiones y semirremolques en los buques, algo que lleva a reforzar el concepto de intermodalidad. El tráfico de modalidad Ro-Ro tiene dos grupos de mercancías muy diferenciadas: los coches y las unidades de carga (remolque y semirremolque). Los cuales acceden al buque por sus propios medios o remolcados y no ocupan grandes espacios de almacenaje en los puertos tal y como llegan al puerto de destino, desembarcan nuevamente con sus propios medios y son llevados a su destino final, esto reduce el tiempo de espera en el puerto a que sean recogidos. Es un tipo de buque que permite llevar a cabo el llamado transporte puerta a puerta.

Al embarcarse el camión en el barco, el servicio de transporte marítimo se convierte en un complemento al servicio del transporte por carretera y no su mayor competencia. El término de autopista del mar recoge precisamente esta idea del buque como soporte del camión, en lugar de la infraestructura de carretera.

En España existe un intenso tráfico de coches tanto de exportación procedente de las diversas fábricas situadas en territorio peninsular como de importación para el consumo interno. Aunque se trata de un tráfico que solamente representa el 20% del que se mueve con operativo Ro-Ro en España, tiene mucha mayor cuota cuando se mide en unidades.

Las autopistas del mar son servicios a la disposición del transporte, basados en transporte marítimo nuevo o existente, integrados en una cadena logística puerta a puerta, que concentran flujos de carga en enlaces de transportes marítimo de corta distancia viables, regulares, frecuentes, de gran calidad y fiables.

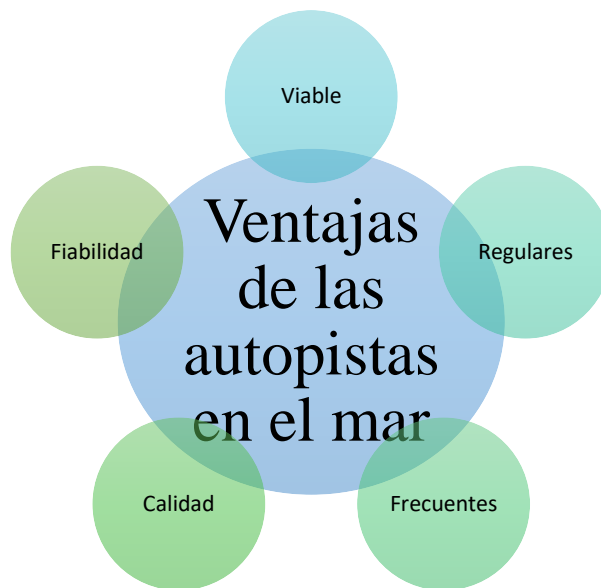


Figura 9 Ventajas del TMCD Fuente: Elaboración propia

El público objetivo principal de las autopistas del mar y, en general, del transporte marítimo de corta distancia emergente en Europa es el sector de los transportistas por carretera, debido a que aun considerando la casuística más optimista el tráfico por carretera esperado es tal que desborda la capacidad de las carreteras. La congestión y sus efectos hacen que se planteen situaciones en la que el transporte por carretera se apoye en el transporte marítimo. Éste no debe plantearse como un sustitutivo, ya que el camión seguirá siendo una forma de transporte incuestionable en el mercado del transporte.

Para lograr que la cadena marítimo-terrestre sea verdaderamente competitiva con respecto a la cadena exclusiva por carretera, es necesario acercarse lo más posible a la forma en que esta última cubra los requerimientos de calidad/coste que impone la demanda del transporte. Así como reducir sus plazos de entrega en el menos posible, posibilitando la regularidad del transporte con un solo buque en una sola ruta, de no ser así y deber usar más de un buque para satisfacer las necesidades de una ruta manteniendo la demanda, los factores de escala pasarían a un segundo plano en las ventajas de dicho transporte, ya que no se aprovecharía tanto como se debería la capacidad de carga de dichos buques.

CAPÍTULO 4

BUQUE EN ESTUDIO



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



4. Buque en estudio

4.1. Características típicas de los buques Ro-Ro

Los buques Roll-on Roll-off (Ro-Ro), son un tipo de buque que están diseñados y construidos para el transporte de carga rodada, como automóviles o camiones, los cuales pueden acceder al buque por sus propios medios propulsivos o mediante camiones que los remolque.

Éstos acceden al buque mediante grandes compuertas que están situadas a proa o a popa del buque, y en algunos casos se encuentran las compuertas en ambas, esto facilita una carga y descarga del buque de forma rápida, muchos otros tienen medios propios de acceso horizontal para dicha carga rodada.

En las últimas décadas ha evolucionado el concepto de buque Ro-Ro, pasando de ser un buque adecuado únicamente para viajes cortos a un buque que aporta un valor añadido al transporte debido a que tienen la capacidad de dar unos medios de carga y descarga propios, lo que implica que puede cargar y descargar la carga con unos recursos portuarios mínimos. Las rampas de las que son dotadas los buques han evolucionado a lo largo de los años, pasando de tener unas rampas de 6 metros de longitud por 3 de ancho, a las actuales que alcanzan los 40 m de longitud por 20 de ancho, capaces de soportar más de 400 toneladas.

Además, el almacenamiento de la carga transportada, tampoco requiere una infraestructura portuaria especial. Ya que la carga que transporta son unidades que disponen de motor o pueden ser desplazadas mediante cabezas tractoras.



Figura 10 Disposición estructural de los buques Ro-Ro Fuente: Exponav.org

La manipulación de la carga dota a la operación de carga y descarga de rapidez, así como da mayor facilidad al resto de operaciones. No obstante, determinar el peso y volumen precisos de la carga es muy complicado. Debido a que no todas las unidades de carga tienen las mismas dimensiones ni el mismo peso.

Entre las mayores diferencias que se pueden encontrar en cuanto a la carga rodada respecto a otro tipo de carga es que su ventaja en la poca ocupación de los puertos y su fácil integración en el mercado de los contenedores.



En cuanto al diseño de este tipo de buques depende de la carga que pueden transportar. No obstante, hay unas características generales que prevalecen a las específicas. Estas características generales son que en casi todos los buques podrían estar en sus cubiertas vehículos o plataformas con mercancías, ya que, por norma general disponen de varias cubiertas o garajes que se extienden desde proa a popa, para facilitar la entrada y salida horizontal de vehículos con o sin carga. Asimismo, cuentan con una superestructura muy alta y alargada.

El buque debe diseñarse con la premisa que las cargas no pueden estar apiladas y que no todas tienen la misma altura por lo tanto va a variar el espacio que ocupan en cubierta; esto ocasiona que la utilización del volumen no sea eficiente. También su capacidad se ve reducida a la mitad que un buque tradicional, debido a que no se puede apilar, y que se debe mantener un espacio entre vehículos para evitar daños. Esto se convierte en una desventaja significativa frente a otro tipo de buques.

Otra desventaja a destacar es su diseño arriesgado, debido a la posición de grandes puertas externas las cuales están cercanas a la línea de flotación, con los años y debido a diversos accidentes, actualmente se dispone de cámaras de seguridad enfocando dichas puertas, para evitar que el barco pueda partir de puerto con ellas abiertas y embarcar agua poniendo en peligro la estabilidad del buque.

Para albergar los vehículos de gran tamaño, en el diseño de estos buques se prescindió de mamparos estancos adicionales, dispone de los obligados por normativa, pero los adicionales para reforzar no solo la estructura sino la estabilidad e integridad del buque en caso de inundación no los lleva, el motivo principal es para aprovechar el máximo espacio posible y al mismo tiempo tener mayor movilidad en las cargas. Sin embargo, en caso de vía de agua no se podrá evitar que existan momentos por superficies libres, causando corrimiento de carga lo que provocará que una vez escorado el buque su capacidad recuperadora se vea mermada de manera exponencial. Es por ello que se debe tener especial cuidado a la hora de estibar la carga, ya que la integridad del buque corre altos riesgos.



Figura 11 Disposición de la carga en los buques Ro-Ro Fuente: Ralmsem Ro-Ro

Este hecho va en detrimento de la seguridad, ya que, en caso de accidente, el tiempo de hundimiento del buque se vería elevado por lo que el de evacuación reduciría, del mismo modo, en caso de incendio, éste tiene mucha más facilidad para expandirse. A pesar de lo mencionado, sí que tienen mamparos de subdivisión y de colisión tal y como prescribe el SOLAS (Convenio Internacional para la Seguridad de la vida Humana en el Mar). La situación de las rampas las cuales están situadas muy cerca de la línea de máxima carga



influye negativamente ante una situación de peligro por lo tanto, si las rampas de carga y descarga no están debidamente cerradas, por un defecto de trimado o de escora repentina debido a malas condiciones meteorológicas, podría ingresar agua por la rampa produciendo una reacción en cadena ya que la carga sería barrida por el agua, aumentando la escora del buque en muchos casos provocando que este vuelque.

Que las rampas estén situadas a proa o popa del buque conlleva un gran inconveniente, ya que suponen un punto débil potencial en la estructura del buque, el constante uso de las mismas podría provocar desgaste, el cual ante cualquier defecto o daño estructural podría quitar a las rampas su estanqueidad.



Figura 12 Rampas de buques Ro-Ro Fuente: Naviera Armas

Este tipo de buques suelen estar dotados de una gran obra muerta, esta superestructura tan grande, comparada con la de otros buques hace que sean más propensos a ser afectados por las inclemencias meteorológicas, especialmente el viento. Además, en caso de un mal trincaje, con condiciones climáticas desfavorables, la carga puede adquirir movimiento con mucha más facilidad que la de otro tipo, afectando a la estabilidad del buque. Esta obra muerta, plantean un problema respecto a los sistemas de evacuación, Los botes salvavidas se encuentran a una altura superior a la normal con lo que conlleva un peligro a la hora de arriarlos.

Es por ello que tanto, la tripulación como los pasajeros se ven ante una situación de vulnerabilidad, por eso la tripulación deber ser especialmente cuidadosa y meticulosa con todas las operaciones que se realicen a bordo ya que un error humano podría llevar consigo una consecuencia mucho peor.

Los buques Ro-Ro tiene una mercancía muy concreta: vehículos que pueden embarcar y desembarcar por sí mismos. Las terminales que las alberga pueden llegar a ser el punto más importante de entrada (importación) y salida (exportación) de vehículos de un país.

La característica primordial de este tipo de terminales es su necesidad de agilidad en los procesos documentales, así como de las operaciones físicas. Desde que el buque atraca en puerto se comienza una serie de operaciones que darán lugar a una exhaustiva y coordinada maniobra no solo de descarga de vehículos sino de su casi automática salida de los puertos.



En los puertos que reciben este tipo de buques se encuentran dos casuísticas, que el puerto esté dotado de una terminal específica que le facilite la entrada a este tipo de buques y aquellos que los medios que cuentan son únicamente los que posee el buque.



4.2. Terminal de carga rodada

Conviene indicar cómo se integran los buques Ro – Ro en las terminales portuarias. En este sentido, las terminales de carga rodada tienen un funcionamiento concebido como un proceso productivo en el que participan una serie de factores productivos, y cuyo “output” o salida del proceso productivo viene en forma de movimientos de unidad de carga por unidad de tiempo.

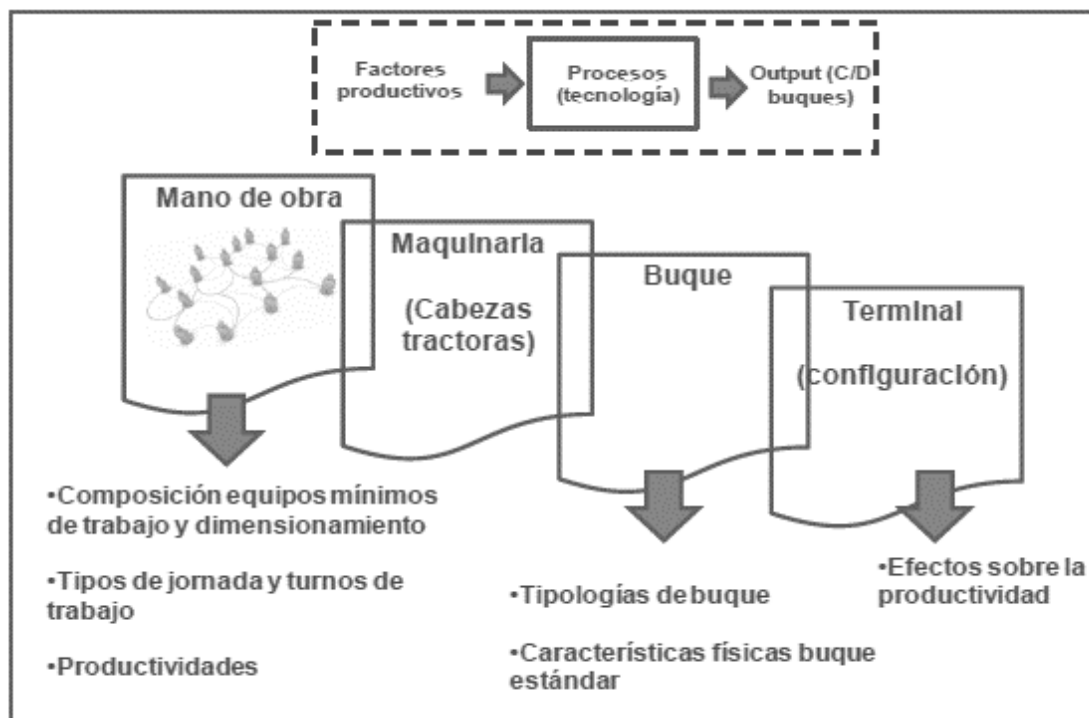


Figura 13 Factores que intervienen en las terminales de carga rodada Fuente: VenicePort

Los principales factores productivos de una terminal de carga rodada son la mano de obra portuaria y la maquinaria de tracción para el arrastre de plataformas. Hay una serie de elementos físicos que distinguen las terminales de carga rodada del resto de terminales, estas características engloban las rompas y tacones requeridos en la zona de muelle con el fin de facilitar las operaciones de carga y descarga, así como la no presencia de grúas en la línea de atraque. La carga rodada puede ser de diferente tipología como son plataformas, remolques o semirremolques los cuales necesitan cabezas tractoras para su carga y descarga, mientras que los camiones o vehículos se clasifican como carga autopropulsada.

Existen terminales únicamente especializados en la carga autopropulsada éstas abarcan desde pequeños vehículos utilitarios y turismos hasta vehículos de alta ocupación o transporte especial (maquinaria de obras públicas). Este tipo de terminales se caracteriza por la necesidad de disponer de grandes explanadas para el almacenaje de la mercancía. Las terminales de vehículos no necesitan de maquinaria especial, pero si dependen directamente del factor humano ya que los procesos de estiba, desestiba y desplazamientos internos son llevados a cabo por estibadores y personal contratado por la terminal. La Figura 14 muestra un esquema de las principales operaciones llevada a cabo en una terminal de buques Ro-Ro.



Figura 14 Esquema terminal Ro-Ro Fuente: WWL



4.3. Características del buque en estudio.

4.3.1. Características generales

El buque Ro-Ro elegido en este estudio es la tipología común de Ro-Ro que navega por las aguas del mar Mediterráneo realizando rutas de corta distancia. Las características de dicho buque cobran gran importancia en el cálculo de la resistencia total la cual llevará a estimar de manera las emisiones durante toda la ruta de navegación. Los datos obtenidos en este estudio podrán servir de guía para ubicar la situación actual en cuanto a emisiones de estos buques se trata, pudiéndose extrapolar a buques de la misma tipología con diferentes dimensiones si se disponen de estos los datos de resistencia real en cada instante de su navegación, o mediante mapeos de la misma.

El buque en estudio tiene las características en cuanto a dimensiones y coeficientes se refiere reflejado en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4. Dimensiones principales del buque Ro-Ro Fuente: Elaboración propia

Dimensiones principales	Valor	Unidades
Eslora (Loa)	180,6	m
Eslora entre perpendiculares (L_{pp})	170,18	m
Manga (B)	22,9	m
Puntal (D)	14,14	m
Velocidad de proyecto al 90% MCR	18	Nudos
Dos hélices de paso variable de 4 palas con su timón a popa		
Puntal a cubierta principal	8,5	m
Puntal a cubierta expuesta	14,14	m
Puntal a cubierta habilitación 1	19,65	m
Puntal a cubierta habilitación 2	22,45	m
Puntal a cubierta puente	25,25	m
Puntal a techo cubierta puente	28,05	m
Desplazamiento	14.918	Tn
Peso muerto	7.500	Tn
Peso en rosca	7.418	Tn
Potencia	10.305	kW

Tabla 5. Parámetros de estabilidad y coeficientes Fuente: Elaboración propia

Parámetros de estabilidad/ Coeficientes	Valor	Unidades
Posición vertical del centro de gravedad (KG)	10.833	m
Posición vertical del centro de gravedad (KC)	3,399	m
Altura metacéntrica (GM)	1,523	m
Coefficiente de la flotación (C_f)	0,86	-
Coefficiente de bloque (C_b)	0,60	-
Coefficiente prismático (C_p)	0,61	-
Coefficiente de la maestra (C_m)	0,98	-



El buque está capacitado para albergar 1400 metros lineales de unidades de carga rodada con un peso muerto de 7500 toneladas, es por ello que se dispone de 5 cubiertas entre las cubiertas de carga y de habilitación, con capacidad de albergar 2100 unidades de transporte individual.

Cada hélice está conectada a un motor Wärtsilä 38 semi-rápido de 8 cilindros en línea a 600 rpm cuya potencia nominal es de 5.800 kW (7.888CV) engranado a reductoras 5.83:1.

Para las necesidades de generación de energía eléctrica en navegación, se disponen dos PTOs una por eje propulsor con una potencia cada una de 750 kW, configurando una cámara de máquinas con una potencia instalada total de 11.600kW (15.766CV). Para el sistema de maniobra se instalan dos servomotores de 34 kW de potencia cada uno y una hélice de maniobra de 600 kW que es alimentada eléctricamente.

El buque dispone de dos motores propulsores Wärtsilä 8L/38 IMO Tier II, cuyas características son las mostradas en la Figura 15.

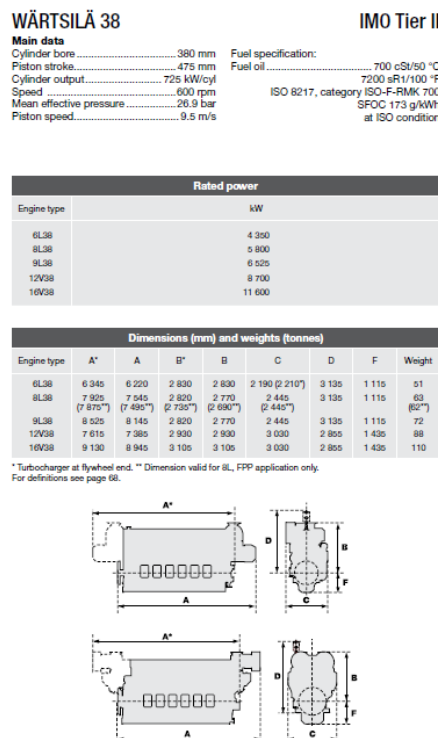


Figura 15 Guía del motor Wärtsilä Fuente: Wärtsilä engines

Actualmente, a excepción los motores gas/fuel, no hay ninguno que cumpla con el nivel de emisiones de NO_x TIER III (Regla 13 del Anexo VI Revisado de MARPOL (MEPC.176(58))). A partir del 1 de enero de 2016, todos los buques que operen en zonas de control de emisiones, ECAs, deberán disponer abordo de motores instalados que cumplan con IMO TIER III o disponer de una tecnológica añadida que permita cumplir con dicho nivel de emisiones. Actualmente, existen diversas tecnologías para reducir el nivel de emisiones de NO_x, entre ellas cabe destacar la recirculación de gases de escape y la reducción catalítica selectiva.

En cuanto al combustible de consumo habitual, el *Project Guide* del motor principal recomienda el uso de un combustible HFO (*Heavy Fuel Oil*) con las siguientes características reflejadas en la Tabla 6.



Tabla 6 Características del Heavy Fuel Oil Fuente: Elaboración propia

HFO	
Densidad a 15°C (kg/m ³)	<991
Viscosidad cinemática	
a 100 °C (cSt)	<55
a 50 °C (cSt)	<700
Punto de inflamación (°C)	>60
Punto de fluidez (°C)	<30
Residuo de carbón (%)	<22
Cenizas (%)	<0,15
Sedimentos después de reposar (%)	<0,10
Agua (%)	<1,00
Azufre (%)	<5,00
Vanadio (mg/kg)	<600
Aluminio y silicio (mg/kg)	<80

El motor principal como los auxiliares consumen HFO, y dado que son motores de cuatro tiempos, que trabajan mejor con combustibles ligeros, aunque están preparados para consumo de HFO, se usa un combustible de viscosidad, en torno a 700 cSt a 50 °C.

Para el cálculo de combustible necesario para los mismos se ha de tener en cuenta que el buque ha de tener una autonomía para 8.000 millas al 90% del MCR y con un 15% de margen de mar. Además, hay que añadir el margen de entrada en puerto. Por otro lado, es necesario tener en cuenta que el poder calorífico del combustible pesado HFO que consumirá el buque es menor que el correspondiente para el que proporcionan los fabricantes de motores el consumo en banco de pruebas.

Según se indica el *Project Guide* el poder calorífico de este último es 10200 kcal/kg (42700 kJ/kg) frente a las 9800 kcal/kg del primero. Con lo que capacidad másica total de combustible necesaria para motores principales es:

Tabla 7 Combustible para los MMPPs Fuente: Elaboración propia

Combustible para MMPPs	
Potencia MMPPs (Motores principales) al 85% MCR (kW)	10.440
Autonomía (millas)	8.000
Velocidad servicio al 85% MCR con un 15% de margen de mar (kn)	17,3
Autonomía (días)	19
Autonomía (horas)	462
Peso de combustible (Tn)	835
Poder cal. Banco de pruebas (kcal/kg)	10.200
Poder cal. Combustible mercado (kcal/kg)	9800
Peso de combustible corregido (Tn)	869
Entrada en puerto +10% (Tn)	87
Capacidad másica para MMPP (Tn)	956



Tabla 8 Capacidad de tanques de almacén de HFO Fuente: Elaboración propia

Capacidad de tanques de almacen de HFO	
Capacidad total de HFO (Tn)	1.081
Capacidad de tanque de sedimentación de HFO (Tn)	61
Capacidad de TSD de HFO (Tn)	56
Combustible en tuberías, aprox 5% de capacidad total (Tn)	54
Capacidad de tanque almacen de HFO (t)	909
Densidad prom (kg/m ³)	944
Capacidad de tanque almacen (m ³)	963
Margen de hierros (%)	5
Margen de llenado (%)	2
Volumen de tanque de almacen (m ³)	1.031

Se dispone de capacidad suficiente para abastecer a los Motores Principales durante al menos 48 horas con *Marine Diesel Oil* (MDO), por ello el buque dispondrá de tres tanques de MDO (uno almacén y dos de servicio diario), con una capacidad conjunta de 110 t (131 m³). Aparte de estos tanques de combustible, el buque dispondrá de un tanque de Diesel Oil para el generador de emergencia.

Tabla 9 Capacidad de los tanques de almacén de MDO Fuente: Elaboración propia

Capacidad de los tanques de almacén de MDO	
Potencia MMPPs (kW)	11.600
Consumo MMPP (gr/kW h)	173
Autonomía del tanque (h)	48
Margen de lodos (%)	8
Margen de temperatura (%)	2
Margen de poder calorífico (%)	4
Capacidad unitaria (TN)	110
Densidad promedio (kg/m ³)	840
Capacidad (m ³)	131
Margen de hierros (%)	5
Factor de llenado (%)	2
Volumen de cada tanque (m ³)	141

El buque estudiado contempla lo siguiente en su proyecto inicial; la instalación de Scrubbers (permitido por la Regla 4 del Anexo VI) o adecuación de tanques de almacenamiento y sistema de suministro para usar únicamente MDO.

En consecuencia, del Anexo VI del MARPOL el cual establece que, a partir del 1 de enero de 2012, el contenido de azufre de todo fueloil utilizado a bordo de los buques no excederá de 3.5 % masa/masa. Alternativamente, según la Regla 4 del Anexo VI Revisado de MARPOL (MEPC.176(58)), el buque podrá consumir combustibles con un porcentaje de azufre superior al permitido siempre y cuando utilice un método alternativo cuyas emisiones sea equivalente o mayor en términos de reducción de las emisiones, y que sea aprobado por la Administración. En cuanto a esta normativa el buque no tendría ningún



problema ya que se podría utilizar HFO de bajo contenido en azufre. No obstante, a partir del 1 de enero de 2015, los Buques que operen en Zonas de Control de Emisiones de SO_x (SECA) tendrán que tener en cuenta que el contenido de azufre de todo fuel oil utilizado a bordo no excederá de 0,10 % masa/masa.

Esta limitación de contenido de azufre en el combustible supone que el buque no pueda consumir HFO de bajo contenido en azufre y tenga que comenzar a quemar combustibles más refinados como puede ser el caso del MDO o bien consumir HFO con un sistema *Scrubber* que haga que las emisiones sean equivalentes a consumir un combustible de bajo contenido en azufre. Este último deberá ser estudiado y quedará a juicio del armador la opción de su instalación.

4.3.2. Modelado del buque y condiciones de carga

El buque a estudiar es un buque ya construido y que actualmente navega por el mar Mediterráneo por ello a la hora de modelar el buque se partirá del plano de formas del mismo, realizando el modelado mediante el software de modelado naval Rhinoceros®, obteniendo el modelo de la Figura 16.

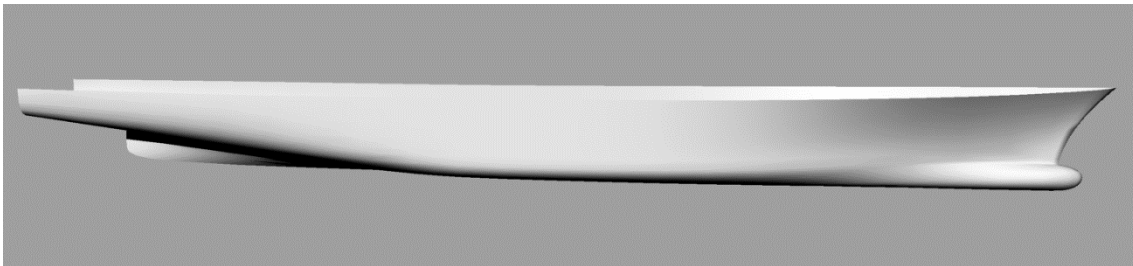


Figura 16 Modelado del buque Ro-Ro Fuente: Elaboración propia

Para los cálculos que se quieren realizar sobre el buque en estudio, solo se va a tener en cuenta la superficie mojada del mismo, se va a llevar a cabo los cálculos en dos condiciones de carga diferentes la primera de ellas con el buque con un 100% carga y de consumibles, el cual se considera el calado de diseño del buque y la segunda condición con un 100% de carga y un 10% de consumibles. Representan la salida a plena carga y la llegada a plena carga, no obstante, lo que varía en el buque son los consumibles. Es por ello que se toman dos carenas iguales con la única diferencia que una de ellas tendrá una mayor superficie mojada que la otra.

Se llamará carena 1 a la que corresponde con la primera condición de carga que tiene un calado de 6,195 metros, la cual tiene las características representadas en la Tabla 10.



Tabla 10 Características de la condición de carga 1 Fuente: Elaboración propia

Resumen de conceptos de la situación de carga salida (Plena carga 1400mL) y 100% de provisiones y consumos)				
	Nombre del concepto	(%) de carga	Masa total (Tn)	Masa total al (%)
Carga	Tráileres		2802	
Fuel oil (HFO)	FO1 Mamparo de proa CCMM (Tanque Almacén Fuel Oil)	98%	325	318,40
	FO1_DFB	98%	97	94,86
	FO1_DFC	98%	102	99,85
	FO1_DFE	98%	102	99,86
	FO2_DFB	98%	113	110,90
	FO2_DFC	98%	131	128,52
	FO2_DFE	98%	113	110,90
	TSD_FOB=TSD1	98%	33	32,04
	TSD_FOB=TSD2	98%	33	32,04
	Tsed (Tanque sedimentación)	98%	72	70,62
	Reboses de combustible, V005	98%	10	9,42
Diesel oil	TA_DO (tanque almacén Diesel Oil)	98%	133	130,16
	TSD_DOB (tanque servicio diario Diesel Oil)	98%	3	3,38
	TSD_DOE (tanque servicio diario Diesel Oil)	98%	3	3,38
Aceite	ACEITE MOTOR, L03P	98%	8	8,23
	ACEITE MOTOR, L03S	98%	9	8,87
	ALMACENAMIENTO ACEITE SUCIO, L001	98%	7	6,78
	ALMACENAMIENTO ACEITE LIMPIO, L002	98%	7	6,78
	REBOSES ACEITE, V007	98%	9	9,17
Lastre		98%	6654,8	6521,70
Otros	AGUA CILINDROS	98%	5	4,93
	AGUAS ACEITOSAS	98%	14	13,32
	Tanque lodos babor, V003	98%	1	1,15
	Tanque lodos estribor, V004	98%	1	1,15
	T_AD (tanque agua dulce)	98%	106	104,04
	Víveres 4Kg/persona día	100%	2	2
	Cargos y pertrechos	1	2	2
	Tanque Antiescora B	0%	91,125	0
Tanque Antiescora E	0%	91,195	0	



	Masa total (Tn)	Masa total al (%) (Tn)
Total (carga + combustible + lastre + otros)	8.274,48	8.109
Peso en rosca	7.417	7.417
TOTAL	15.691,48	15.526

Las características hidrostáticas de dicha condición de carga son las de la Tabla 11

Tabla 11 Características hidrostáticas condición de carga 1 Fuente: Elaboración propia

Características hidrostáticas condición de carga 1	
Calado medio del buque m	6,180
Desplazamiento Tn	15526
Escora deg	0,0
Calado en FP m	6,037
Calado en AP m	6,323
Calado en LCF m	6,195
Trimado (+ve por popa) m	0,286
WL Longitud m	174,810
Manga máxima en WL m)	22,904
Área mojada m ²	4.783,653
Waterpl. Superficie m ²	3.467,209
Coefficiente prismático. (C _p)	0,630
Coefficiente de bloque. (C _b)	0,599
Coefficiente de área de selección máx. (C _m)	0,979
Coefficiente de la superficie de agua. (C _{wp})	0,866
LCB desde cero pt (+ve fwd) m	83,521
LCF desde cero pt (+ve fwd) m	75,866
KB m	3,557
KG fluido m	10,123
BMt m	8,981
BML m	460,954
GMt corregido m	2,416
GML m	454,389
KMt m	12,538
KML m	464,511
Inmersión (TPc) tonelada/cm	35,539
MTc tonelada.m	414,462
RM a 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonelada.m	654,534
Grado máximo de inclinación de la cubierta	0,0961



Se llamará carena 2 a la que corresponde con la condición de carga 2, que tiene un calado de 5.846 metros, la cual tiene las características indicadas en la Tabla 12.

Tabla 12 Características de la condición de carga 2 Fuente: Elaboración propia

Resumen de conceptos de la situación de carga llegada (Plena carga 1400mL) y 10% de provisiones y consumos)				
	Nombre del concepto	(%)de carga	Masa total (Tn)	Masa total al (%)
Carga	Trailers		2802,00	
Fuel oil (HFO)	FO1 Mamparo de proa CCMM (Tanque Almacén Fuel Oil)	0%	324,90	0
	FO1_DFB	0%	96,80	0
	FO1_DFC	0%	101,89	0
	FO1_DFE	0%	101,90	0
	FO2_DFB	0%	113,16	0
	FO2_DFC	0%	131,14	0
	FO2_DFE	0%	113,16	0
	TSD_FOB=TSD1	98%	32,70	32,049
	TSD_FOB=TSD2	98%	32,70	32,049
	Tsed (Tanque sedimentación)	75%	72,06	54,048
Rebosos de combustible, V005	98%	9,61	9,422	
Diesel oil	TA_DO (tanque almacén Diesel Oil)	0%	132,82	0
	TSD_DOB (tanque servicio diario Diesel Oil)	98%	3,45	3,387
	TSD_DOE (tanque servicio diario Diesel Oil)	98%	3,45	3,387
Aceite	ACEITE MOTOR, L03P	98%	8,40	8,238
	ACEITE MOTOR, L03S	98%	9,05	8,870
	ALMACENAMIENTO ACEITE SUCIO, L001	98%	6,92	6,783
	ALMACENAMIENTO ACEITE LIMPIO, L002	98%	6,92	6,783
	REBOSES ACEITE, V007	98%	9,36	9,179
Lastre		98%	6654,8	6521,70
Otros	AGUA CILINDROS	98%	5,04	4,939
	AGUAS ACEITOSAS	98%	13,59	13,324
	Tanque lodos babor, V003	98%	1,17	1,151
	Tanque lodos estribor, V004	98%	1,17	1,151
	T_AD (tanque agua dulce)	10%	106,16	10,616
	Víveres 4Kg/persona día	10%	2,0	0
	Cargos y pertrechos	1	2,0	2
	Tanque Antiescora B	0%	91,12	0
Tanque Antiescora E	0%	91,19	0	



	Masa total (Tn)	Masa total al (%)(Tn)
Total (carga + combustible + lastre + otros)	8.274,48	6.895
Peso en rosca	7.417	7.417
TOTAL	15.691,48	14.312

Las características hidrostáticas de dicha condición de carga son las de la Tabla 13.

Tabla 13 Características hidrostáticas condición de carga 2 Fuente: Elaboración propia

Características hidrostáticas condición de carga 2	
Calado medio del buque m	5,833
Desplazamiento Tn	14312
Escora deg	0,0
Calado en FP m	5,690
Calado en AP m	5,977
Calado en LCF m	5,846
Trimado (+ve por popa) m	0,287
WL Longitud m	178,721
Manga máxima en WL m)	22,907
Área mojada m ²	4.568,832
Waterpl. Superficie m ²	3.361,638
Coeficiente prismático. (C _p)	0,630
Coeficiente de bloque. (C _b)	0,571
Coeficiente de área de selección máx. (C _m)	0,978
Coeficiente de la superficie de agua. (C _{wp})	0,821
LCB desde cero pt (+ve fwd) m	84,109
LCF desde cero pt (+ve fwd) m	77,545
KB m	3,348
KG fluido m	10,682
BMt m	9,250
BML m	462,118
GMt corregido m	1,917
GML m	454,784
KMt m	12,598
KML m	465,466
Inmersión (TPc) tonelada/cm	34,457
MTc tonelada.m	382,391
RM a 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonelada.m	478,729
Grado máximo de inclinación de la cubierta	0,0965

CAPÍTULO 5

RUTA DE NAVEGACIÓN DEL BUQUE EN ESTUDIO



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



5. Ruta de navegación del buque en estudio

El mar Mediterráneo se ha convertido a lo largo de los años en una de las zonas más importantes del mundo para la industria marítima, una ruta clave en el comercio mundial dada su posición estratégica entre el canal de Suez, Gibraltar y el Bósforo y una de las zonas del mundo de mayor tráfico marítimo. Además, es una zona de carga y descarga de mercancías, un área de transbordo y de tránsito y una zona de intercambios entre los países ribereños y, ante el nuevo orden económico mundial, entre Europa y Asia.

Es por su masificación en cuanto al tráfico marítimo que el Mar Mediterráneo se sitúa como uno de los principales mares para ser reconocido por la Organización Marítima Internacional como zona SECA. Esto se produce debido a que la contaminación ambiental producida por los buques es una seria amenaza para la salud humana, el medio ambiente y el clima mundial.

Las graves consecuencias producidas por la emisión de gases contaminantes que se enfrenta el Mar Mediterráneo son:

- Los serios problemas de suministro que podría acarrear.
- Muchos países implicados, los cuales muchos no pertenecen a la Unión Europea y por tanto no han ratificado el ANEXO VI del código MARPOL, por lo tanto, su política de emisiones es menos restrictivas y en muchos países inexistente. Exigirles unas normas de emisiones más restrictivas de las que poseen podría quitarles el único atractivo de sus puertos, la falta de normativa. Problema que en muchos países podría ocasionar una dificultad en la economía.
- Además, debido a la crisis que ha castigado a muchos países tanto dentro como fuera de la Unión Europea hace que un incremento del coste en el transporte marítimo el cual incrementaría el precio de los fletes tendría un impacto muy significativo en los países afectados que debilitaría aún más la situación.

Lejano a tener solo un interés medioambiental, hay intereses económicos y políticos que muchas veces tienen una mayor ponderación ante la toma de decisiones.



5.1. Tráfico marítimo en el Mar Mediterráneo

Un total de 658 barcos componen la flota desarrollada en el Mar Mediterráneo realizando rutas de corta distancia, que hacen escala es los puertos más importantes del Mediterráneo, la mayoría de los buques son portacontenedores seguidos de buques Ro-Pax y Ro-Ro con un total de 76 buques que aportan al Mediterráneo occidental unas emisiones que se cifran en la Tabla 14.

Tabla 14 Emisiones de los buques Ro-Ro en general en el mar Mediterráneo Fuente: Costa Project- ValenciaPort

Tipo de tráfico	Total CO ₂ (Tn)	Total NO _x (Tn)	Total SO _x (Tn)	Total PM _x (Tn)
Ro-Ro	1.017.253	18.200	17.550	2.177

Estos datos sumados al resto de tráfico que abarca el mar Mediterráneo son los que llevan a que la alarma sea real y los organismos responsables tomen las medidas oportunas para disminuir estas emisiones de forma exponencial

Las consecuencias que se podrían desencadenar ante esta designación de zona de ECA o SECA en el mar Mediterráneo, se llevará a cabo el estudio en un buque Ro-Ro y no solo se evaluará las emisiones contaminantes que emite debido a la operación normal del buque, sino además las posibles soluciones de las que se dispone para solventar el problema, así como sus consecuencias a niveles medioambientales y de operación del buque.



5.2. Ruta marítima del buque en estudio

Partiendo del buque elegido, y realizado un exhaustivo estudio de las principales rutas de *Short Sea Shipping* del mar Mediterráneo occidental de los buques RO-RO, la ruta a estudiar engloba gran parte de las aguas del mar Mediterráneo occidental. Una de las principales rutas es la de Barcelona-Génova-Livorno, la ruta pasa a través de las aguas de Córcega (Francia) y Cerdeña (Italia), por el estrecho de Bonifacio (véase la Figura 17).



Figura 17 Ruta Barcelona- Génova- Livorno Fuente: Costa Project- ValenciaPort

El buque realiza una ruta por el mar Mediterráneo occidental, llevando a cabo un trayecto de corta distancia de línea regular desde el puerto de Barcelona hasta Livorno y Génova. Dicha ruta sigue lo que se denomina autopista del mar (MOS), los criterios que lo convierte en una autopista son:

- Mínima frecuencia: 1 salida por semana
- Máximo número de puestos donde escala: 3

Según la definición proporcionada por el puerto de Valencia, las Autopistas del Mar son un «conjunto de puertos y servicios intermodales de transporte marítimo de corta distancia, en una determinada área geográfica de la Unión Europea, integrado en las Redes Trans-Europeas del Transporte, que sirve de elemento de interconexión entre las regiones europeas, con determinados estándares de calidad, operatividad y eficiencia que permitan una alternativa de transporte que colabore a la descongestión de las redes viarias de transporte terrestre, a la conservación del medio ambiente; y que responda al objetivo general de lograr un crecimiento sostenible del transporte en la Unión Europea».

Las autopistas del mar es una acción llevada por la Unión Europea complementaria al transporte marítimo de corta distancia, con estas autopistas se pretende dotar al mar de una vía permanente o una autopista virtual con unos puertos determinados. Estos puertos, una vez determinados, no deberán ser cambiados al menos en un plazo corto de tiempo (si esto fuese posible, se generaría una confusión en los usuarios de la «vía» de transporte que haría inviable su utilización sistemática, haciendo que no se cumplan los objetivos de la nueva política de transportes de la UE). (Puerto de Valencia, 2017)



Al no ser una autopista física, sino virtual, es necesario dotarla de un horario claramente definido en el que los usuarios puedan utilizarla, por tanto, es imprescindible determinar la frecuencia de entrada y salida en cada uno de los puertos que formen parte de la red y los horarios pertinentes (Menendez, 2016). Se trata, en definitiva, de un sistema complejo y fundamental para alcanzar los objetivos de la política europea de transportes, cuyo éxito futuro está intrínsecamente ligado al adecuado diseño y gestión de las Autopistas del Mar.

Las Autopistas del Mar deben ofrecer un transporte puerta a puerta, cuyo coste y nivel de calidad le permitan alcanzar un estándar de competitividad en el servicio que pueda ser equiparable al ofrecido por el transporte terrestre.

Hay 3 líneas de tráfico regular, que realizan TMCD en el mar Mediterráneo occidental, donde uno de sus puertos base esté situado en España; estas realizan los siguientes itinerarios, tal y como se contempla las rutas de TMCD donde operan los buques Ro-Ro tienen sus puertos en la península Ibérica y la península itálica, es aquí donde el transporte intermodal, que combina el transporte por carretera y el transporte marítimo cobra gran importancia, ya que por mar se reducen los kilómetros que se deberían recorrer usando el transporte terrestre. Cuanto más al sur esté el destino final de ambas penínsulas, mayor diferencia de distancias tendrá el transporte por carretera comparado con el transporte marítimo, favoreciendo este último.

Las rutas de TMCD son:

- Valencia (España) – Barcelona (España) – Livorno (Italia) – Savona (Italia).
- Valencia (España) – Cagliari (Italia) – Salerno (Italia).
- Barcelona (España) – Livorno (Italia) – Génova (Italia).
- Barcelona (España) – Civitavecchia (Italia).

La ruta número 3 es la que se va a analizar para el cálculo de resistencia añadida. Los puertos donde hace escala el buque en estudio se encuentran entre los 10 puertos que más importantes de tráfico de corta distancia en el Mediterráneo Occidental tal y como se observa en la Figura 18.

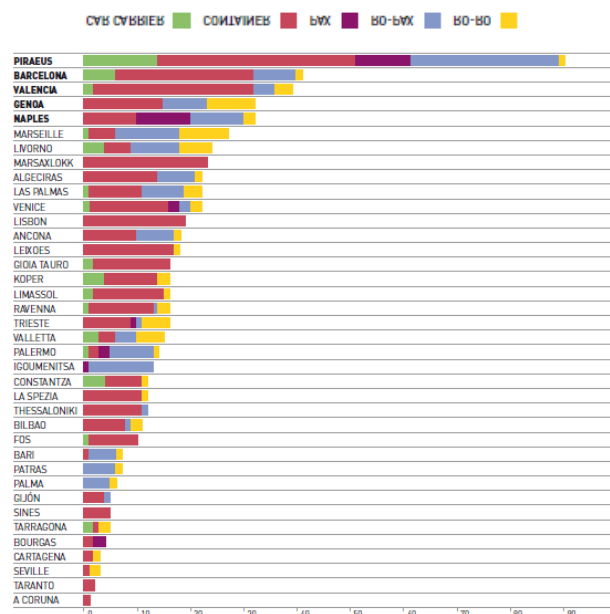


Figura 18 Principales puertos base del TMCD Fuente: Costa Project- ValenciaPort



La operación del buque se caracteriza por las siguientes peculiaridades (véase la Tabla 15)

Tabla 15 Operación del buque Fuente: Elaboración propia

Salidas semanales	2 salidas semanales
Horas de navegación semanales	112 horas (4 días navegando)
Estadía en puerto	3 días
Distancia recorrida MN	362 mn desde Barcelona a Génova 83mn desde Génova a Livorno

5.2.1. Puertos donde hace escala el buque



Figura 19 Puertos base del buque Ro-Ro Fuente: Elaboración propia

A continuación, se hace un breve de resumen de cada uno de los puertos donde opera el buque en estudio.

5.2.1.1. Puerto de Barcelona



Figura 20 Situación del puerto de Barcelona Fuente: Costa Project-ValenciaPort



El puerto de Barcelona es uno de los principales puertos del mundo como importador y exportador de mercancía, cuenta con 112 líneas marítimas, operadas por 163 armadores que regularmente lo conectan con 850 puertos de los cinco continentes, con una regularidad semanal en muchos casos, lo sitúan con diferencia como el primer puerto español para tráficos internacionales (Puerto de Barcelona, 2017). Actualmente cuenta con 40 terminales especializadas y multipropósito para atender todos los diferentes tipos de tráfico. Este puerto es el puerto peninsular más destacado con 5,4 millones de toneladas por semestre en el tráfico Ro-Ro, lo que ha contribuido favorablemente a que se superen los 28,3 millones de toneladas de vehículos industriales transportados.

Tabla 16 Estadísticas del puerto de Barcelona Fuente: Autoridad portuaria del puerto de Barcelona

Totales de tráfico	Acumulado diciembre 2017			% 17-16 acum. noviembre	% 17-16 acum. octubre	Total tráfico 2016
	2016	2017	%			
Toneladas (t)	47.578.707	60.070.134	26,3%	26,4%	24,3%	47.578.707
Avituallamiento	1.136.726	1.293.845	13,8%	11,1%	4,6%	1.136.726
Pesca	3.314	2.961	-10,6%	-10,7%	-11,1%	3.314
TRÁFICO TOTAL (t)	48.718.747	61.366.941	26,0%	26,0%	23,8%	48.718.747
TEU	2.243.584	2.968.757	32,3%	33,7%	31,1%	2.243.584
Pasajeros (u)	3.957.729	4.136.999	4,5%	3,7%	1,8%	3.957.729
Automóviles (u)	917.202	837.273	-8,7%	-9,1%	-9,7%	917.202
Buques (u)	8.728	8.976	2,8%	3,3%	2,8%	8.728
UTI	371.905	394.917	6,2%	6,4%	6,2%	371.905

Los datos estadísticos del puerto reflejan unos resultados de tráfico durante el 2017 que superaron los 60 millones de toneladas, teniendo una cuota de 9000 buques.

El puerto de Barcelona está creciendo rápidamente en el área del TMCD, que ofrece a menudo un servicio mixto de transporte de pasaje y vehículos, dirigido especialmente a la carga. El puerto de Barcelona ha apostado decididamente por el TMCD como modelo de transporte sostenible; que contiene sustanciales mejoras en las operativas de las empresas logísticas; es económicamente más competitivo que el transporte por carretera, especialmente por el creciente precio del carburante; y representa una sustancial mejora medioambiental por el colapso de las grandes redes viarias europeas, con los problemas de tránsito y contaminación que comporta el uso exclusivo del camión.

En cuanto al tráfico de vehículos el puerto de Barcelona es líder en el Mediterráneo cuenta con dos terminales especializadas en este tipo de carga la Autoterminal y Setram, contando con espacios verticales con capacidad para 24000 plazas y 5 vías ferroviarias de carga. Además, el puerto tiene una infraestructura formada por 5 rampas Ro-Ro con 1200 metros lineales de atraque.

Una de los principales operadores de terminales es la de SETRAM opera la terminal de Automóviles en el Puerto de Barcelona en régimen de concesión, posee una superficie de 250.000 m², de los cuales 150,000 m² están cubiertos, lo que supone una capacidad para almacenar hasta 13.300 vehículos. Tiene 1.210 m de línea de atraque y cuatro rampas Ro-Ro que permiten la carga /descarga de vehículos de un máximo de 6 buques a la vez.



Además, dispone de cuatro terminales ferroviarias para operar ocho trenes simultáneamente.

Es así como consigue que el puerto y el transporte por carretera esté unido, integrándolos para convertirlos en un único medio de transporte. La distribución de la terminal se muestra en la Figura 21.



Figura 21 Estructura del operados portuario SETRAM - Fuente: SETRAM

Gracias a estas infraestructuras, en el puerto de Barcelona en el año 2017 se recogieron los siguientes datos referente al transporte de automóviles y unidades de transporte individuales (UTI), lo que demuestra que ha disminuido el mismo en referencia al año anterior, diversos estudios indican que se ha encontrado en el transporte por carretera un método complementario al mismo tiempo que ha disminuido debido a la ligera caída de construcción de automóviles.

Tabla 17 Estadísticas del puerto de Barcelona tráfico mensual de automóviles Fuente: Autoridad portuaria del puerto de Barcelona

Tráfico mensual de automóviles (u)	Mensual		Acumulado		%	
	2016	2017	2016	2017	mensual	acumulado
Enero	54.598	54.452	54.598	54.452	-0,3%	-0,3%
Febrero	63.409	59.123	118.007	113.575	-6,8%	-3,8%
Marzo	90.362	90.893	208.369	204.468	0,6%	-1,9%
Abril	87.750	74.714	296.119	279.182	-14,9%	-5,7%
Mayo	87.722	84.282	383.841	363.464	-3,9%	-5,3%
Junio	93.972	72.750	477.813	436.214	-22,6%	-8,7%
Julio	83.310	75.347	561.123	511.561	-9,6%	-8,8%
Agosto	46.588	43.219	607.711	554.780	-7,2%	-8,7%
Septiembre	69.681	63.179	677.392	617.959	-9,3%	-8,8%
Octubre	85.911	71.563	763.303	689.522	-16,7%	-9,7%
Noviembre	82.201	79.029	845.504	768.551	-3,9%	-9,1%
Diciembre	71.698	68.722	917.202	837.273	-4,2%	-8,7%



También ha aumentado el transporte de las unidades de transporte unitarias por medio de unidades tractoras, las cuales se han visto beneficiadas por el transporte marítimo de corta distancia, tanto llenos como vacíos.

Tabla 18 Estadísticas del puerto de Barcelona de la carga general del TMCD Fuente: Autoridad portuaria del puerto de Barcelona

Carga general TMCD. Unidades	Insular Nacional			Resto TMCD			TOTAL		
	2016	2017	%	2016	2017	%	2016	2017	%
C.contenerizada. TEU	138.302	151.881	9,8%	755.028	836.923	10,8%	893.330	988.804	10,7%
O/D	135.664	147.292	8,6%	542.380	458.884	-15,4%	678.043	606.176	-10,6%
Llenos	83.901	87.597	4,4%	236.277	245.725	4,0%	320.178	333.322	4,1%
Vacíos	51.763	59.696	15,3%	306.103	213.159	-30,4%	357.866	272.854	-23,8%
Tránsito	2.639	4.589	73,9%	212.648	378.039	77,8%	215.287	382.628	77,7%
Llenos	2.081	3.364	61,7%	173.567	291.473	67,9%	175.648	294.837	67,9%
Vacíos	558	1.225	119,7%	39.081	86.566	121,5%	39.639	87.791	121,5%
Ro-Ro. UTI	235.387	248.879	5,7%	135.191	144.723	7,1%	370.577	393.601	6,2%
Llenos	154.811	161.979	4,6%	127.926	136.158	6,4%	282.736	298.136	5,4%
Vacíos	80.576	86.900	7,8%	7.265	8.565	17,9%	87.841	95.465	8,7%
Automóviles. Unidades	135.779	135.147	-0,5%	569.948	505.281	-11,3%	705.727	640.428	-9,3%
O/D	134.701	134.152	-0,4%	490.651	443.515	-9,6%	625.352	577.667	-7,6%
Tránsito	1.078	995	-7,7%	79.297	61.766	-22,1%	80.375	62.761	-21,9%

5.2.1.2. Puerto de Livorno



Figura 22 Situación del puerto de Livorno Fuente: Costa Project- ValenciaPort

El Puerto de Livorno es uno de los puertos marítimos más grandes de Italia y uno de los más grandes del Mediterráneo, con una capacidad de tráfico anual de 30 millones de toneladas de carga y 600.000 TEU's. El Puerto de Livorno es considerado un importante puerto italiano a lo largo del Corredor Marítimo Tirreno, capaz de manejar todo tipo de buques (Lo-Lo, Ro-Ro, gráneles líquidos, gráneles secos, cruceros, transbordadores).

En cuanto a la terminal de automóviles del puerto de Livorno esta cuenta con una terminal Ro-Ro con una longitud total de 1.741 m, una superficie de 477.060 m², una capacidad de almacenamiento de 6.000 coches y una capacidad de transbordo de 1.200.000 unidades al año. (Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale, 2017).

En el puerto de Livorno, el tráfico de mercancías con el Mediterráneo es principalmente de mercancías sobre ruedas. Este puerto toscano es líder en Italia en el segmento de Ro-Ro, que representa el 50 por ciento de su tonelaje (datos de 2017). El sistema de la Autoridad Portuaria del Mar Tirreno Septentrional, que agrupa a Livorno y Piombino, ha experimentado un aumento de los volúmenes de Ro-Ro en comparación con 2016,



pasando de 19,0 a 20,4 millones de toneladas (+7,4%) o, en términos de número de vehículos, de 626.000 a 680.000 (+8,6%).

La disponibilidad de espacio en el área del puerto y la ausencia de montañas que actúan como barreras detrás de él, son ventajas únicas en Livorno, en comparación con los puertos cercanos. Los volúmenes de carga rodada registrados, especialmente en el puerto de Livorno, apuntan a una tendencia que en los últimos años ha mostrado un desempeño significativamente mejor que el de otras categorías de carga, como lo confirman los datos de 2017.

En la actualidad, Livorno tiene enlaces de tráfico Ro-Ro con Cerdeña, Sicilia, Córcega, Túnez, España y con las islas del archipiélago toscano. Livorno está en condiciones de conectar diez puertos diferentes a través de cuatro compañías navieras diferentes que manejan cargas sobre ruedas a través de seis rutas diferentes dentro de Italia y cuatro rutas internacionales. De ellas, más del 50% se dedican exclusivamente al transporte de mercancías, utilizando buques de transbordo rodado, mientras que el resto de las líneas se dedican al transporte mixto de mercancías y pasajeros (servicios Ro-Pax). Además, cuenta con el llamado programa de incentivos Marebonus, para estimular conjuntamente el transporte marítimo y el transporte por carretera.

El puerto de Livorno tiene un gran potencial. En Italia ostenta el récord de tráfico de Ro-Ro, con un 13% del total del país, y 390.000 vehículos comerciales transportados en 2016. Estos potenciales deben desarrollarse de manera intermodal.

5.2.1.3. Puerto de Génova



Figura 23 Situación del puerto de Génova Fuente: Costa Project- ValenciaPort

El puerto de Génova es la puerta de entrada para el noroeste de Italia de los transportes, la logística y en especial las actividades de naturaleza portuaria son un importante motor para la economía y el empleo en Génova. La importancia económica del puerto de Génova supera las fronteras de la región: es una puerta natural para el comercio intercontinental del noroeste italiano.

La Terminal Portuaria de Génova, con una superficie total de 150.000 metros cuadrados, maneja anualmente unos 320.000 TEUs y 650,00 mtl de material rodante desde y hacia Túnez, Canadá, África del Norte, África Occidental, Israel, el Caribe, América del Sur, Estados Unidos y Turquía. Las inversiones realizadas en los últimos años han mejorado aún más el servicio ofrecido por la terminal a los clientes, por lo que actualmente la Terminal Portuaria de Génova es capaz de ofrecer una gama completa de servicios de



manipulación, almacenamiento, llenado y vaciado de contenedores, pesaje y amarre de cargas especiales y de reservar cada vez más atención y eficiencia en los servicios intermodales. (Ports of Genoa, 2016)

Los últimos logros importantes para la Terminal Portuaria de Génova son la finalización de las obras de dragado que hoy permiten un calado de 14 m de largo.

El índice de actividad aplicado a la terminal multipropósito, logró más de medio millón de TEUs equivalentes al añadir 362.000 TEUs de contenedores a 156.000 metros lineales de cargas rodantes, para un total de 518.000 TEUs equivalentes en 2017

CAPÍTULO 6

HIDRODINÁMICA



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



6. Hidrodinámica

6.1. Resistencia total del buque en aguas tranquilas

Determinar la potencia de la maquina propulsora de un buque para que navegue a una velocidad concreta es uno de los principales problemas que se presentan a la hora de proyectar un buque. Para poder hacer frente a esto se debe calcular las resistencias a las que tiene que hacer frente el buque para navegar a dicha velocidad.

Al moverse un buque en el agua aparece una fuerza que se opone al movimiento, es decir, una resistencia al avance. Para vencer esta resistencia es preciso encontrar algún tipo de mecanismo que ejerza una fuerza en sentido opuesto. A esta fuerza propulsora se le denomina empuje y se le denota con T.

Cuando la hélice se encuentra alojada en su posición, tras el casco, las condiciones se modifican considerablemente: el propulsor trabaja ahora en aguas perturbadas por efecto del paso del casco y, en general, el agua que circunda a la popa ha adquirido un movimiento hacia adelante, en la misma dirección de avance del buque. Esta agua en movimiento hacia adelante recibe el nombre de estela, y uno de los efectos que esta situación introduce consiste en que el propulsor no avanza ya respecto al agua a la misma velocidad V del buque, sino a una velocidad algo menor, V_A , llamada velocidad de avance.

Resulta preciso conocer las condiciones hidrodinámicas como condición indispensable en el proyecto de un buque. La teoría de la hidrodinámica clásica denomina a la resistencia al avance de un buque a una determinada velocidad, a la resistencia al avance de la carena desnuda del mismo, ésta puede descomponerse de diversas formas:

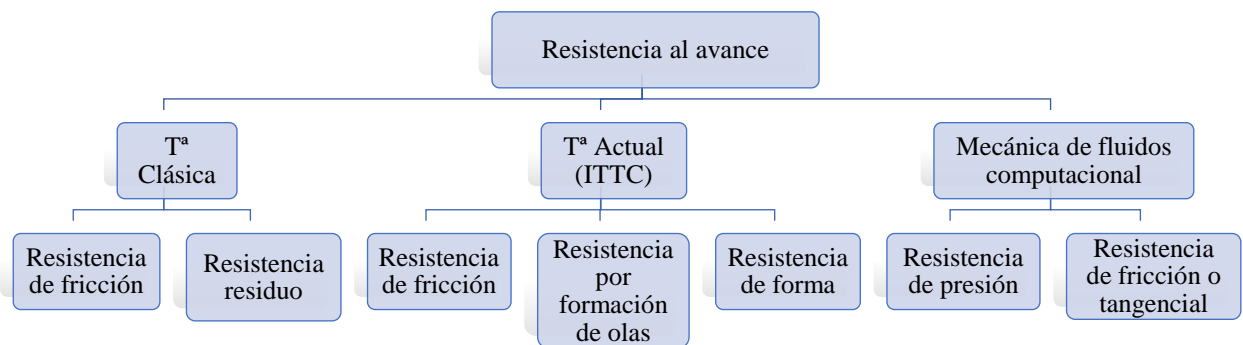


Ilustración 1 División en las distintas componentes de la resistencia al avance Fuente: Elaboración propia

Teoría Clásica (W. Froude). La teoría clásica o de Willian Froude descompone la resistencia al avance en resistencia de fricción(C_f), la cual es igual a la resistencia de una placa plana equivalente de la misma longitud y superficie mojada que el buque y en resistencia residuo ($C_{residuo}$)que es igual a la diferencia entre la resistencia total y la resistencia de fricción.

$$C_T = C_f + C_{residuo} \quad (1)$$

$$R_{buque} = \frac{1}{2} C_T \rho S_m V^2 \quad (2)$$



Teoría Actual (ITTC). Al igual que en la teoría Clásica, la teoría Actual (ITTC) descompone la resistencia al avance en resistencia de fricción a la que denomina como resistencia debida al movimiento del casco en un fluido viscoso (C_v) y que hace que las partículas de agua sean aceleradas tangenciales a la superficie del cuerpo. No obstante, la Teoría Actual (ITTC) en diferencia a la anterior además descompone la resistencia al avance en resistencia por formación de olas (C_w) la cual es debida a la energía que ha de ser suministrada por el sistema de olas creado en la superficie del agua y finalmente por la resistencia de forma (C_{forma}) que a su vez está compuesta por

- a) La resistencia originada por no ser el buque una placa plana, sino que tiene curvatura transversal ($C_{cur.trans}$) y longitudinal ($C_{cur.long}$). Corresponde a la energía gastada en acelerar lateralmente las partículas de agua.
- b) La resistencia de presión de origen viscoso (C_{RPOV}) debida a la alteración del campo de presiones producido por la capa límite, y al desprendimiento de ésta, caso de presentarse este fenómeno.

La resistencia de forma es muy pequeña de forma general, por lo tanto, se agrupa con la resistencia por formación de olas para formar la resistencia residuo. Esta resistencia de forma sumada a la resistencia de fricción forma la resistencia viscosa, ésta está asociada a la pérdida de energía debida a la viscosidad del fluido en el que se desplaza el buque.

$$C_T = C_v + C_w + C_{forma} = C_f + C_{cur.trans} + C_{cur.long} + C_{RPOV} + C_w \quad (3)$$

$$R_{buque} = \frac{1}{2} C_T \rho S_m V^2 \quad (4)$$

Mecánica de fluidos computacional. Si la carena del buque se divide de manera espacial en elementos de superficie, sobre cada uno de ellos la fuerza de resistencia al avance se descompone en resistencias al avance elementales. Cada una de ellas puede dividirse en una componente normal (perpendicular) al elemento de superficie y en otra perpendicular a la anterior, por tanto, paralela a dicho elemento de superficie, llamada componente tangencial.

Integrando por separado cada grupo de componentes se tiene la resistencia de presión es considerada como la suma de la resistencia por formación de olas y la de presión de origen viscoso. La resistencia tangencial es considerada como la suma de la resistencia de fricción de placa plana más las resistencias por curvatura transversal y longitudinal. paralela a dicho elemento de superficie, llamada componente tangencial. Integrando por separado cada grupo de componentes se tiene:

- Resistencia de presión (C_p), la que se obtiene por la integración de las componentes normales.
- Resistencia de fricción o tangencial ($C_{tangencial}$), la que se obtiene por la integración de las componentes tangenciales. Esta componente no coincide con la del mismo nombre reseñada anteriormente, pues aquí se tiene en cuenta el efecto de la curvatura del casco.



La resistencia de presión es considerada como la suma de la resistencia por formación de olas (C_w) y la de presión de origen viscoso (C_{RPOV}). La resistencia tangencial es considerada como la suma de la resistencia de fricción de placa (C_f) más las resistencias por curvatura transversal ($C_{cur.trans}$) y longitudinal ($C_{cur.long}$). (Alonso Pardo, 2017)

$$C_T = C_p + C_{tangencial} = C_w + C_{RPOV} + C_f + C_{cur.trans} + C_{cur.long} \quad (5)$$

$$R_{buque} = \frac{1}{2} C_T \rho S_m V^2 \quad (6)$$

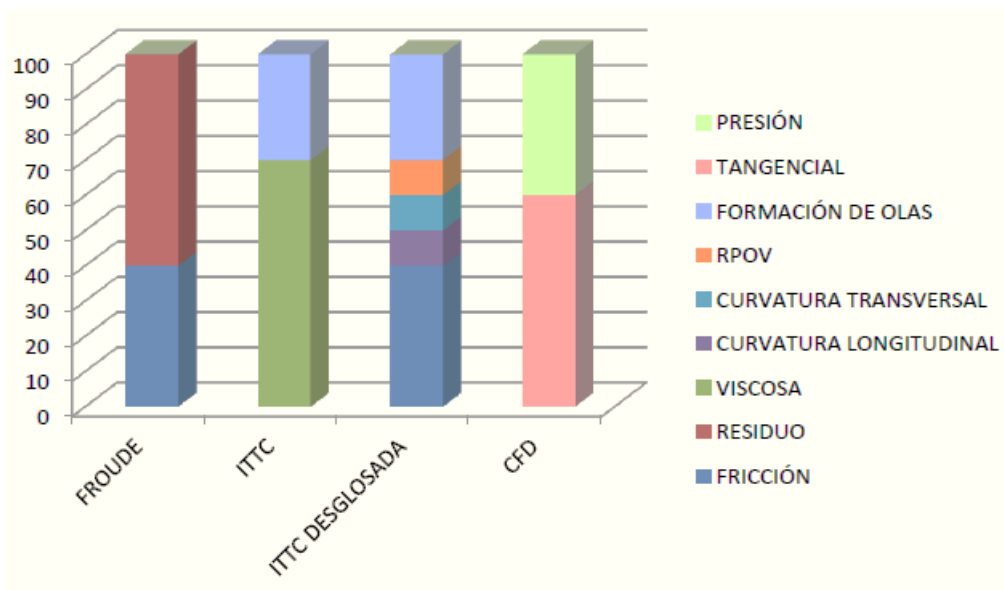


Ilustración 2 Desglose de la resistencia total del buque Fuente: (Alonso Pardo, 2017)

Por lo general la resistencia al avance de un buque se suele dividir en las siguientes componentes:

Resistencia viscosa. La resistencia viscosa es la componente de la resistencia asociada a la pérdida de energía debida a la viscosidad del fluido en que se desplaza el buque. Se descompone en:

- Resistencia de fricción de placa plana. La energía empleada en acelerar las partículas de agua tangencialmente a la superficie de un cuerpo avanzando en un flujo, da lugar a una resistencia llamada resistencia de fricción. El cálculo de la resistencia de fricción de un buque se hace siempre a partir de la resistencia de una placa plana equivalente: la de igual longitud y superficie mojada que el buque. La determinación de la resistencia de fricción de una placa plana se ha llevado a cabo según diversos métodos que pueden clasificarse en dos grandes grupos, experimentales y teórico-experimentales.
- Resistencia de fricción de superficie curva. Es evidente que el buque no es una placa plana. El cociente entre la resistencia viscosa y la de fricción es el factor de formas, y representa la influencia que tienen dichas formas en la componente de la resistencia que depende de la viscosidad. Dicha influencia se manifiesta en la velocidad del flujo. A lo largo de una placa plana la dirección de la velocidad puede



considerarse constante, pero esto no ocurre a lo largo de la superficie mojada del buque por existir las curvaturas longitudinal y transversal. El aumento de resistencia viscosa debido a este efecto es un porcentaje constante de la resistencia de una placa plana.

Resistencia por formación de olas. La resistencia por formación de olas es la componente de la resistencia asociada al consumo de energía empleado en generar las olas de gravedad. Su peso en la resistencia total crece exponencialmente con la velocidad, dado que la resistencia viscosa aumenta linealmente. En buques finos y rápidos la resistencia por formación de olas es, con mucho, la componente principal de la resistencia.

Es conveniente tener en cuenta que la resistencia por formación de olas se genera por el hecho físico de que, al moverse el buque por una superficie de discontinuidad entre dos medios, el aire y el agua, éste genera una presión que desplaza el agua generando olas, que consumen energía.

En general se admite que la resistencia por formación de olas se puede despreciar si la profundidad de inmersión a la que se desplaza el buque es mayor o igual que la mitad de la eslora.

Otras componentes de la resistencia.

- Rugosidad del casco. La rugosidad inherente al buque recién construido debida a la propia disposición estructural del buque, soldaduras, remaches, cuerpos asociados al casco, además de la rugosidad propia del material del casco y de la pintura de protección del material; además de la rugosidad adquirida debida a la corrosión del casco debido al acero, el deterioro de la pintura, deformaciones del acero y las incrustaciones biológicas del casco.
- Resistencia por agua poco profunda. Es debida a que el buque pasa a navegar en aguas de profundidad restringida y se observa un aumento de la resistencia al avance del mismo, junto con una disminución de la velocidad, debido al aumento de la componente viscosa de la resistencia al avance, debido a la modificación del flujo potencial del fluido que rodea al buque, ocasionado por la concentración de las líneas de corriente del agua que circula bajo la quilla y la modificación del sistema de olas.
- Resistencia por acción del viento. Debida a la acción del viento sobre la obra muerta del mismo.
- Resistencia por apéndices del buque. La incorporación de timón, arbotantes, henchimientos, eje de cola, quillas de balance, dispositivos de sonar situados fuera de la superficie del casco, etcétera, producen un incremento de la resistencia. Dado que el apéndice va normalmente sumergido, no crea ola perceptible, y su resistencia será únicamente de tipo viscoso.

Resistencia añadida. Esta resistencia puede deberse a distintos factores que se nombran a continuación,

- Una de las componentes de la resistencia de un buque en aguas tranquila es la debida al arrastre aerodinámico de la obra muerta del barco. Esta contribución del viento es bastante pequeña en comparación con otras componentes como es la que aporta la resistencia añadida en olas.
- La resistencia añadida en olas es el mayor contribuyente de la resistencia añadida en una ruta marítima.



- Otras de las componentes es la resistencia debido a la dirección, cuando un buque se encuentra navegando, su rumbo se ve perturbado por el viento y las olas. Con el fin de mantener un rumbo estable, es necesario accionar el timón. El ángulo del timón contrarresta el viento en cualquier momento. Esta operación del timón aumenta la resistencia de la nave.
- Alguna otra componente de la resistencia añadida es la debida a las incrustaciones, el *fouling* es un proceso biológico como el crecimiento de malezas y percebes. Este *fouling* del casco crea una "rugosidad" añadida y provoca un aumento de la resistencia del buque. El efecto general del *fouling* sobre la resistencia total es mayor en los buques que navegan a baja velocidad con un alto coeficiente de bloque debido al hecho de que la resistencia a la fricción es el mayor contribuyente a la resistencia total comparado con embarcaciones de alta velocidad en las que la resistencia a la formación de olas es superior a la parte de fricción.



6.2. Resistencia añadida en olas

Se puede definir la resistencia añadida en olas como la pérdida de energía inducida por las olas.

Cuando un buque avanza en un campo de olas se genera dos tipos de olas: las olas asociadas a la velocidad de avance en aguas tranquilas, y las olas asociadas a los movimientos causados por el mar. Ambos tipos de olas disipan energía. En otras palabras, para generar esas olas se requiere una cierta cantidad de energía.

Esta energía disipada de un barco en forma de olas, según las teorías clásicas del comportamiento en la mar, se debe a tres componentes diferentes. Todos ellos están relacionados con la energía suministrada por la nave al agua y generada por la planta de propulsión a bordo. Componentes de resistencia añadida en olas:

Resistencia añadida debido a los movimientos verticales: Esta componente se debe a la interferencia entre las olas resultante de los movimientos del buque (radiada en particular, la oscilación y el cabeceo y el sistema de olas incidentes. Esta componente es conocido como fuerza de deriva y es el mayor contribuyente a la resistencia añadida en un campo de ola larga.

Resistencia añadida debido a la Reflexión: Las olas incidentes también se reflejan en el casco del buque, y también interactúan con el buque irradiado. olas. Este componente también se conoce como efecto de difracción. En un campo de ola corta, este componente es el más significativo, sin embargo, es el menos contribuyente en otros escenarios.

Resistencia añadida debido a los efectos viscosos: El efecto "viscoso" debido a las fuerzas de amortiguación asociadas a la arfada y al cabeceo en aguas tranquilas.

Estos tres componentes están involucrados en la disipación de energía. Una gran parte de esta energía es transmitida debido a la irradiación del casco y una parte muy pequeña de la energía se pierde debido a la fricción viscosa. La energía que consume la fricción viscosa es muy pequeña y despreciable, ya que la amortiguación viscosa es insignificante en comparación con la amortiguación de los movimientos de arfada y cabeceo. (Arriba Pérez, 2007) Por lo tanto, la resistencia añadida en olas puede considerarse un fenómeno no viscoso, que se produce por los efectos potenciales (inercia y olas). Este concepto es muy importante en la práctica a la hora de pasar de los experimentos con modelos a los experimentos en escala real.

$$\frac{RAW_{buque}}{RAW_{modelo}} = \lambda^3 \quad (7)$$

siendo λ el factor de escala.

Aunque depende de la forma del casco, en general se considera que, entre los tres componentes de la resistencia añadida, la fuerza de deriva tiene la mayor contribución, seguida de las fuerzas de amortiguación y, por último, con una contribución muy baja el efecto de difracción que se convierte en el menos significativo de los tres (Arriba Pérez, 2007).

La Figura 24 muestra la magnitud relativa de los dos principales factores que contribuyen a la resistencia añadida: los movimientos del barco (efectos de radiación) y la reflexión de las ondas (efectos de difracción).

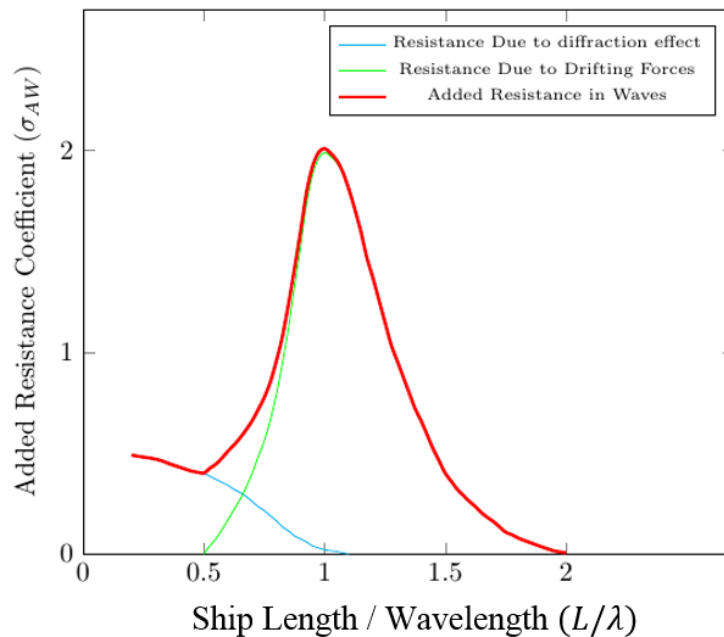


Figura 24 Coeficiente de resistencia añadida Fuente (Arriba Pérez,2007)

Es importante considerar el hecho de que los tres componentes anteriores son:

- Aditivo y superponibles.
- Proporcionales al cuadrado de la amplitud de onda y por lo tanto no lineal.

Sin embargo, es muy interesante para entender el fenómeno de la resistencia añadida poder separar los componentes anteriores, porque en realidad los tres componentes interactúan y están intrínsecamente relacionados. No es trivial desglosar las tres partes. Afortunadamente, en la práctica es posible determinar los componentes de fuerza individualmente mediante métodos analíticos o mediante técnicas experimentales especiales.

6.2.1. Resistencia añadida inducida por el movimiento

La resistencia añadida inducida por el movimiento se origina a partir de las olas radiadas ocasionado por los movimientos del buque. La radiación de la ola se hace mayor cuando la elevación relativa de la ola es mayor, en particular cuando la elevación relativa de la ola es mayor que la ola entrante.

Las mayores contribuciones a la elevación relativa de la ola son los movimientos de elevación, de cabeceo y su escalonamiento con la función entrando o encontrando olas.

El movimiento de balanceo del barco también contribuye a este componente, sin embargo, la influencia del balanceo es, comparada con el cabeceo y la arfada, muy pequeños, por lo tanto, serán despreciados.

Cuando la longitud de la ola está cerca de la longitud del barco la elevación relativa de la ola y la resistencia añadida son mayores. Esto hace que la relación entre la eslora del buque y la longitud de ola (L/λ) sea un parámetro tan importante en el fenómeno de la resistencia añadida.



Cuando $L/\lambda < 1$ (olas largas en relación con la eslora del buque) el buque se mueve con las olas y la elevación de ola relativa tiende a cero, lo que hace que la radiación de ola y por lo tanto la resistencia añadida de cero también. La experiencia sugiere que en los casos en los que $L/\lambda < 0,5$ la resistencia añadida inducida por el movimiento es virtualmente cero. Además, la resistencia añadida inducida por el movimiento llega a cero en olas cortas (L/λ) donde no hay movimientos del barco y la elevación relativa de la ola está en el orden de la ola entrante (Molland, 2011).

6.2.2. Resistencia añadida inducida por la reflexión

En un escenario de olas cortas $L/\lambda > 1$, la resistencia añadida tiene su origen en la reflexión de las olas contra el casco. Cuando la longitud de ola (λ) es larga comparada con la longitud del barco (L), por lo tanto, un pequeño (L/λ), la reflexión de la ola tiende a cero. Se podría ver como las olas largas no están "influenciadas" por la presencia del buque

La reflexión de las olas empieza a contribuir desde (L/λ) una relación de alrededor de 1 y se considera una la reflexión completa contra el barco cuando esta relación se hace más grande.

6.2.2.1. Difracción de Olas

Cuando un componente de onda regular se encuentra con una pared vertical perpendicular a su dirección de propagación, por ejemplo, el costado de un gran barco, se refleja y se devuelve a su origen con una amplitud y una velocidad iguales (idealmente). La superficie del agua cerca del costado del barco parece moverse hacia arriba y hacia abajo con el doble de amplitud de la ola entrante, describiendo una ola estacionaria, una ola sin ninguna componente de velocidad aparente. Esta onda estacionaria o también conocida como onda estacionaria, puede formularse sumando dos ondas idénticas que se mueven en direcciones opuestas.

La onda estacionaria ζ es igual a, agregar dos ondas idénticas ζ_1 y ζ_2 , dado que los dos perfiles de olas (la forma de la superficie del agua) son iguales, pero se mueven en direcciones opuestas, tendrían la misma amplitud ζ_a .

Una onda que se mueve en la dirección positiva del eje longitudinal x (expresada en función de x y t):

$$\zeta_1 = \zeta_a \cos(kx - \omega t),$$

y una onda que se mueve en la dirección opuesta (dirección x negativa):

$$\zeta_2 = \zeta_a \cos(kx + \omega t).$$

Cuando,

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2. \tag{8}$$

quedando, por lo tanto;

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega t) + \zeta_a \cos(kx + \omega t), \tag{9}$$



donde:

$$\cos(kx - \omega t) = \cos(kx)\cos(\omega t) + \sin(kx)\sin(\omega t), \quad (10)$$

$$\cos(kx + \omega t) = \cos(kx)\cos(\omega t) - \sin(kx)\sin(\omega t). \quad (11)$$

donde:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx) (\cos(\omega t) + \sin(kx)\sin(\omega t)) + \zeta_a (\cos(kx + \omega t)), \quad (12)$$

y la suma de las dos es,

$$\zeta = 2\zeta_a \cos(kx) \cos(\omega t). \quad (13)$$

En el caso de que la ola se acerque a la pared bajo un cierto ángulo, la aproximación anterior sigue siendo válida para su componente perpendicular a la pared. La ola se refleja lejos de la pared en un ángulo de la misma manera que la luz se refleja en un espejo plano.

Las olas y el flujo alrededor de la proa de un buque que corre en olas de longitud de onda corta darán lugar a fenómenos de rompimiento de olas considerables que muestran una fuerte no linealidad. Muchas de las investigaciones teóricas sobre la resistencia debida a la difracción en el casco no consideran el efecto no lineal de las olas lo suficiente para satisfacer las condiciones límite de la superficie del casco, por lo que los cálculos que utilizan tales teorías pueden no explicar correctamente los resultados experimentales.

6.2.3. Resistencia añadida con una longitud de onda intermedia

Los dos principales contribuyentes a la resistencia añadida de la onda, la reflexión inducida y la resistencia añadida inducida por el movimiento, aparecen combinados en una región de longitud de onda relativamente grande. Esta región que puede ir de 1 a 2 L/λ . La siguiente Figura 25 muestra los resultados de la prueba del modelo para un buque portacontenedores de tamaño mediano que navega en olas regulares de proa.

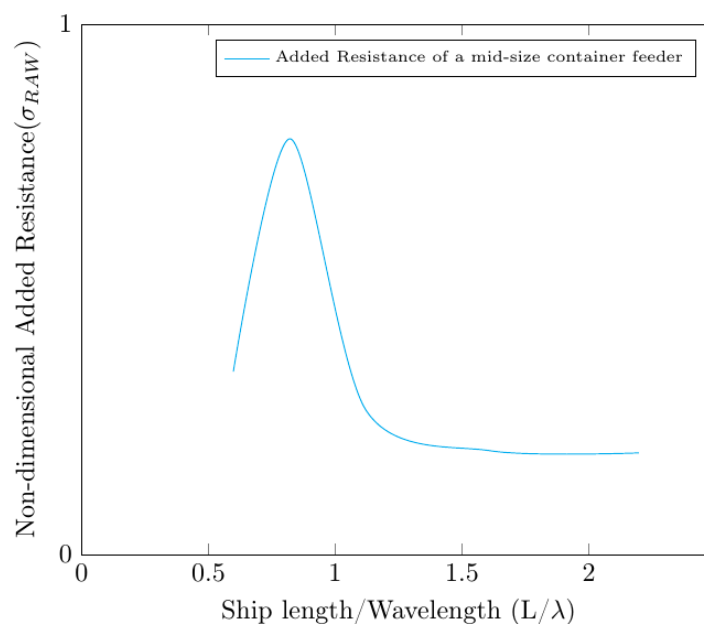


Figura 25 Resistencia añadida no dimensiona Fuente (Arriba Pérez,2007)



En las olas de longitud de onda corta, el movimiento del casco es pequeño, y la resistencia se debe principalmente a la difracción de las olas, y es ahora cuando la longitud de onda aumenta, cuando la resistencia añadida debido al movimiento del casco se vuelve dominante.

6.2.4. Movimiento, respuesta de primer orden

Uno de los componentes más dominantes que inducen una resistencia añadida son los movimientos verticales. Cuando el barco navega en condiciones difíciles, la experiencia del barco se mueve verticalmente. Para modelar los movimientos y fuerzas de un barco es común utilizar un sistema LTI (*Linear Time Invariant System*). Con el uso de un LTI se considera el barco como un sistema, donde la señal de entrada es una onda senoidal lineal que representa las ondas marinas entrantes. Por lo tanto, este sistema proporciona una respuesta (señal de salida) en forma de onda senoidal lineal que representa un movimiento o una fuerza. El sistema LTI puede responder con un retardo de fase en la señal de entrada y una carga lineal de la amplitud. Estas restricciones confieren una propiedad muy ventajosa al sistema LTI en la medida en que permite aplicar el principio de superposición.

6.2.4.1. Principio de superposición

Cuando una señal $x(t)$ puede expresarse como la adición de la subseñal $x_k(t)$, con analogía la respuesta a la señal $y(t)$ puede expresarse como la suma de la respuesta de las subseñales $y_k(t)$.

$$x(t) = \sum_k x_k(t) \rightarrow y(t) = \sum_k y_k(t) \quad (14)$$

Por esta razón, el movimiento y las fuerzas del barco en olas irregulares pueden expresarse como la suma de las respuestas en olas regulares, haciendo de la teoría lineal invariable en el tiempo una poderosa y útil para el análisis de la resistencia añadida. Sin embargo, en realidad los barcos no responden linealmente a las olas entrantes. Para modelar las respuestas como un sistema LTI, las respuestas deben ser linealizadas. Pero, debido a que la parte lineal domina la respuesta, los movimientos del barco se consideran un problema de primer orden.

La aplicación de la teoría lineal tiene la limitación de la inclinación de las olas, cuando la inclinación de las olas se vuelve demasiado grande, el efecto no lineal se vuelve importante y restringe su uso.

6.2.5. Resistencia añadida, un problema de segundo orden

La resistencia añadida es la fuerza de deriva media de segundo orden en la dirección opuesta al rumbo del buque. Debido a que el valor medio de tiempo de una onda sinusoidal arbitraria, amplitud A y período T_e es cero, el cálculo de la fuerza media usando una fuerza lineal resultará en un valor medio cero como sigue:

$$\frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} A \cos(\omega t + \epsilon) dt = 0. \quad (15)$$

En el caso de una onda sinusoidal de segundo orden, el resultado es un valor de tiempo medio distinto de cero:



$$\frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} = (A \cos(\omega t + \epsilon))^2 dt = \frac{A^2}{2}. \quad (16)$$

Por lo tanto, el término cuadrático en la respuesta tiene que ser incluido en el problema, aunque sea más pequeño comparado con el término lineal, para obtener un valor medio. La resistencia añadida en ondas regulares varía linealmente con la altura de onda cuadrada a una longitud de onda constante, como ya hemos mencionado. La resistencia añadida entonces, se considera un problema de segundo orden. Y esta característica de segundo orden es la que hace difícil obtener predicciones precisas de la resistencia añadida. Este es un tema que se enfrentará en esta tesis. Para dar una idea de las limitaciones de la predicción de la resistencia añadida, debemos tener en cuenta que si los movimientos del barco se predicen con una precisión de aproximadamente 10~15%, no se puede esperar que la resistencia añadida de segundo orden sea de una precisión superior al 20~30% (Faltisen, 1990).

La resistencia añadida es muy sensible a la predicción de movimiento. Por lo tanto, es más importante una predicción precisa de los movimientos verticales que el desarrollo de teorías de resistencia añadidas más sofisticadas (Arriba Pérez, 2007).

Aunque la resistencia añadida es un problema de segundo orden, el potencial de velocidad de onda lineal es el único que se requiere. Los potenciales de velocidad de orden superior no necesitan estudiar la resistencia añadida (Faltisen, 1990).

6.2.6. Resistencia añadida en olas regulares

En el escenario de ondas regulares, tanto la respuesta al movimiento como la resistencia añadida son un "acuerdo" teórico. Dado que el escenario de olas regulares no es realista porque sólo ocurre en instalaciones de tanques de remolque y en el modelado matemático. Sin embargo, con el principio de superposición, se puede considerar que las respuestas de un barco a ondas irregulares pueden ser consideradas como la suma de las respuestas a ondas regulares de todas las frecuencias. Y aquí está la importancia del análisis en olas regulares ya que, en primer lugar, es relativamente simple y preciso obtener la respuesta de movimiento del buque y, en segundo lugar, facilita el proceso para obtener las respuestas del buque en un estado irregular del mar.

6.2.7. Resistencia añadida en olas irregulares

La validez de la aplicación de la superposición a los movimientos del buque y a las cargas marítimas es generalmente aceptada. Entonces, asumiendo que el principio de superposición también es válido para las respuestas horizontales. El complejo problema de predecir los movimientos de los barcos y las cargas marítimas en una vía marítima natural puede reducirse a los dos problemas:

- La predicción de movimiento y cargas en ondas sinusoidales regulares.
- La predicción de la respuesta estadística en un mar irregular usando las olas regulares resulta.

Sin embargo, una de las principales dificultades en el análisis de navegabilidad ha sido la de hacer predicciones precisas de los movimientos y cargas marítimas de un buque en olas regulares. Si el diseñador conoce la descripción geométrica y la distribución del peso y tiene información adecuada sobre el medio marino, puede calcular los movimientos y las cargas dinámicas de un buque en una vía marítima con una precisión razonable.



Es posible expresar la resistencia añadida en ondas irregulares con la superposición de las respuestas de ondas regulares.

Aunque las respuestas del barco a las olas regulares no indican directamente el comportamiento en olas irregulares. Si se combina un tratamiento estadístico de las respuestas combinado con el espectro de las olas del mar, se obtienen resultados que son significativos para el movimiento del barco en el mar realista. Esta técnica de este proceso fue descrita por primera vez por St. Denis y Pierson (1953) y que fue aplicada a la prueba de modelos por E.V. Lewis (1955). Luego Korvin-Kroukovsky (1956-1957) presentó una explicación a esta técnica. En este proceso, el cuadrado de la amplitud del movimiento del buque por unidad de altura de onda, para una longitud de onda dada a una velocidad determinada (es decir, para una frecuencia de encuentro determinada), se multiplica por la ordenada del espectro marino (corregida a la velocidad del buque) a la misma frecuencia de encuentro. En otras palabras, para cualquier frecuencia de encuentro, la ordenada del espectro de respuesta se obtiene como el producto de la ordenada del mar de encuentro y el RAO (Response Amplitude Operator) para la misma frecuencia de encuentro. Entonces, la resistencia media añadida en una vía marítima irregular es:

$$RAW = 2 \int_0^{\infty} S_{\xi\xi}(\omega_e) \frac{R_{aw}(\omega_e)}{\zeta^2} d\omega_e. \quad (17)$$

donde, $S_{\xi\xi}(\omega_e)$ es el espectro de ola, $\frac{R_{aw}(\omega_e)}{\zeta^2}$ es la respuesta de la resistencia añadida y $d\omega_e$ es la banda de frecuencia de encuentro.

El espectro de olas se define en función de las condiciones del mar o se puede suponer para un viento determinado utilizando la formación estándar de la ITTC (International Towing Tank Conference), que es una función de la altura de ola del buque y del período modal del mar.

CAPÍTULO 7

CÁLCULO DE LA POTENCIA DEMANDA POR EL BUQUE



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



7. Procedimiento de cálculo para la obtención de la potencia real demandada del buque

7.1. Validación de la metodología

7.1.1. Antecedentes

Para la verificación y validación de los cálculos que se quieren llevar a cabo sobre el buque Ro-Ro, se ha reproducido una carena ya probada que demuestre que se puede calcular la resistencia añadida debido a las olas.

La carena a probar se basa en los cálculos de (García Espinosa & Servan Camas, 2018) sobre la aplicación del método de elementos finitos con una malla no estructurada para el cálculo de la resistencia añadida en olas en la carena Wigley. Dicho estudio se establece sobre un marco donde se toma la premisa que la resistencia añadida en olas y su impacto en la resistencia total del buque es elevado.

Hasta ahora las estimaciones sobre la resistencia añadida en olas se ha basado en añadirle un coeficiente de corrección a la resistencia total en aguas tranquilas, pero no se ha abordado el problema usando métodos computacionales. La principal motivación del estudio llevado a cabo se basó en el desarrollo de un modelo computacional en el dominio del tiempo capaz de resolver el problema de la resistencia añadida y la creación de olas de manera eficiente. El método propuesto por ambos autores se fundamenta en el flujo potencial aplicándole unas condiciones límite de superficie libre; al mismo tiempo que se usa el método de elementos finitos con una malla no estructurada en el contexto del flujo potencial. El esquema numérico propuesto es la derivada usando una formulación no lineal (NL) para los términos de convección de Neumann-Kelvin (NK) y de doble cuerpo (DB) también se han analizado las linealizaciones de flujo.

El primer esquema propuesto para integrar la superficie libre con las condiciones de contorno se basa en el cálculo de la convección como una derivada a lo largo de las líneas de flujo. Con este fin, un esquema de diferencia finita de tercer orden (FD) que utiliza tres puntos a barlovento y un punto a favor del viento. El segundo esquema propuesto se basa en el FEM con la racionalización de ceñida Petrov-Galerkin (SUPG) (Brooks y Hughes 1982).

De sus estudios concluyen que un modelo basado en el método de elementos finitos para calcular la resistencia a la formación de olas en aguas tranquilas y a la resistencia añadida por formación de olas.

El método propuesto resuelve las ecuaciones de gobierno en el dominio de tiempo, usando mallas no estructuradas, y sin restringir las condiciones lineales de contorno de la superficie libre. El modelo matemático basado en el potencial y el método de perturbación de Stokes, que lo hace computacionalmente atractivo en comparación con los solucionadores tradicionales.



7.1.2. Procedimiento de validación para la obtención de la resistencia añadida

Las validaciones de los cálculos de la resistencia añadida se basan en la reproducción del procedimiento explicado anteriormente para ello, se reproduce la carena con las mismas condiciones en las que fue validada y verificada el modelo. A continuación, se comparan los resultados obtenidos con los obtenidos por el estudio (García Espinosa & Servan Camas, 2018).

La carena a simular es la carena Wigley I con las siguientes características:

Tabla 19. Datos de la carena Wigley Fuente: Elaboración propia.

Coficiente a la maestra C_m	0,9090
Eslora - L (m)	1
Manga - B (m)	0,1
Puntal - D (m)	0,0625
Desplazamiento (m^3)	0,003504
KG (m)	0,0566
Radio de inercia R_{yy} (m)	0,25
Amortiguamiento de cabeceo (N/(m/s))	$0,02\sqrt{4 I_{yy} K_{55}}$

donde, I_{yy} es la inercia del buque y K_{55} es la rigidez en el cabeceo del buque.

Los datos introducidos para el cálculo de la resistencia añadida en olas a diferentes condiciones de mar fueron los siguientes:

Tabla 20 Periodos a estudiar en la validación Fuente elaboración propia

Periodo (T_p)
0,6931 s
0,8003 s
0,8948 s
0,9802 s
1,0587 s
1,1318 s

Para diferentes velocidades del buque,

Tabla 21 Velocidades a estudiar en la validación Fuente Elaboración propia

Velocidad (m/s)	0.3924	0.8829	1.5696
-----------------	--------	--------	--------

La carena se sometió a 6 periodos diferentes y a 3 números de Froude, de la misma manera que se realizó en el estudio en el que se basa dicha validación. Tras la reproducción y la simulación para la carena Wigley se obtuvieron los siguientes resultados, que se detallan a continuación los cuales deben ser tratados para la obtención de los valores de la resistencia añadida en olas final.

En primer lugar, se realiza una simulación con las condiciones de contorno anteriormente expuesta donde no se tiene en cuenta el oleaje. De ésta se obtienen las fuerzas en el eje X y una fuerza correctora FC, donde,



$$F_x = \int_{S_p} P_p^{c(2)} n_p ds + \int_{\Gamma_{wl}} P_p^{w(2)} (n_p^0 / \sqrt{1 - n_{pz}^0{}^2}) dl \quad (18)$$

$$F_c = \int_{S_{ps}} P_{fs} n_p ds \quad (19)$$

La suma de ambas fuerzas dará la fuerza resultante,

$$R_{SO} = F_x + F_c. \quad (20)$$

A partir de esta resistencia R se obtendrá el coeficiente de generación de olas,

$$C_w = \frac{F_x + F_c}{0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2}. \quad (21)$$

Éste mismo procedimiento se replicará con oleaje, promediando para cada paso de tiempo el coeficiente de generación de olas.

$$R_{CO} = F_x + F_c \quad (22)$$

$$F_w = \overline{C_w} = \sum_1^n (C_{wi})_{CO} \quad (23)$$

$$F_M = \overline{C_w} \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2. \quad (24)$$

$$(R_{añadida})_{adimensional} = \frac{R_{CO} - R_{SO}}{\frac{\rho g \xi^2 B^2}{L}}. \quad (25)$$

Seguidamente se vuelve a realizar la misma simulación con la consideración de oleaje obteniendo nuevamente la resistencia. La diferencia entre ambas permitirá obtener entonces la resistencia añadida del casco. Se obtienen los siguientes resultados tras las distintas simulaciones:

Tabla 22 Resultados de la carena Wigley Fuente: Elaboración propia

Validación carena Wigley				
	Número de Froude	0,2	0,3	0,4
	Velocidad (m/s)	0,3924	0,8829	1,5696
Longitud de onda	Periodo	Resultados de la R_{aw} (adimensional)		
0,75	0,6931	2,1549	1,1514	0,6589
1	0,8003	13,6895	5,8496	2,7126
1,25	0,8948	9,1549	22,1846	5,8654
1,5	0,9802	3,1849	13,6456	17,5896
1,75	1,0587	1,2549	4,9216	7,3698
2	1,1318	1,0216	3,5896	0,3698

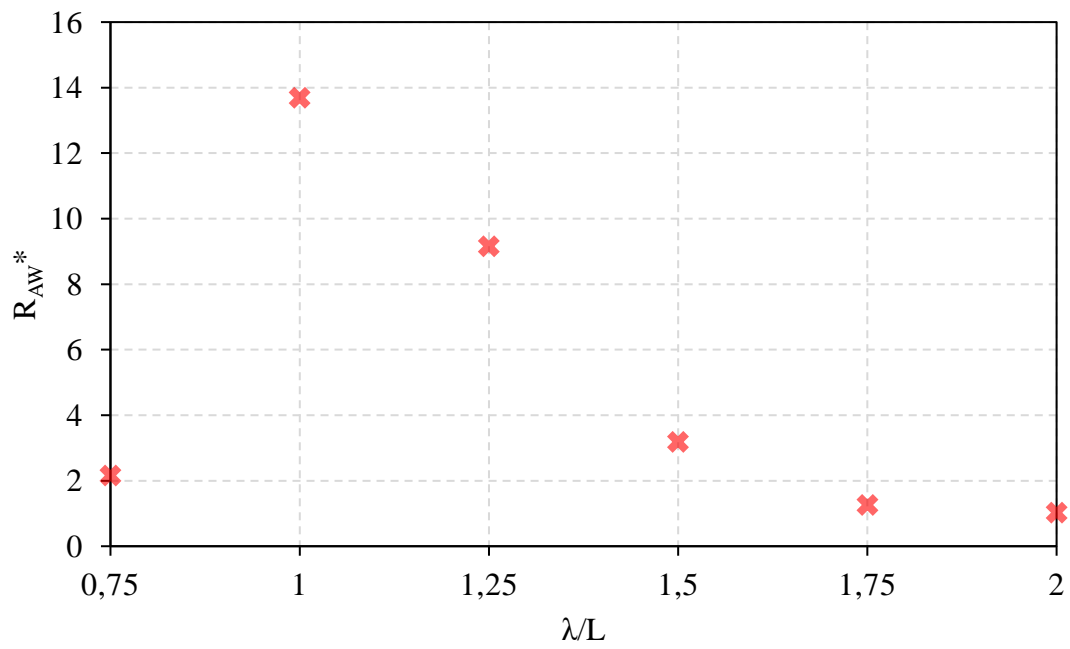


Figura 26 Resultados de la resistencia a\u00f1adida $Fr=0.2$ Fuente: Elaboraci\u00f3n propia

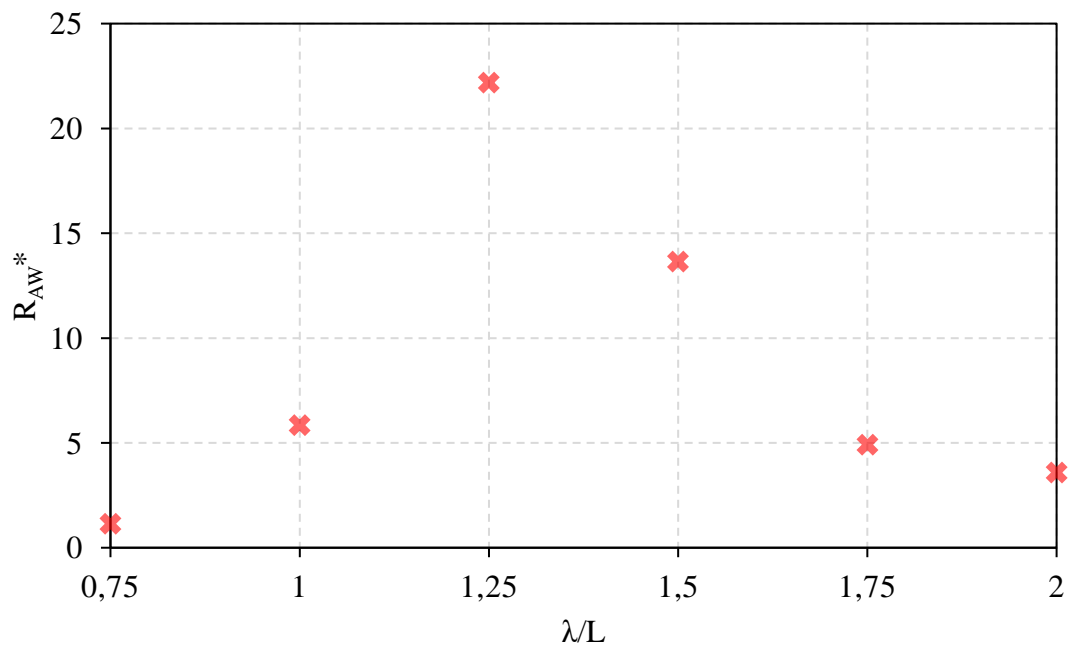


Figura 27 Resultados de la resistencia a\u00f1adida $Fr=0.3$ Fuente: Elaboraci\u00f3n propia

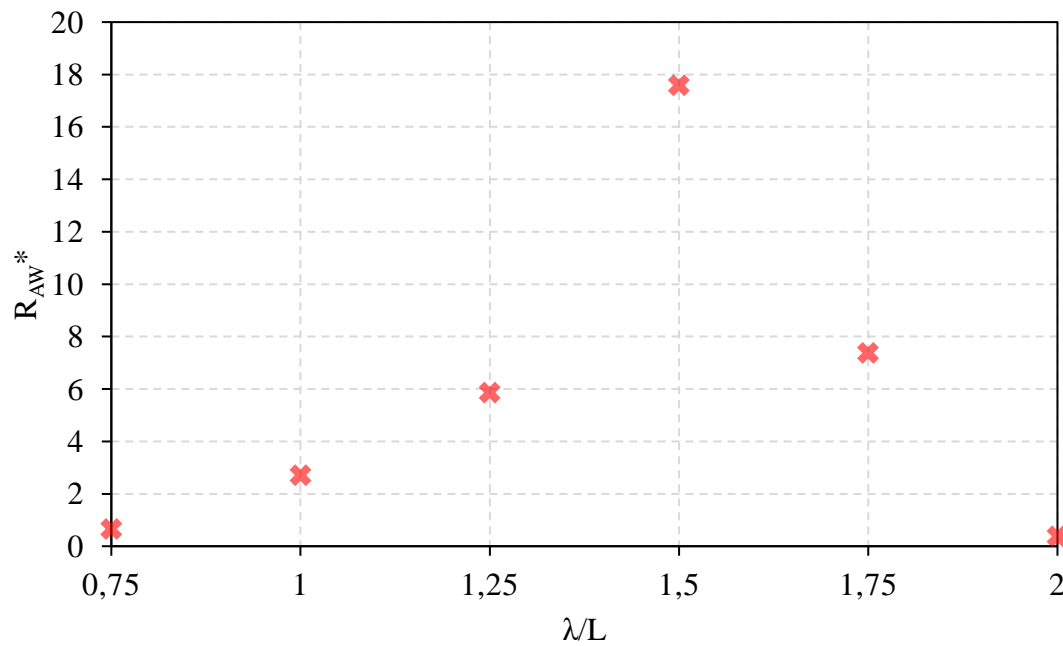


Figura 28 Resultados de la resistencia añadida $Fr=0.4$ Fuente: Elaboración propia

Tras la comparación de los resultados obtenidos por la simulación del comportamiento en la mar para los diferentes números de Froude y los resultados del estudio se puede concluir que los resultados coinciden con los obtenidos en las simulaciones del estudio, es por ello que se da por válida la metodología de análisis.



7.2. Obtención de la resistencia total y potencia real demandada del buque Ro-Ro

7.2.1. Objetivos

El objetivo principal de este capítulo es el cálculo de la resistencia añadida en olas y el cálculo de la resistencia total en aguas tranquilas, para poder obtener la resistencia total del buque y así calcular mediante los rendimientos la potencia demandada por el buque en cada instante de su ruta establecida. Para ello se ha dividido la ruta del buque en seis tramos cada uno de ellos con su condición de mar característica. Cada condición de mar se definirá mediante unos parámetros los cuales variarán de una a otra, y que serán descritos más adelante.

La importancia de la obtención de la potencia real demandada por el buque radica que hasta ahora el cálculo de emisiones se había hecho a partir de la potencia instalada en el buque, el porcentaje de utilización de la misma, el consumo de combustible derivado del uso junto con los factores de emisiones; esto hace que el error en los cálculos de las emisiones sea elevado ya que el buque no demanda la misma potencia en toda su navegación, aunque con este estudio no se obtendrá de manera exacta el valor de las emisiones, se obtendrá un valor que se acerque de manera más real a la realidad ya que se tienen en cuenta diferentes condiciones que debe hacer frente el buque en un trayecto normal. Obviamente este no cuenta con las excepciones de condiciones de mar que se puede encontrar el buque en cualquier momento sino se toma una media anual de los parámetros que definirán las condiciones de mar.

7.2.2. Esquema del procedimiento

El procedimiento a seguir en el cálculo de la resistencia en aguas tranquilas y la resistencia debida a la formación de olas será el siguiente.

En primer lugar, se deberá extraer los datos referentes a las condiciones ambientales, usando para ello la información que porta las boyas monitorizadas por puertos del estado, obteniendo como resultado la matriz de condiciones ambientales a estudiar.

Posteriormente se realiza el modelado del buque, tomando como referencia el plano de formas del buque que se quiere representar, adaptando el buque a las dos condiciones de carga que se quiere calcular, para poder llevar a cabo las simulaciones se deberá en primer lugar establecer los volúmenes de control para su correcta definición, en segundo lugar se llevará a cabo las simulaciones tanto para la obtención de la resistencia en aguas tranquilas como para la obtención de la resistencia añadida en olas.

En ambos casos se deberá calcular los parámetros necesarios para realizar las simulaciones y realizar un estudio de su malla para finalmente realizar todas las simulaciones obteniendo así de los resultados de ambos procedimientos la resistencia total del buque. A partir de ésta se calculará la potencia real demandada por el buque.

Partiendo de la potencia real demandada por el buque se podrá calcular las emisiones del buque en estudio para cada área de su ruta de navegación.

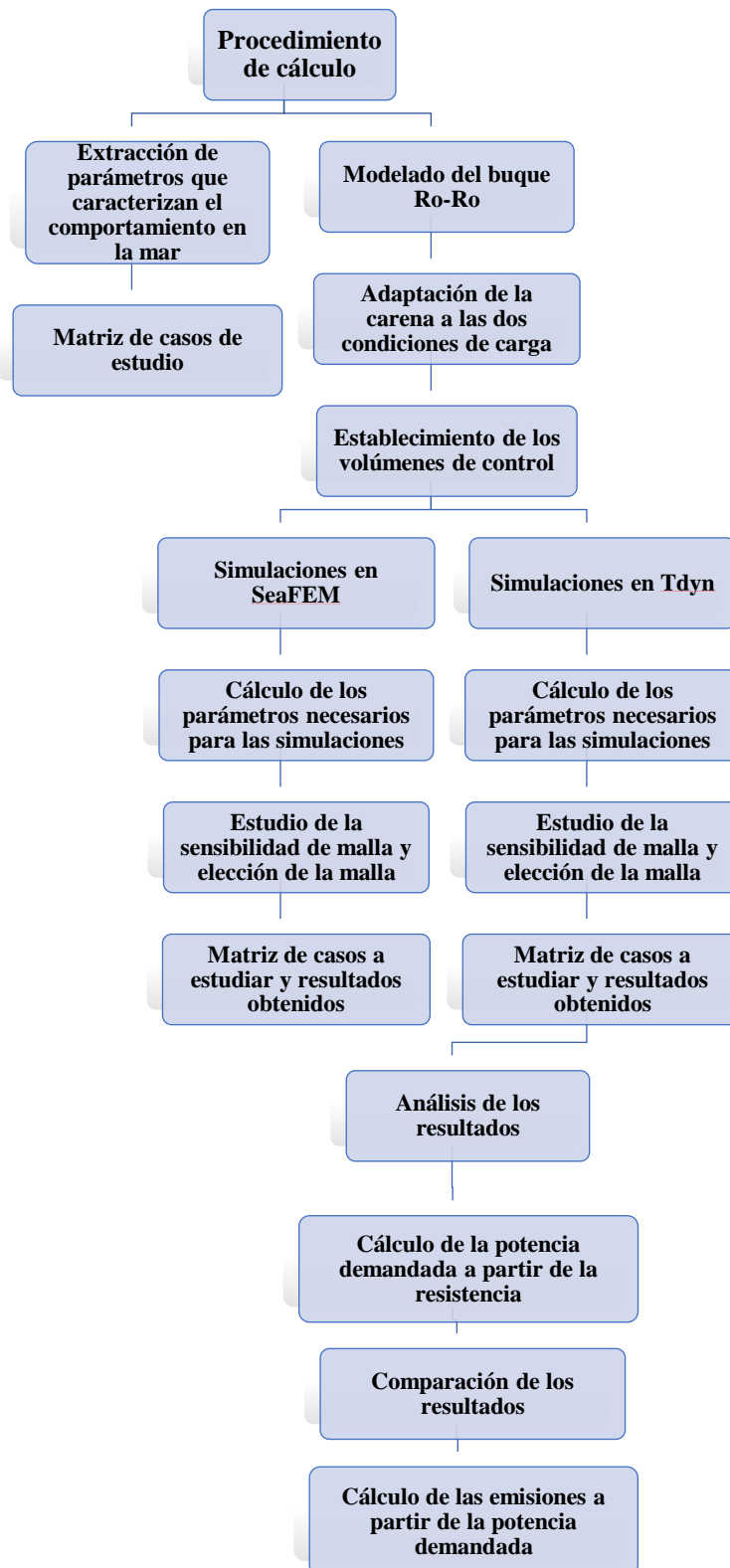


Figura 29 Procedimiento de cálculo Fuente: Elaboración propia



7.2.2.1. Preproceso

Para poder realizar los cálculos tanto en SeaFEM como en Tdyn-CFD se debe establecer unos volúmenes de control que son los que representarán la superficie libre, las paredes de entrada al flujo y salida del mismo.

Las dimensiones de los paralelepípedos que representan los volúmenes de control son las siguientes:

Tabla 23 Volumen de control interior Fuente: Elaboración propia

Paralelepípedo interior (menor)		
Dimensión	Valor	Unidades
Longitud de proa (en eslora)	50 (a partir del punto más a proa del buque)	m
Longitud de popa (en eslora)	90 (a partir del punto más a popa del buque)	m
Altura (en puntal)	20	m
Profundidad (en manga)	20	m

Tabla 24 Volumen de control exterior Fuente: Elaboración propia

Paralelepípedo exterior (mayor)		
Dimensión	Valor	Unidades
Longitud de proa (en eslora)	$0.7 L_{pp} = 126$	m
Longitud de popa (en eslora)	$1.4 L_{pp} = 252$	m
Altura (en puntal)	$0.6 L_{pp} = 108$	m
Profundidad (en manga)	$0.7 L_{pp} = 126$	m

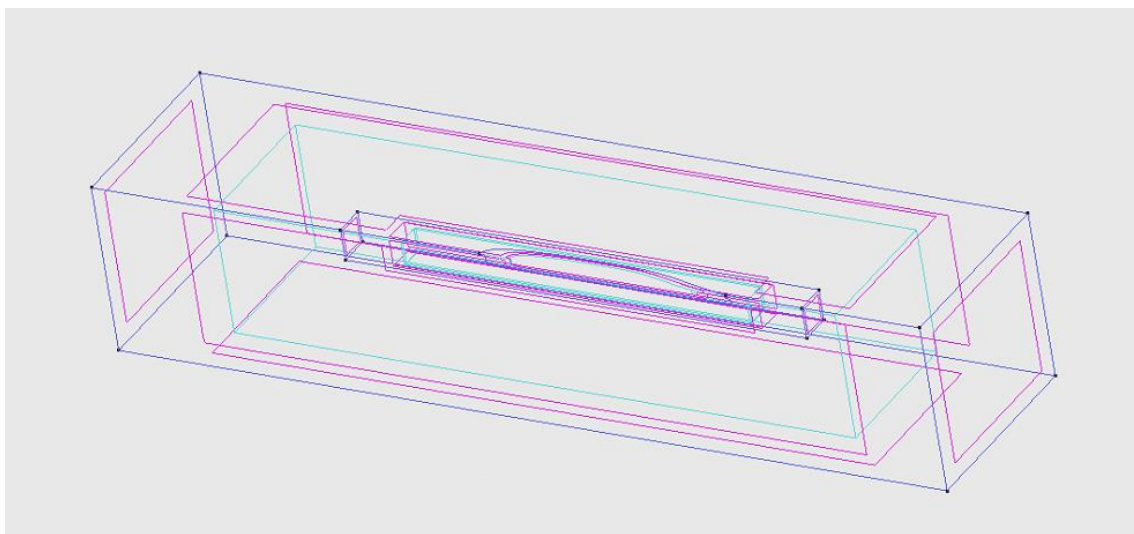


Figura 30 Volúmenes de control Fuente: Elaboración propia



7.2.2.2. Boyas y casos de estudio

Para el estudio de la resistencia real demandada por el buque en toda su ruta de navegación se ha dividido ésta en seis zonas, dicha separación se ha basado en el análisis de las diferentes boyas que aportan información sobre altura de ola, periodo pico, y dirección de las olas durante el año 2017. Tras el estudio de 28 boyas por proximidad y semejanza de similares características, se decidió agrupar en zonas de navegación obteniéndose así las seis zonas indicadas antes y que se muestran en las Figura 32 y 33. Los datos son extraídos de las boyas monitorizadas por el estado, por lo que se considera que los datos tienen una alta fiabilidad.



Figura 31 Mapa de boyas I Fuente: Elaboración propia



Figura 32 Mapa de boyas II Fuente: Elaboración propia

Para cada zona se establecerá la altura de ola significativa media, altura de ola significativa máxima, periodo pico, dirección de ola predominante y junto con la variación de condiciones de carga y de velocidad se obtiene la matriz de cálculo para las diferentes simulaciones a realizar en el buque para obtener la resistencia del buque y así su potencia demandada en cada instante.

Las velocidades a estudiar fueron elegidas a partir de la velocidad máxima del buque. En este caso 18 nudos y dos velocidades más con 3 nudos de diferencia respecto a su máximo, estas velocidades son 15 y 12 nudos. Para cada zona se calculó la media de los datos obtenidos de las diferentes boyas que las componen, obteniendo para cada una de ella un periodo pico máximo, una altura significativa de ola y una altura máxima de ola. El estudio para la altura de ola significativa y altura de ola máxima se deben llevar por separado ya que no se puede estudiar ambas a la misma vez, en una misma simulación,



es por ello que la matriz de casos a estudiar se compone de los datos mostrados en las Tablas 25 y 26, donde Fr es el número de Froude, Hs es la altura significativa de ola, siendo Tp es el periodo pico de ola y σ la dirección predominante de las olas.

Tabla 25 Matriz de caso de estudio con Hs Fuente: Elaboración propia

		Fr	Hs (m)	Tp(s)	σ
1	ZONA 1	0,1034	3,3553	8,3294	104
2	ZONA 1	0,0944	3,3553	8,3294	104
3	ZONA 1	0,0845	3,3553	8,3294	104
4	ZONA 2	0,1034	5,2588	9,8867	64
5	ZONA 2	0,0944	5,2588	9,8867	64
6	ZONA 2	0,0845	5,2588	9,8867	64
7	ZONA 3	0,1034	5,1221	9,4693	75
8	ZONA 3	0,0944	5,1221	9,4693	75
9	ZONA 3	0,0845	5,1221	9,4693	75
10	ZONA 4	0,1034	3,3893	8,1175	302
11	ZONA 4	0,0944	3,3893	8,1175	302
12	ZONA 4	0,0845	3,3893	8,1175	302
13	ZONA 5	0,1034	2,8200	7,1081	129
14	ZONA 5	0,0944	2,8200	7,1081	129
15	ZONA 5	0,0845	2,8200	7,1081	129
16	ZONA 6	0,1034	2,9165	8,2593	228
17	ZONA 6	0,0944	2,9165	8,2593	228
18	ZONA 6	0,0845	2,9165	8,2593	228

Tabla 26 Matriz de caso de estudio con Hmax Fuente: Elaboración propia

		Fr	H max (m)	Tp(s)	σ
19	ZONA 1	0,1034	6,0500	8,3294	104
20	ZONA 1	0,0944	6,0500	8,3294	104
21	ZONA 1	0,0845	6,0500	8,3294	104
22	ZONA 2	0,1034	8,8600	9,8867	64
23	ZONA 2	0,0944	8,8600	9,8867	64
24	ZONA 2	0,0845	8,8600	9,8867	64
25	ZONA 3	0,1034	9,4800	9,4693	75
26	ZONA 3	0,0944	9,4800	9,4693	75
27	ZONA 3	0,0845	9,4800	9,4693	75
28	ZONA 4	0,1034	7,9600	8,1175	302
29	ZONA 4	0,0944	7,9600	8,1175	302
30	ZONA 4	0,0845	7,9600	8,1175	302
31	ZONA 5	0,1034	6,5600	7,1081	129
32	ZONA 5	0,0944	6,5600	7,1081	129
33	ZONA 5	0,0845	6,5600	7,1081	129
34	ZONA 6	0,1034	5,9200	8,2593	228
35	ZONA 6	0,0944	5,9200	8,2593	228
36	ZONA 6	0,0845	5,9200	8,2593	228



7.2.2.3. Cálculo para SeaFEM y procedimiento de simulación

Para el cálculo de la resistencia añadida en ola se ha elegido el programa SeaFEM éste es un conjunto de herramientas para el análisis computacional del efecto de las olas, el viento y las corrientes en las estructuras navales y offshore, así como para los estudios de maniobra. Los análisis a realizar a este programa son los referentes al comportamiento en la mar, para una buena realización de las simulaciones se debe indicar que se tratará de una batimetría infinita con una ola monocromática. La amplitud, el periodo al igual que la velocidad de corriente y la dirección de esta, dependerá de la zona en estudio.

Además, de las características del oleaje y de corriente se debe añadir las propiedades del cuerpo en estudio, éstas son su masa la cual es función del volumen del modelo por la densidad. En segundo lugar, se debe introducir los radios de giro, que se calculan como:

$$R_{xx} = 0,30 \cdot B. \quad (26)$$

$$R_{yy} = 0,22 \cdot L, \quad (27)$$

$$R_{zz} = 0,22 \cdot L. \quad (28)$$

Finalmente, se indican los grados de libertad libres, que en el caso en estudio serán el cabeceo y la arfada. Además, se deben introducir unas fuerzas externas para compensar por un lado la pérdida de empuje por la discretización FEM, se trata de una fuerza vertical:

$$F_z = (M - \rho \nabla)g, \quad (29)$$

También se introduce un momento externo en el eje Y en forma de amortiguamiento proporcional a la velocidad de giro al cabeceo,

$$M_Y = -\frac{1}{4} \sqrt{4 K_{55} I_{YY}} w_y. \quad (30)$$

Del mismo modo, se debe indicar las condiciones de contorno, en este caso solamente se marcará la superficie libre del fluido (Figura 34) y la salida del mismo (Figura 35).

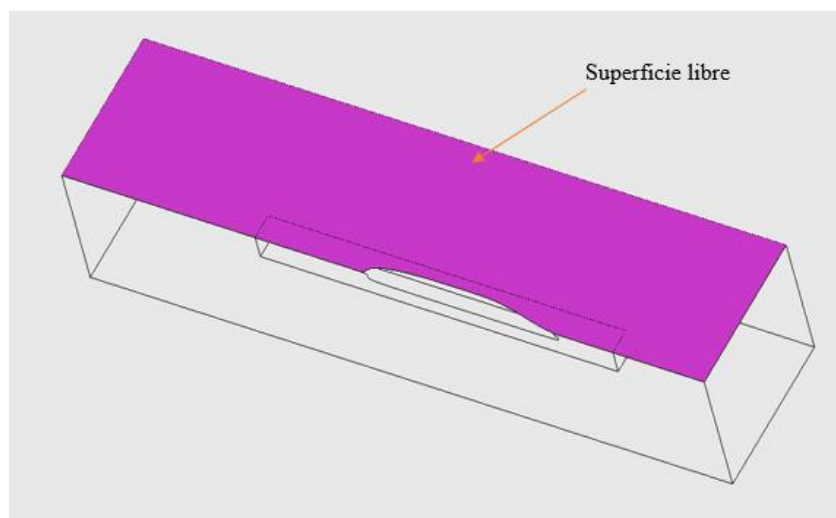


Figura 33 Superficie libre Fuente Elaboración propia

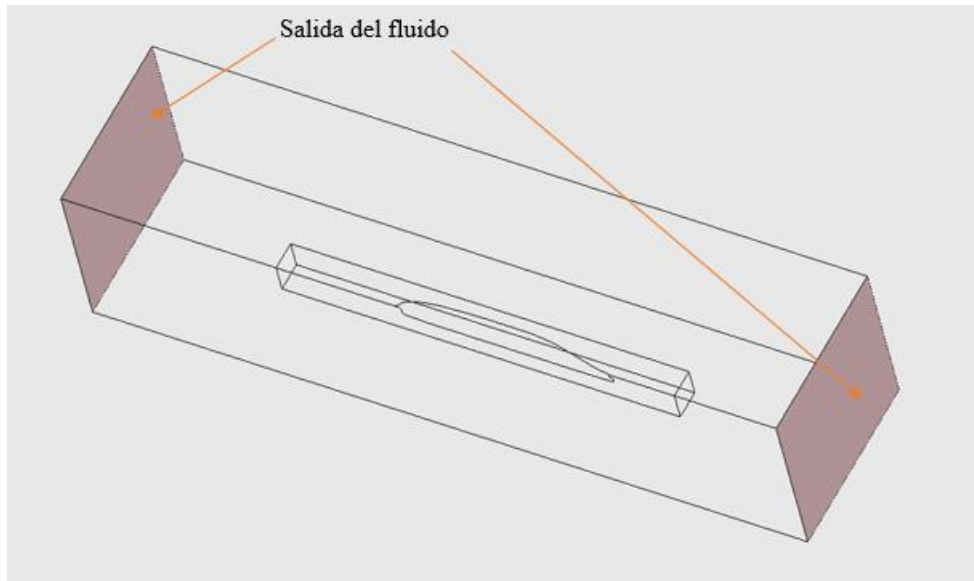


Figura 34 Salida del fluido Fuente Elaboración propia

7.2.2.4. Elección de malla

La elección de la malla es uno de los factores más importantes para unos resultados de calidad, es por ello que antes de su elección se debe realizar un análisis de sensibilidad de la misma.

Para la realización de la misma se han elegido tres tipos de mallas y se han comparado el número de nodos frente a los resultados obtenidos, finalmente se ha elegido la que tiene mejor resultado en relación número de nodos-resultado.

El procedimiento para la elección de la malla más adecuada fue la siguiente:

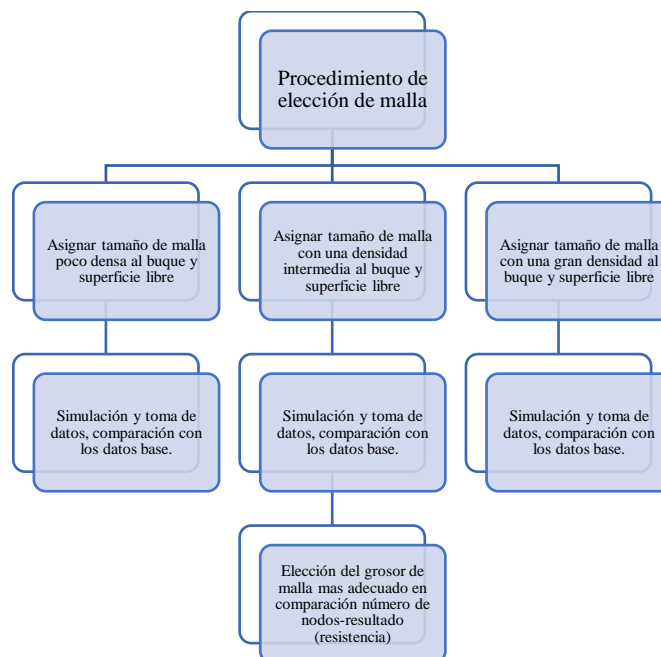


Figura 35 Procedimiento de elección de malla Fuente: Elaboración propia



Obteniendo lo mostrado en la Tabla 27, donde se compara el número de nodos frente a los resultados de resistencia añadida obtenidos,

Tabla 27 Sensibilidad de malla 1 Fuente: Elaboración propia

Número de malla	Numero de nodos	Raw (kN)	Diferencia en % de cada iteración
1	$2,44 \times 10^5$	191,486	-
2	$5,72 \times 10^5$	158,985	16,97
3	$6,46 \times 10^5$	147,319	7,33

Por el resultado y el número de nodos se ha elegido la última malla estudiada debido a la precisión de los resultados tomando como referencia los resultados obtenidos por la aplicación de la metodología de cálculo de la resistencia al avance basada en la aplicación del método de Holtrop-Mennen (Holtrop-Mennen,1988) y la resistencia que ofrece el buque calculado mediante la herramienta de comportamiento en la mar; ésta representa entre el 10 y 30 % de la resistencia total del buque tal y como indica la teoría del mismo.

Para el análisis de toda la ruta de navegación se realizarán los test indicados en las Tablas 28 y 29 para poder describir de la mejor manera posible las demandas de potencias instantánea que se pueden dar durante el periodo de navegación del buque.

Finalmente, se obtienen los siguientes resultados de la resistencia añadida en olas tanto para la carena 1 como para la carena 2. La carena 1 tiene los siguientes presentados en la Tabla 28.

Tabla 28 Resultados Raw Carena 1 Hs Fuente: Elaboración propia

Test	Raw (kN)	Test	Raw (kN)
1	147,320	19	147,097
2	85,978	20	88,624
3	38,552	21	19,948
4	145,009	22	90,104
5	73,468	23	49,802
6	37,019	24	30,412
7	159,348	25	157,004
8	88,319	26	79,713
9	29,732	27	32,552
10	108,765	28	92,908
11	63,516	29	53,902
12	30,344	30	33,504
13	143,632	31	150,327
14	68,465	32	82,089
15	40,724	33	30,322
16	78,115	34	101,731
17	44,757	35	64,765
18	23,582	36	31,476



Mientras que la carena 2 tiene los resultados mostrados en la Tabla 29.

Tabla 29 Resultados Raw Carena 2 Hs Fuente: Elaboración propia

Test	Raw (kN)	Test	Raw (kN)
1	70,843	19	75,602
2	58,874	20	64,771
3	35,351	21	21,349
4	72,646	22	78,489
5	45,474	23	45,695
6	25,513	24	48,548
7	122,192	25	115,697
8	50,484	26	38,328
9	42,057	27	32,723
10	76,894	28	77,430
11	35,334	29	51,805
12	20,658	30	32,770
13	124,449	31	159,197
14	63,782	32	65,525
15	20,479	33	59,885
16	135,121	34	86,604
17	64,745	35	67,907
18	19,596	36	36,655

7.2.2.5. Cálculo para CFD y procedimiento de simulación

Para calcular la resistencia en aguas tranquilas se usa el módulo de *Tdyn* el cual realiza sus cálculos mediante la mecánica de fluidos computacional para poder llevarlo a cabo, primero se define el modelo de turbulencia en este caso se elige el *K_Energy_two_layers* o sea un modelo de turbulencia de dos ecuaciones donde es preciso calcular la energía cinética turbulenta, la cual se calcula como:

$$E_K = 1,5 \cdot (V \cdot TIL)^2. \quad (31)$$

donde,

$$TIL = 1\%. \quad (32)$$

Este valor es el recomendado para la intensidad turbulenta, cuando se trata de estudios con flujos externos, como es el caso en estudio.

Del mismo modo se calcula la longitud de vórtices,

$$\text{Longitud de vórtices} \sim \frac{\mu}{\rho \sqrt{E_K}} \quad (33)$$

donde, μ es la viscosidad turbulenta y E_K es la energía cinética turbulenta



Para la simulación de la superficie libre se usará el método de transpiración quedando ésta como:

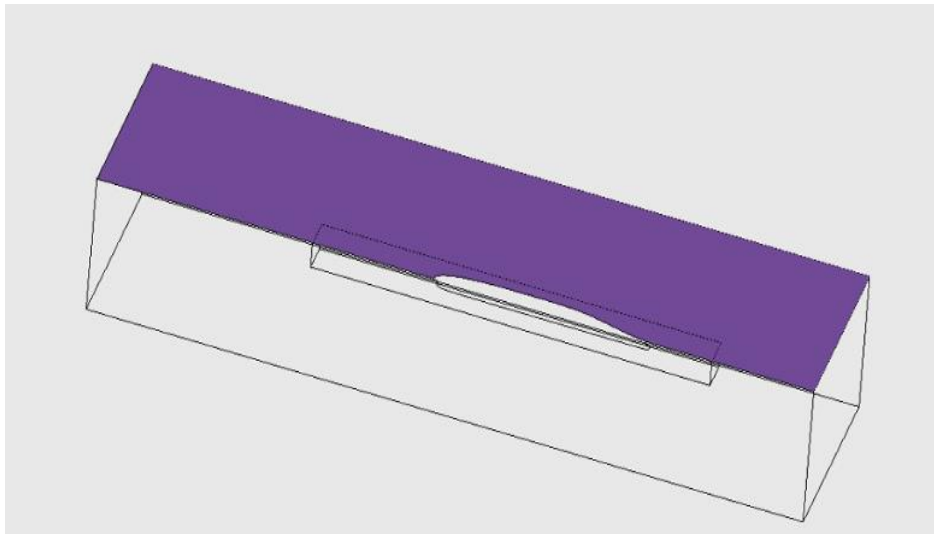


Figura 36: Superficie libre Fuente Elaboración propia.

Por otra parte, es necesario establecer unas condiciones de capa límite que van acorde a con la ITTC siendo calculada y^+

$$y^+ = y \cdot \rho \cdot \frac{u}{\mu} \quad (34)$$

siendo; u es la velocidad de fricción y μ es la viscosidad turbulenta.

$$y = 0,03 \cdot \delta \quad (35)$$

donde;

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,16}{Re^{1/7}} \rightarrow \text{si } Re > 10^6 \quad (36)$$

Por último, se generan unas condiciones de contorno que se les asignan a las superficies indicadas en las Figuras 39,40,41.

El campo de presiones se le asigna a la pared de salida del fluido;

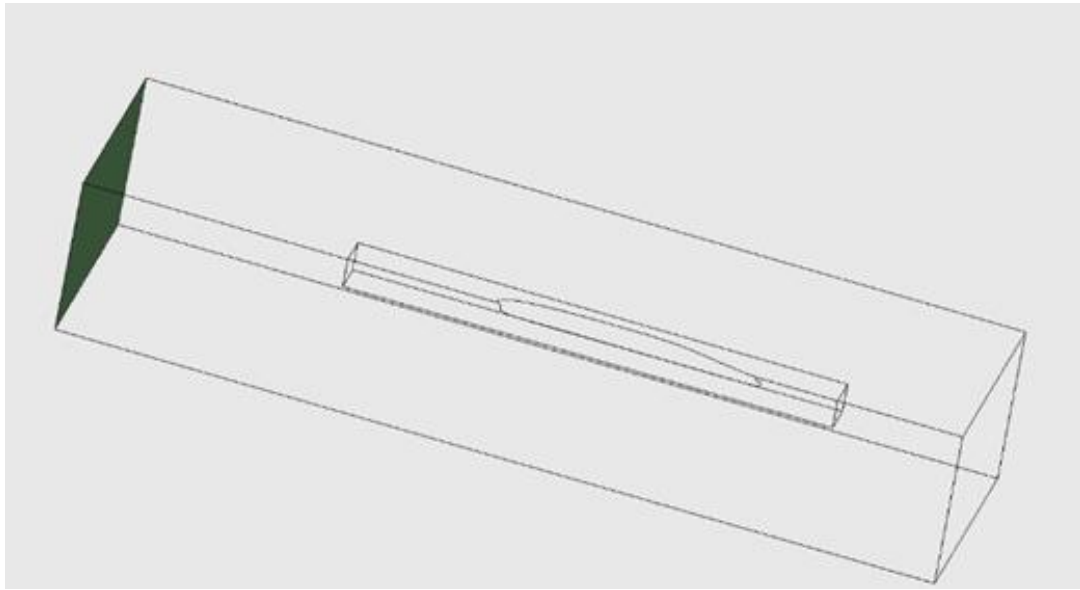


Figura 37 Campo de presiones Fuente Elaboración propia

El campo de velocidades se les asigna discretizando la misma en sus tres ejes, siendo la velocidad en el eje X la única no nula

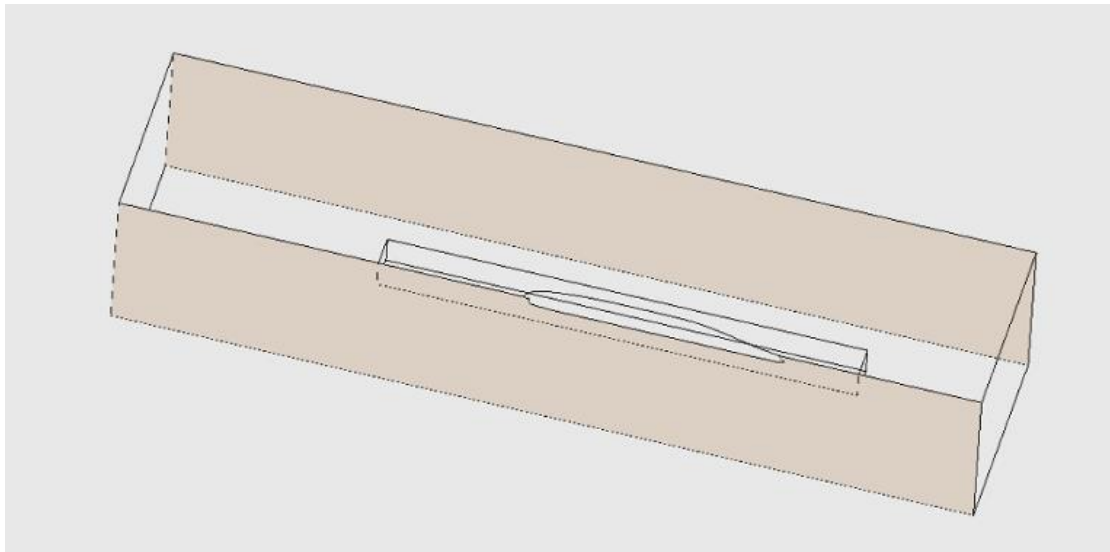


Figura 38 Asignación de la velocidad nula en el eje Y Fuente Elaboración propia

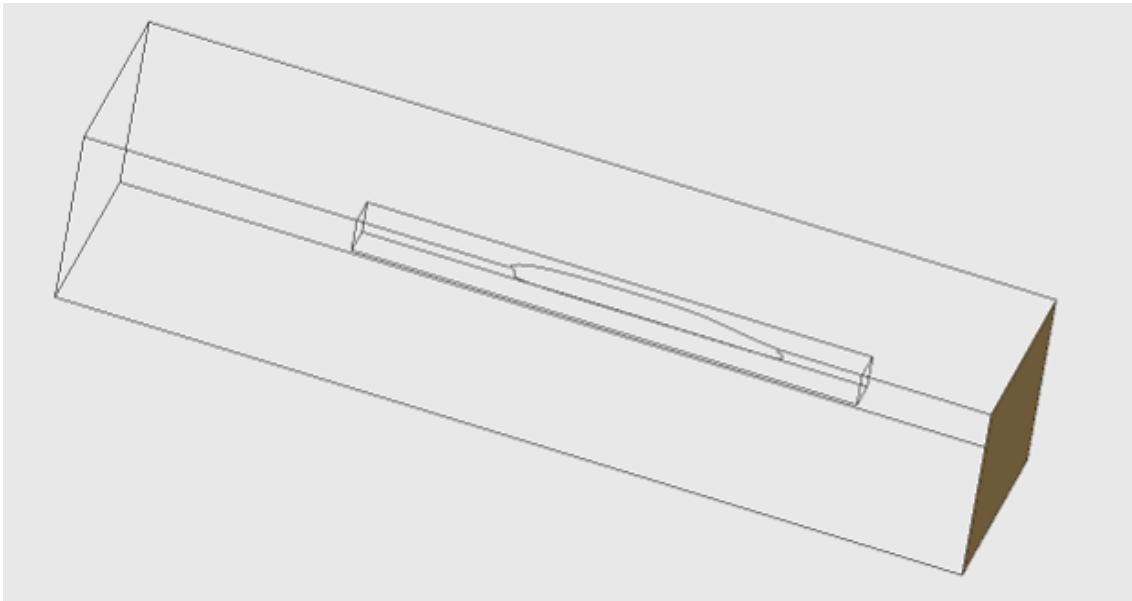


Figura 39 Asignación de la velocidad en el eje X Fuente Elaboración propia

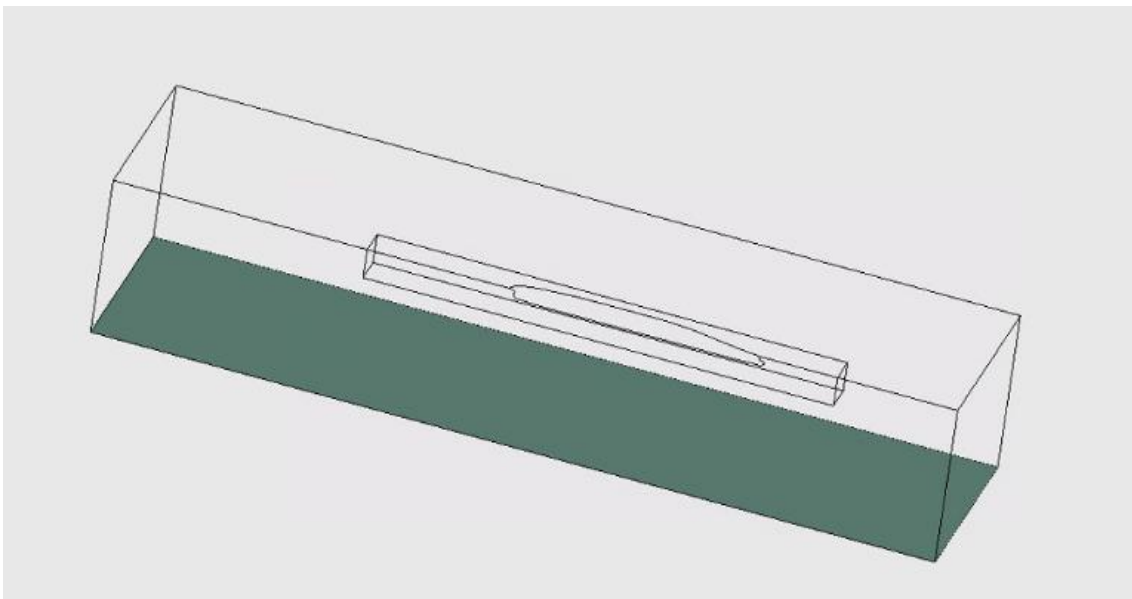


Figura 40 Asignación de la velocidad nula en el eje Z Fuente Elaboración propia

La elección de la malla es uno de los factores más importantes para unos resultados de calidad, es por ello que antes de su elección se debe realizar un análisis de sensibilidad de la misma.

Para la realización de la misma se han elegido tres tipos de mallas y se han comparado el número de nodos frente a los resultados obtenidos, finalmente se ha elegido la que tiene mejor resultado en relación número de nodos-resultado.

Obteniendo lo mostrado a continuación, donde P_{Fx} es la componente de la resistencia debido a la presión en el eje X y V_{Fx} es la componente de la resistencia debida a la viscosidad en el eje X.



Tabla 30 Elección de malla CFD Fuente: Elaboración propia

Número de malla	PFx (kN)	VFx(kN)	R(kN)
1	262,52	314,26	1153,56
2	74,568	234,46	618,056
3	48,693	241,146	579,678

Se ha elegido la malla número tres debido a que los resultados se ajustan mejor al rango de la resistencia en aguas tranquilas calculada por el método de Holtrop-Mennen, además los resultados son coherentes con el buque a analizar, la resistencia de origen viscoso tiene un valor mayor que la resistencia de presión, lo que indica que estamos antes un buque de desplazamiento o semi-desplazamiento, y no en condiciones de planeo.

Para el análisis de toda la ruta de navegación se realizarán las siguientes simulaciones para poder describir de la mejor manera posible las demandas de potencia que se pueden dar durante el periodo de navegación del buque.

Tabla 31 Resultados resistencia carena 1 Fuente: Elaboración propia

Condición 1			
Velocidad (nudos)	18	15	12
PFx (kN)	61,584	60,268	48,693
VF (x) (kN)	285,459	274,294	241,146
R (kN)	694,086	669,124	579,678

Tabla 32 Resultados resistencia carena 2 Fuente: Elaboración propia

Condición 2			
Velocidad (Nudos)	18	15	12
PFx (kN)	53,682	50,568	35,752
VF (x) (kN)	272,537	238,594	215,582
R (kN)	652,438	578,324	502,668

Para la correcta comparación con los métodos teóricos se calculará la potencia en aguas tranquilas, para ello se efectuarán los siguientes cálculos de los coeficientes de estela y succión, a la vez que los rendimientos del buque para poder calcular la potencia real demanda del mismo.:

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_p}, \quad (37)$$

$$EHP = R \cdot V. \quad (38)$$

Rendimiento propulsivo varía según la maquinaria instalada.

$$\eta_p = \frac{1 - t}{1 - w} \cdot \eta_{rr} \cdot \eta_m \cdot \eta_o \quad (39)$$



Rendimiento rotativo-relativo no es un rendimiento propiamente dicho, mide la bondad de la interacción de la carena y el propulsor. Por lo tanto, puede ser mayor a 1.

$$\eta_{rr} = 0.9737 + \left(0.111 \cdot (C_p - (0.0225 \cdot L_{cb}))\right) - \left(0.06325 \cdot \left(\frac{P_h}{D_h}\right)\right) \quad (40)$$

donde η_m es el rendimiento mecánico de la línea de ejes completa, con la bocina, incluyendo el reductor y η_o es el rendimiento del propulsor aislado.

$$\eta_m = 0.95 \quad \eta_o = 0.714 \quad (391)$$

Coefficiente de estela,

$$w = (0.3095 C_b)(10 \cdot C_b \cdot C_v) - \left(0.23 \cdot \left(\frac{D_h}{(B \cdot T_m)^{0.5}}\right)\right) \quad (4240)$$

donde, C_b es el coeficiente de bloque, C_v el coeficiente de viscosidad, D_h el diámetro de la hélice, B la manga del buque y T_m es el calado medio del buque.

Coefficiente de succión

$$t = (0.325 \cdot C_b) - \left(0.1885 \cdot \left(\frac{D_h}{(B \cdot T_m)^{0.5}}\right)^{0.5}\right) \quad (43)$$

Tabla 33 Resultado de w/t y rendimientos Fuente: Elaboración propia

w	0,1075
t	0,1213
η_{rr}	1,0321
η_p	0,6893

Aplicando la formulación expuesta a los datos calculados mediante las diferentes simulaciones usando la mecánica de fluidos computacional se obtienen los resultados de las tablas 34y 35 para cada condición de carga:

Tabla 34 Resultados de la carena 1 Fuente: Elaboración propia

Condición 1			
Velocidad (knots)	18	15	12
Velocidad (m/s)	9,26	7,72	6,17
PFx (kN)	61,58	60,26	48,69
VF (x) (kN)	285,45	274,29	241,14
R (kN)	694,08	669,12	579,67
P(kW)	9324,05	7493,83	5188,62



Tabla 35 Resultados de la carena 2 Fuente: Elaboración propia

Condición 2			
Velocidad (knots)	18	15	12
Velocidad (m/s)	9,26	7,72	6,17
P _{Fx} (kN)	53,68	50,56	35,75
V _F (x) (kN)	272,53	238,59	215,58
R (kN)	652,43	578,32	502,66
P(kW)	8764,57	6476,92	4499,31

Para la correcta comparación, se ha programado el cálculo teórico de la resistencia mediante el método de Holtrop - Mennen, éste es un método estadístico obtenido a partir de regresiones matemáticas de los resultados de los ensayos del Canal de Wageningen y de resultados de pruebas de mar de buques construidos, que proporciona estimaciones de la resistencia bastante satisfactorias.

La muestra de buques que se ha tomado para este método abarca petroleros, bulkcarriers, buques de carga general, pesqueros, remolcadores, portacontenedores y fragatas entre otros. El procedimiento de predicción de potencia es válido para buques de una y dos líneas de ejes.

El rango de aplicación de este método incluye a los buques Roll-on Roll-off los cuales deben cumplir las siguientes condiciones de aplicación:

Tabla 36 Rango de aplicación Holtrop-Mennen Fuente: Holtrop-Mennen

Tipo de buque	Fr		C _p		L/B		B/T	
	max	min	max	min	max	min	max	
Petroleros, bulkcarriers	0,24	0,73	0,85	5,1	7,1	2,4	3,2	
Arrastreros, costeros, remolcadores	0,38	0,55	0,65	3,9	6,3	2,1	3	
Portacontenedores	0,45	0,55	0,67	6	9,5	3	4	
Cargueros	0,3	0,56	0,75	5,3	8	2,4	4	
Ro-Ro, Ferries	0,35	0,55	0,67	5,3	8	3,2	4	

Siguiendo los rangos de aplicación expuestos en la Tabla 36, se obtienen la tabla de verificación del método mostrado de la Tabla 3, concluyendo que es válido para el tipo de buque a estudiar.



Tabla 37 Resultado de las comprobaciones Fuente: Elaboración propia

Comprobaciones				
	Fr	Cp	L/B	B/T
Petroleros, bulkcarriers	VÁLIDO	NO VÁLIDO	NO VÁLIDO	NO VÁLIDO
Arrastreros, costeros, remolcadores	VÁLIDO	VÁLIDO	NO VÁLIDO	NO VÁLIDO
Portacontenedores	VÁLIDO	VÁLIDO	VÁLIDO	VÁLIDO
Cargueros	VÁLIDO	VÁLIDO	VÁLIDO	VÁLIDO
Ro-Ro, Ferries	VÁLIDO	VÁLIDO	VÁLIDO	VÁLIDO

La resistencia al avance se calcula mediante el procedimiento tridimensional de Hughes, utilizando la línea básica de fricción de la ITTC-57.

La resistencia al avance se divide en las siguientes componentes:

$$RT = RV + RAP + RW + RB + RTR + RA \quad (41)$$

- RT Resistencia total.
- RV Resistencia viscosa.
- RAP Resistencia de los apéndices.
- RW Resistencia por formación de olas.
- RB Resistencia de presión producida por el bulbo.
- RTR Resistencia de presión de las popas de estampa cuando están sumergidas.
- RA Resistencia debida al coeficiente de correlación modelo-buque, CA.

Resistencia viscosa (Rv):

$$Rv = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_f (1 + k_1) \quad (42)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (43)$$

El valor de (1+K1) se obtiene estadísticamente:

$$(1 + k_1) = 0.93 + 0.48118c_{14} \left(\frac{B}{L_f}\right)^{1.06806} \left(\frac{T}{L_f}\right)^{0.46106} \left(\frac{L_f}{L_r}\right)^{0.121563} \left(\frac{L_f^3}{\nabla}\right)^{0.3648486} (1 - C_p)^{-0.60424} \quad (44)$$

$$\frac{L_r}{L_f} = 1 - C_p + \left(0.06C_p \frac{lcb}{4C_p - 1}\right) \quad (45)$$

C_p es el coeficiente prismático referido a la eslora en la flotación L_F , y lcb es la posición longitudinal del centro de carena a partir de la sección media como un porcentaje de L_F (lcb será positivo hacia proa).

El coeficiente c_{14} pretende introducir la forma de popa en el factor de forma:



$$c_{14} = 1 + 0.011c_{stern} \quad (46)$$

$c_{stern} = -25$ Popas tipo góndola.

$c_{stern} = -10$ Cuadernas en V.

$c_{stern} = -0$ Cuadernas normales.

$c_{stern} = +10$ Cuadernas en U con popa Hogner.

Resistencia de los apéndices, RAP.

$$R_{ap} = \frac{1}{2} \rho S_{ap} V^2 C_f (1 + k_2)_{eq} \quad (47)$$

CF = Coeficiente de resistencia de fricción del buque según fórmula ITTC-57.

$$(1 + k_2)_{eq} = \frac{\sum S_i (1 + k_2)_i}{\sum S_i} \quad (48)$$

Donde,

S_i Superficie mojada de cada apéndice.

$(1 + k_2)_i$ $(1 + k_2)$ de cada apéndice.

En la tabla siguiente se dan valores aproximados de $(1 + k_2)$ para varios tipos de apéndices, a partir de los cuales se calcula el coeficiente equivalente $(1 + k_2)_{eq}$.

Tabla 38 Apéndices Fuente: Elaboración propia

Tipo de apéndice	$1 + k_2$
Timón buque 1 hélice	1,3 a 1,5
Timón buque 2 hélices	2,8
Timón y quillote	1,5– 2,0
Quillote solo	1,5 – 2,0
Arbotantes	3,0
Henchimientos protectores	3,0
Henchimientos integrados	2,0
Ejes	2,0 a 4,0
Aletas estabilizadoras	2,8
Domo	2,7
Quillas de balance	1,4

Para $Fn \leq 0.4$

Resistencia por formación de olas

$$R_w = \rho g \nabla C_1 C_2 C_5 e^{m_1 F_n^d + m_2 \cos(\lambda F_n^{-2})} \quad (49)$$

$$C_1 = 223105 C_7^{3.78613} \left(\frac{T}{B}\right)^{1.07961} (90 - IE)^{-1.37565} \quad (50)$$



IE = Semiángulo de entrada en la flotación, en grados.

Tabla 39 Cálculo del coeficiente 7 Fuente: Holtrop-Mennen

$C7 = 0.229577 \left(\frac{B}{Lf}\right)^{0.3333}$	Para $B/Lf \leq 0.11$
$C7 = B/Lf$	Para $0.11 \leq B/Lf \leq 0.25$
$C7 = 0.5 - 0.0625Lf/B$	Para $B/Lf \geq 0.25$

$$d = -0.9$$

$$C2 = e^{-1.89\sqrt{C3}} \quad (51)$$

$$C3 = (0.56Abt^{1.5})/(BT(0.31\sqrt{Abt} + Trr - hb)) \quad (52)$$

ABT Área transversal del bulbo en la vertical de la intersección de la flotación con el perfil de proa, m².

hB Altura sobre la base del c.d.g. de la sección del bulbo de proa en la perpendicular de proa.

$$C5 = 1 - \left(\frac{0.8Atr}{BTmCm}\right) \quad (53)$$

$$m1 = \frac{0.014047Lf}{T} - \frac{1.75254\sqrt[3]{1}}{Lf} - \frac{4.79323B}{Lf} - C16 \quad (54)$$

$$C16 = 8.07981Cp - 13.8673Cp^2 + 6.984388Cp^3 \quad \text{si } Cp \leq 0.8 \quad (55)$$

$$C16 = 1.73014 - 0.7067Cp \quad \text{si } Cp > 0.8 \quad (56)$$

$$m2 = C15Cp^2 0.4e^{-0.1Fn^{-2}} \quad (57)$$

Con:

$$C15 = -1.69385 \quad \text{si } \frac{LF^3}{\nabla} \leq 512 \quad (58)$$

$$C15 = -\frac{1.69385 \left(\frac{LF^3}{\nabla} - 8\right)}{2.36} \quad \text{si } 512 < \frac{LF^3}{\nabla} < 1727 \quad (59)$$

$$C15 = 0 \quad \text{si } \frac{LF^3}{\nabla} > 1727 \quad (60)$$



Resistencia de presión producida por el bulbo cerca de la flotación.

La resistencia adicional debida a la presencia de bulbo de proa cerca de la superficie está determinada por:

$$R_b = \frac{0.11E^{-3PB^{-2}}(Fni^3 Atb^{1.5} g\rho)}{1 + Fni^2} \quad (61)$$

donde el coeficiente PB es una medida para la parte que emerge de la proa y Fni es el número de Froude referido a la inmersión:

$$Pb = \frac{0.56\sqrt{Atb}}{Trr - 1.5hb} \quad (62)$$

$$Fni = V/\sqrt{g(Trr - hb - 0.25\sqrt{Atb}) + 0.15V^2} \quad (63)$$

Resistencia adicional debida a la inmersión del espejo, RTR.

De forma similar, la resistencia de presión adicional debida a la parte sumergida de la estampa, se determina con:

$$R_{tr} = \frac{1}{2}\rho V^2 A_{tr} C_6 \quad (64)$$

El coeficiente C6 ha sido relacionado con el número de Froude referido al área sumergida de la estampa:

$$C_6 = 0.2(1 - 0.2Fnt) \text{ si } Fn NT < 5 \quad (65)$$

$$C_6 = 0 \text{ Si } Fn NT \geq 5 \quad (66)$$

Resistencia debida a la correlación modelo-buque, RA.

Tiene en cuenta la correlación modelo-buque, la rugosidad del casco y la resistencia del aire.

$$RA = \frac{1}{2}\rho SV^2 Ca \quad (67)$$

$$Ca = 0.006(Lf + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003\left(\frac{LF}{7.5}\right)^{0.5} Cb^4 C_2(0.04 - C_4) \quad (68)$$

$$C_2 = e^{-1.89\sqrt{c_3}} \quad (69)$$

$$C_3 = 1 - \left(\frac{0.8A_{tr}}{BTmCm}\right) \quad (70)$$



$$C4 = \frac{Trr}{Lf} \quad si \frac{Trr}{Lf} \leq 0.04 \quad (71)$$

$$C4 = 0.04 \quad si \frac{Trr}{Lf} > 0.04 \quad (72)$$

Tras este procedimiento se obtienen los datos de la Tabla 40 de las componentes principales de la resistencia en aguas tranquilas

Tabla 40 Resultados de la resistencia de Holtrop-Mennen Fuente: Elaboración propia

Rf resistencia de fricción	294,208	kN
Rapp resistencia apéndices	2,214	kN
Rw resistencia por formación de olas	60,063	kN
Rb resistencia por bulbo	$2,826 \times 10^{-4}$	kN
Ra correlación buque modelo	80,114	kN

Tabla 41 Resultados de resistencia y de potencia de Holtrop-Mennen Fuente:Elaboración propia

Resultados		
Resistencia de remolque	453,5114	kN
EHP	4199,52	kW
EHP	5710,06	Cv
	HP	KW
BHP	8283,64	6092,28
BHP totales	16567,27	12184,55

Finalmente, para la comparación y validación de la resistencia obtenida mediante la CFD, se parte de la premisa que se deben comparar todos los métodos de cálculo de resistencia usados, con los mismos parámetros base, estos son:

- Misma velocidad (en el caso a estudiar son 18 nudos)
- El buque se encuentra bajo las mismas condiciones de carga (mismo desplazamiento y calado).

Por lo tanto, de los resultados obtenidos mediante las técnicas de CFD solo se podrá verificar el valor cuyos datos de entrada sean los mismos que en el cálculo de la resistencia mediante el método de Holtrop-Mennen y los datos ofrecidos por el armador del buque en estudio, obteniendo los resultados que se muestran a continuación:



Tabla 42 Comparación potencia carena 1 Fuente: Elaboración propia

Condición 1			
	Holtrop	CFD	Datos teóricos del buque ya construido
BHP (kW)	12184.55	9324.05	10305

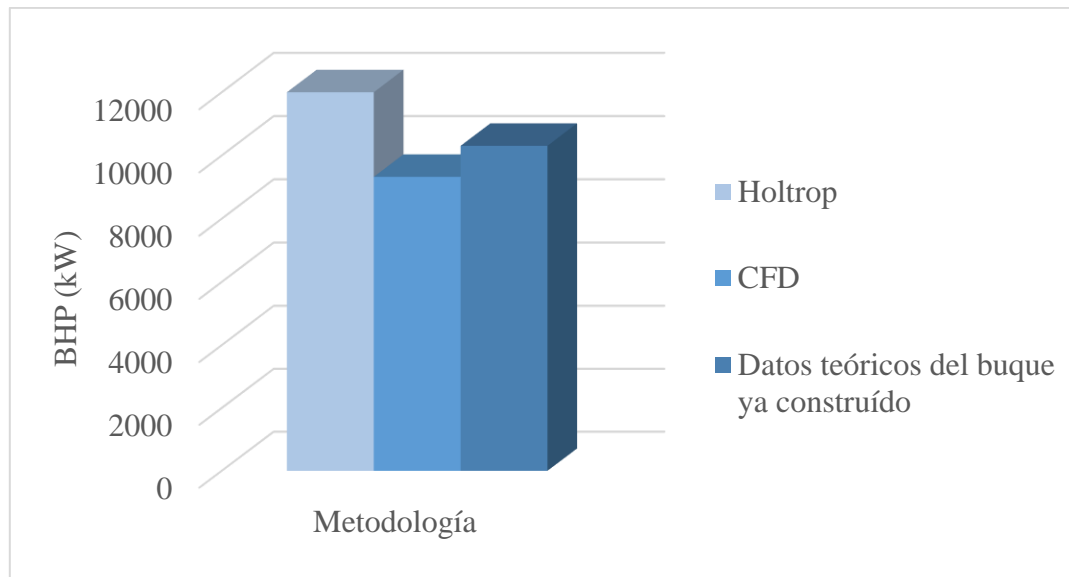


Figura 41 Comparativa de la potencia Fuente: Elaboración propia

Finalmente, por una parte, se concluye que los datos obtenidos mediante la CFD son aceptables ya que en comparación a la potencia necesaria en el buque a la misma velocidad (18 nudos) tienen un 9,52 % de error. Por otra parte, que se puede concluir que el método de Holtrop-Mennen sobrestima la resistencia de remolque del buque en estudio. Por lo tanto, se puede concluir que la resistencia obtenida a partir de la CFD es válida. Se podrá sumar entonces la resistencia añadida en olas para obtener la resistencia total instantánea del buque, y como consecuencia, la potencia instantánea demanda por el buque, para cada zona, en cada condición de navegación.

En la Tabla 43 se lleva a cabo la comparación del resultado de la resistencia en aguas tranquilas calculada mediante la mecánica de fluidos computacional frente a la resistencia teórica calculada mediante el método de Holtrop-Mennen, y frente a los datos facilitados del buque actualmente en operación.

Tabla 43 Porcentaje de error entre los diferentes métodos Fuente: Elaboración propia

Métodos a comparar	% de error
Holtrop - CFD	23,48
Datos teóricos - CFD	9,52

7.2.3. Resultados

Finalmente, se obtienen los resultados mostrados en las Tablas 44 y 45, a partir de la resistencia en aguas tranquilas calculadas mediante CFD y la resistencia añadida en olas obtenida mediante SeaFEM. La suma de ambas será la resistencia total del buque pudiendo calcular así la potencia real demandada por el mismo.



Tabla 44 Resultados de la potencia carena 1 Fuente: Elaboración propia

	ZONAS	Ro (kN)	Raw (KN)	Rt (KN)	Potencia(kW)
1	ZONA 1	694,08	147,32	841,40	11303,07
2	ZONA 1	669,12	85,97	755,10	8456,74
3	ZONA 1	579,67	38,52	618,23	5533,70
4	ZONA 2	694,08	145,00	839,09	11272,04
5	ZONA 2	669,12	73,46	742,59	8316,63
6	ZONA 2	579,67	37,09	616,69	5519,97
7	ZONA 3	694,08	159,34	853,43	11464,65
8	ZONA 3	669,12	88,31	757,44	8482,96
9	ZONA 3	579,67	29,73	609,41	5454,75
10	ZONA 4	694,08	108,76	802,85	10785,15
11	ZONA 4	669,12	63,51	732,64	8205,18
12	ZONA 4	579,67	30,34	610,02	5460,23
13	ZONA 5	694,08	143,63	837,71	11253,54
14	ZONA 5	669,12	68,46	737,58	8260,61
15	ZONA 5	579,67	40,72	620,40	5553,13
16	ZONA 6	694,08	78,11	772,20	10373,40
17	ZONA 6	669,12	44,75	713,8	7995,09
18	ZONA 6	579,67	23,58	603,26	5399,70

Tabla 45 Resultados de la potencia carena 2 Fuente: Elaboración propia

	ZONAS	Ro (kN)	Raw (KN)	Rt (KN)	Potencia(kW)
1	ZONA 1	694,08	70,84	723,28	9716,24
2	ZONA 1	669,12	58,87	637,19	7136,27
3	ZONA 1	579,67	35,35	538,01	4815,74
4	ZONA 2	694,08	72,64	725,08	9740,46
5	ZONA 2	669,12	45,47	623,79	6986,20
6	ZONA 2	579,67	25,51	528,18	4727,68
7	ZONA 3	694,086	122,19	774,63	10406,04
8	ZONA 3	669,12	50,48	628,80	7042,31
9	ZONA 3	579,67	42,05	544,72	4875,76
10	ZONA 4	694,08	76,89	729,33	9797,53
11	ZONA 4	669,12	35,33	613,65	6872,64
12	ZONA 4	579,67	20,65	523,32	4684,22
13	ZONA 5	694,08	124,44	776,88	10436,36
14	ZONA 5	669,12	63,78	642,10	7191,25
15	ZONA 5	579,67	20,47	523,14	4682,62
16	ZONA 6	694,08	135,12	787,55	10579,72
17	ZONA 6	669,12	64,74	643,06	7202,03
18	ZONA 6	579,6	19,59	522,26	4674,72



Representando gráficamente los resultados obtenidos mostrados en las Tablas 44 y 45 se obtiene lo que se muestran en el Figuras 45 a la 50, aunque para su evaluación se tomaron en cuenta todos los datos expuestos para la representación se usará la condición de carga 1, debido a que las variaciones de resistencia experimentadas se mantendrán por zonas indistintamente de la condición de carga a analizar.

En las representaciones gráficas los números de Froude analizados serán representados tal y como se muestra en la Tabla 46

Tabla 46 Números de Froude a estudiar Fuente Elaboración propia

1	Fr = 0.1034
2	Fr = 0.0944
3	Fr = 0.0845

A continuación, se muestran los resultados gráficos de los resultados obtenidos:

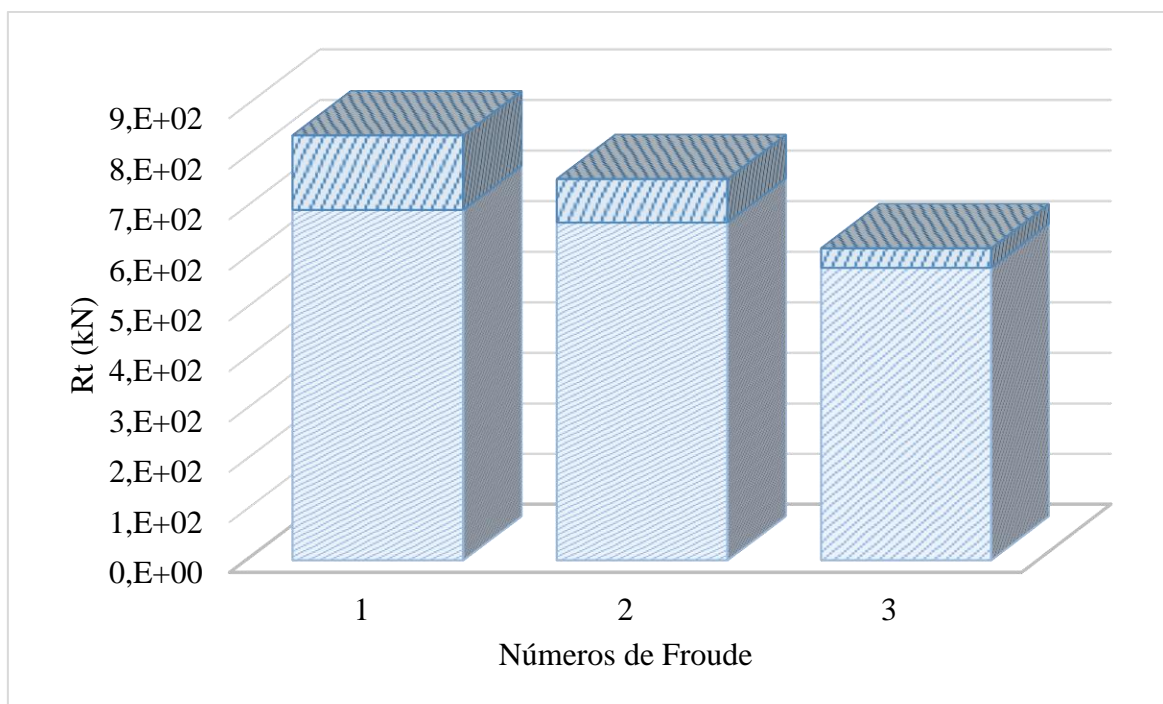


Figura 42 Resistencia total zona 1 Fuente: Elaboración propia

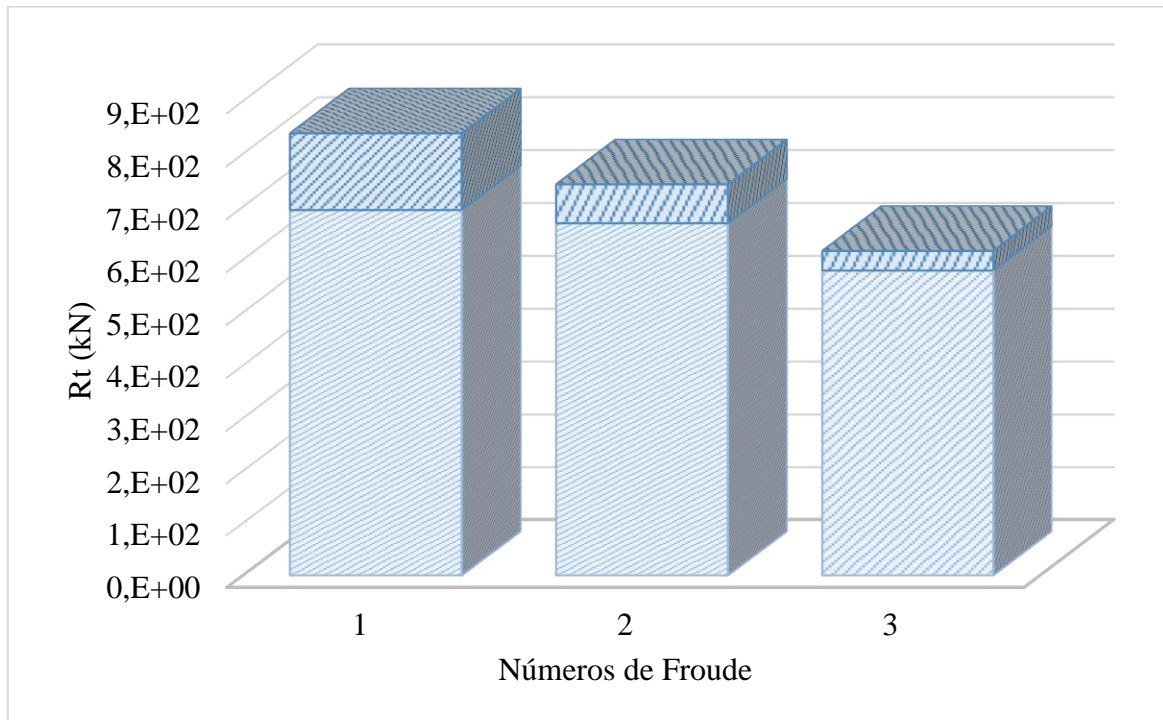


Figura 43 Resistencia total zona 2 Fuente: Elaboración propia

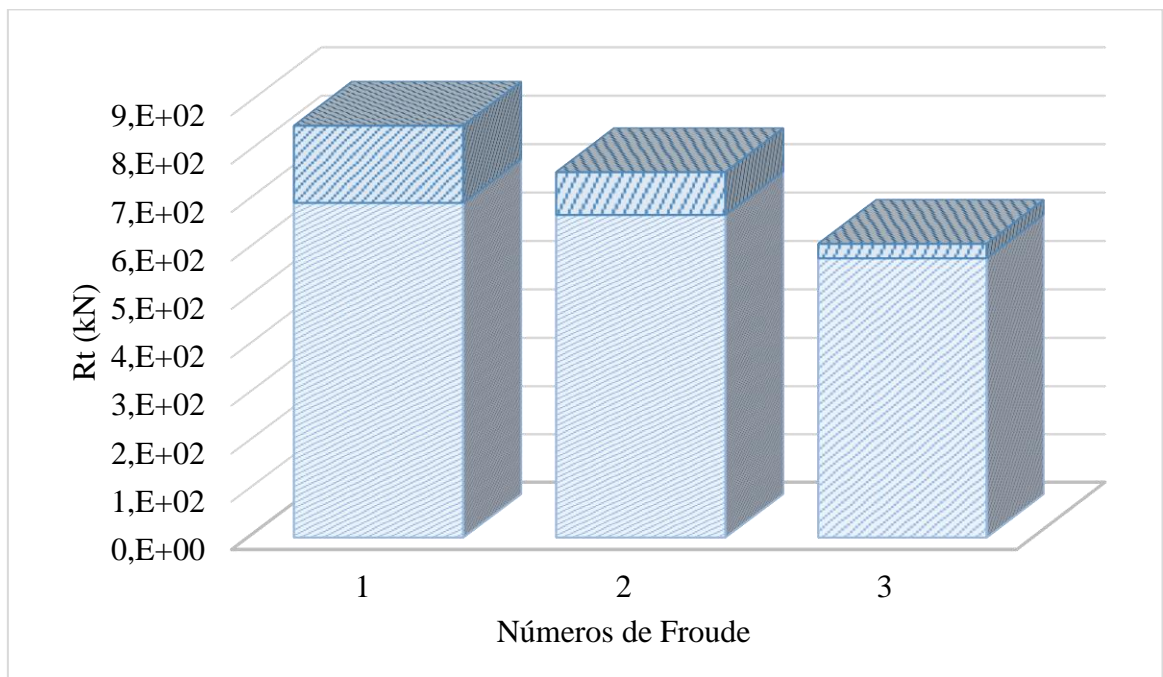


Figura 44 Resistencia total zona 3 Fuente: Elaboración propia

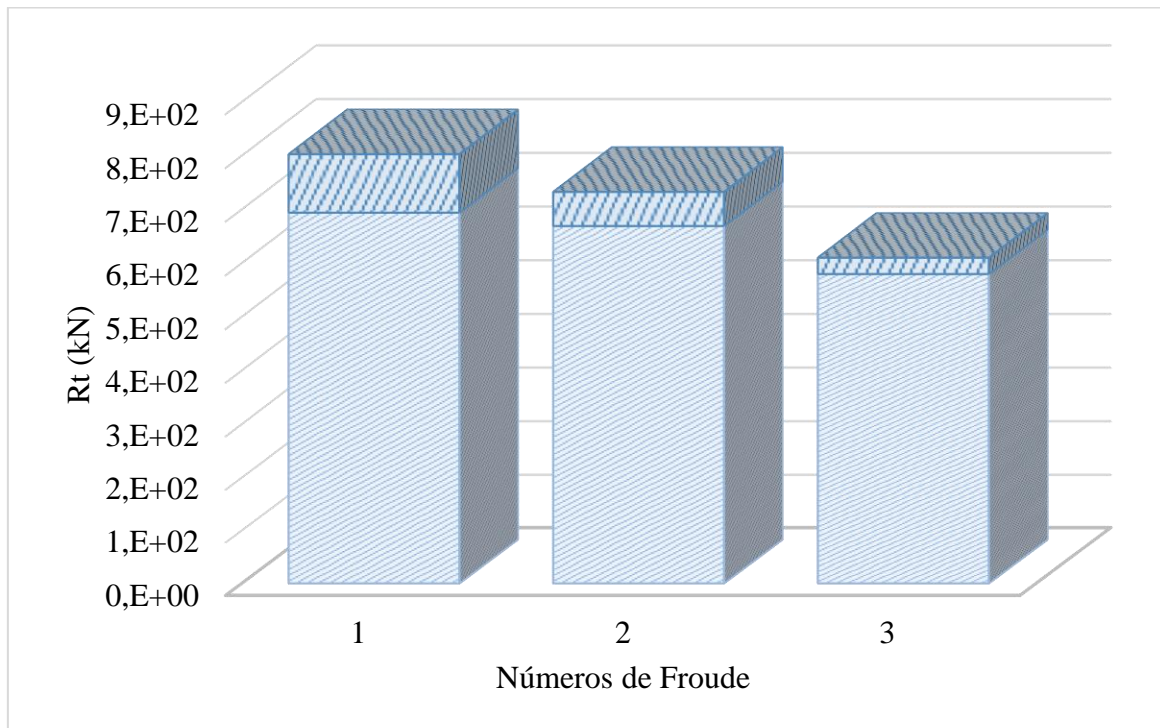


Figura 45 Resistencia total zona 4 Fuente: Elaboración propia

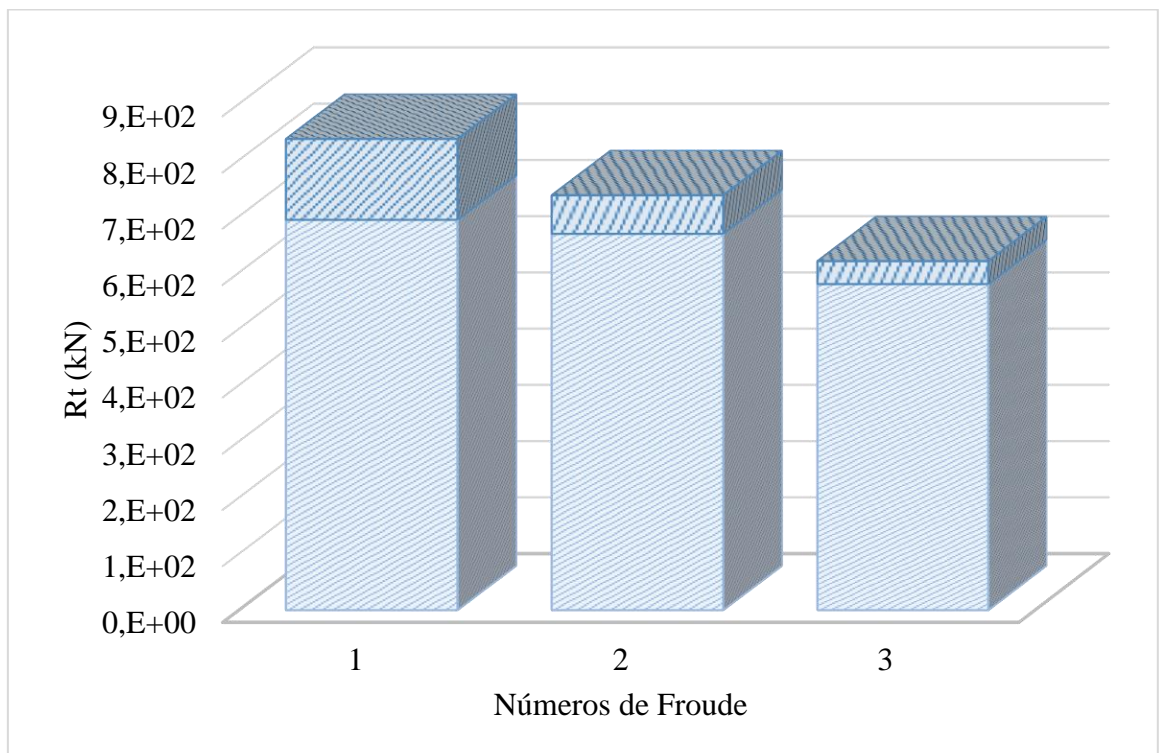


Figura 46 Resistencia total zona 5 Fuente: Elaboración propia

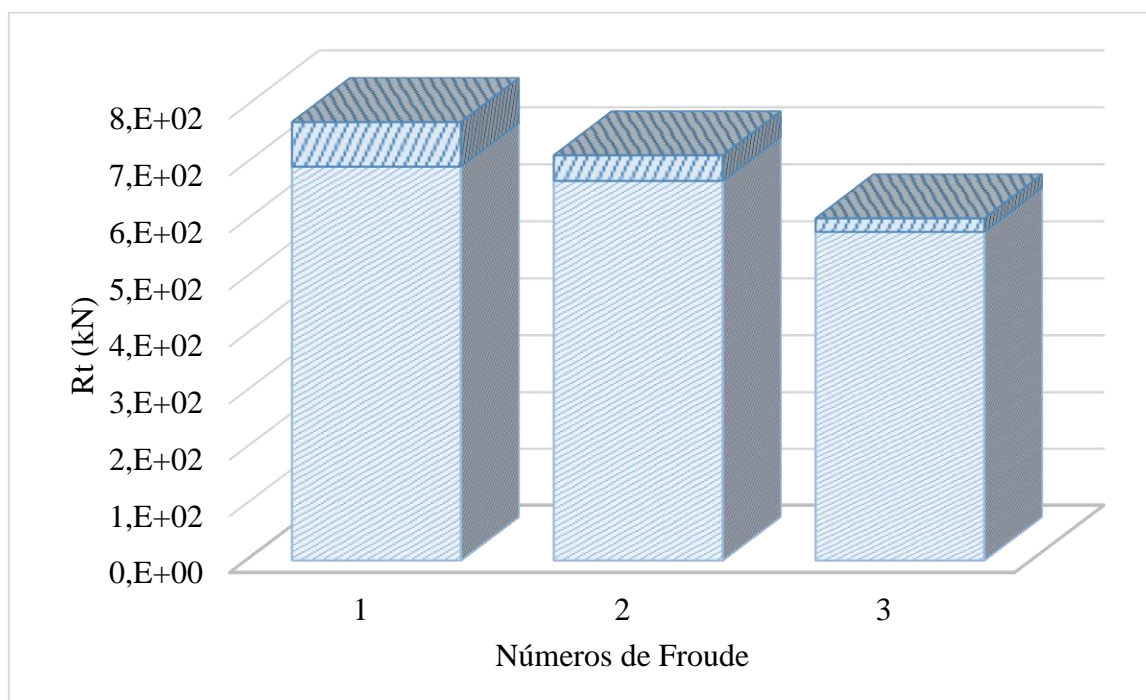


Figura 47 Resistencia total zona 50 Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 8

CÁLCULO DE

EMISIONES



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



8. Procedimiento de cálculo de las emisiones contaminantes del buque Ro-Ro

El objetivo principal de este apartado es la comparación de las emisiones, que se obtienen partiendo de la potencia teórica del buque calculada en sus estudios preliminares, y las emisiones con la potencia real demandada durante toda la ruta de navegación que realiza el buque. Las emisiones en ambos casos serán calculadas bajo las siguientes premisas: las horas de navegación, el consumo de combustible por kW de potencia, y los factores de emisión serán los mismos, variando únicamente la potencia a tener en cuenta en cada uno de los casos ya que una será fija durante toda la navegación (potencia teórica basada en los cálculos preliminares del buque), y la otra, será la potencia calculada para cada zona, mediante simulaciones.

Para por ello que se ha desglosado el tiempo total de navegación del buque en las 6 zonas por las que navega el buque obteniendo los parámetros de tiempo para cada zona mostrados en la Tabla 47:

Tabla 47 Horas de navegación por zonas Fuente: Elaboración propia

Zonas	Horas de navegación en cada zona
1	3
2	5,5
3	6
4	3
5	4,5
6	6

Una vez calculadas las emisiones del buque Ro-Ro se realizará una comparación de las emisiones con el transporte por carretera. Se seguirá el esquema de procedimiento mostrado en la Figura 51.

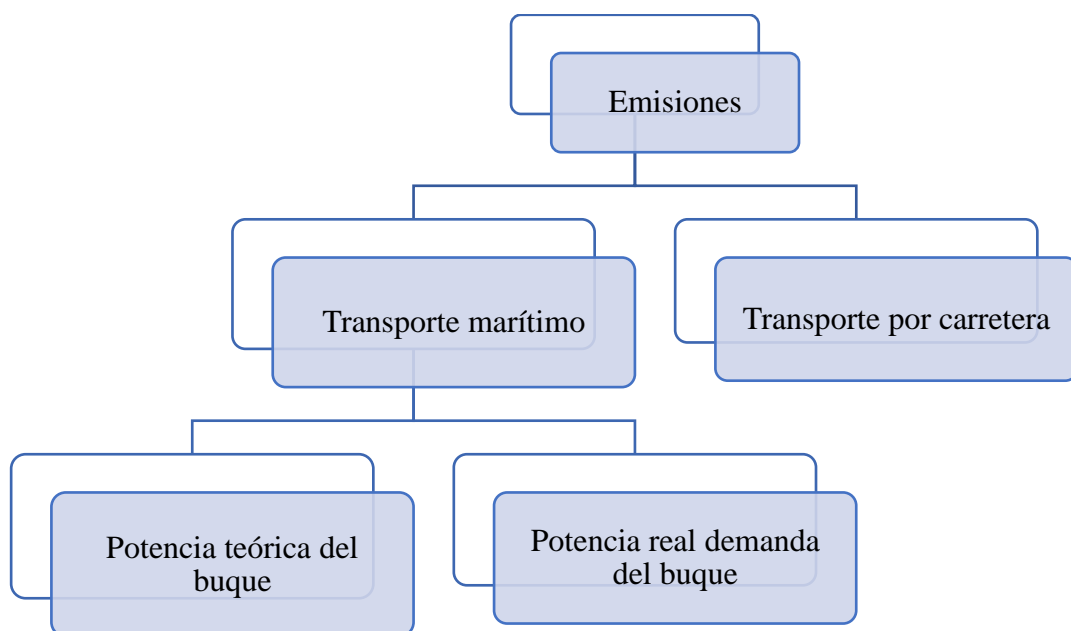


Figura 48 Esquema de cálculo de emisiones Fuente: Elaboración propia



8.1. Cálculo de emisiones del buque Ro-Ro

El cálculo de las emisiones a partir de a potencia demandada por el buque en cada zona de navegación, se realiza teniendo en cuenta diferentes factores que afectan a las mismas los cuales son:

- Potencia demandada por el buque (P),
- Consumo de combustible por el motor instalado (C),
- Factor de emisión por gas de exhaustación (f_e),
- Horas de navegación en cada área analizada (f_u).

La expresión de cálculo de emisiones (E) viene formulada como:

$$E (kg) = P (kW) \cdot C \left(\frac{kg}{kWh} \right) \cdot f_e \cdot f_u(h) \quad (73)$$

Dependiendo de las unidades en las que se quiera obtener las emisiones y referente a que se quieran obtener, la fórmula principal sufrirá una serie de modificaciones, en este trabajo se hará referencia a las emisiones en las siguientes unidades mostrado en la Tabla 48:

Tabla 48 Formulación de emisiones Fuente Elaboración propia

Resultado de Emisiones	Unidades	Expresión
R. E 1	Kg/horas	$E = P (kW) \cdot C \left(\frac{kg}{kWh} \right) \cdot f_e$
R. E. 2	Kg/nm	$E = \frac{\left(P (kW) \cdot C \left(\frac{kg}{kWh} \right) \cdot f_e \right)}{V(nudos)}$
R. E. 3	g·nm/UTI	$E = \left(\frac{P (kW) \cdot C \left(\frac{kg}{kWh} \right) \cdot f_e}{V(nudos)} \right) \cdot \frac{1000}{N_{UTI}}$
R. E. 4	T	$E = \frac{P (kW) \cdot C \left(\frac{kg}{kWh} \right) \cdot f_e \cdot f_u(h)}{1000}$

Siendo, P la potencia real demandada por el buque en (kW), C el consumo de combustible del buque en (kg/kWh), f_e son los factores de emisión para cada agente contaminante a estudiar, V es la velocidad del buque en nudos y f_u es el factor de uso que son las horas de navegación en horas.

Se calcula únicamente las emisiones durante la navegación del buque debido a que son éstas las que se han podido calcular en base a la potencia calculada anteriormente, a estas emisiones se le debería sumar las emisiones en puerto y en maniobras, no obstante, en este estudio solo se analizan las emisiones durante la navegación, debido a que es donde mayores emisiones se produce.

Para el factor de emisión de cada agente contaminante se deberá especificar qué tipo de motor se está usando, y si éste tiene alguna tecnología para la limpieza de los gases de escape. Se podrá calcular el factor de emisión para diferentes tipos de combustibles, estos son Fuel oil pesado (HFO), Diésel marino (MDO), y gas natural licuado (LNG). Además,



se contempla el uso de alguno de éstos combustibles al mismo tiempo que una tecnología de limpieza de los gases de escape

Se debe tener en cuenta que el consumo será diferente en el uso de un combustible u otro, es por ello que es importante cambiar los valores de los mismos.

En la hoja de cálculo adjunta denominada “*Cálculo de emisiones de un buque Ro-Ro*” se contempla automáticamente los cambios de los factores de emisión a partir de los cambios de combustible, no obstante, los consumos dependerán del motor a usar, por lo tanto, como es particular para cada buque se deberá introducir al igual que el resto de características específicas de cada buque, como pueden ser sus dimensiones o potencia requerida.

El procedimiento que se sigue para el cálculo de las emisiones es el mostrado en la Tabla 49.

Tabla 49 Procedimiento de cálculo de emisiones Fuente: Elaboración propia

Cálculo de emisiones	1. Dimensiones del buque	Potencia y consumos dependiendo del motor Tecnología y tipo de motor.
	2. Factores de emisión	Valor de las emisiones dependiendo del tipo de tecnología a usar
	3. Emisiones emitidas por el buque en estudio	

8.1.1. Dimensiones y características propulsivas del buque

Para el cálculo de las emisiones se debe establecer las características del buque a estudiar tanto dimensionales como propulsivas, los parámetros a definir son los mostrados en la Tabla 50.

Tabla 50 Datos del buque Fuente: Elaboración propia

Datos del buque	Unidades	
Capacidad de carga RO-RO	UTI	2100
Alargamiento en porcentaje	%	0
Eslora entre perpendiculares (L _{pp})	m	170,18
Eslora en línea de flotación incl. proa de bulbo (= 1,01 L _{pp})	m	171,88
Eslora total	m	180,60
Manga mld.	m	22,90
Puntal	m	14,14
Calado de diseño	m	6,18
Calado máximo	m	6,18
Calado máximo - calado de diseño	m	0,00



Datos del buque	Unidades	
Peso muerto de diseño/Máximo peso muerto	%	26
Peso muerto de diseño	t	7500
Peso muerto máximo	t	28665
Peso muerto/UTI máximo	t/UTI	13,65
Peso en rosca	t	7418
Desplazamiento en el calado de diseño	t	14918
Desplazamiento con calado máximo	t	36083
Velocidad de servicio en el calado de diseño	nudos	18,0
Número de Froude a velocidad de servicio	-	0,225
TIPO DE MOTOR Y TECNOLOGÍA		
Tipo de motor principal (velocidad lenta = 1, velocidad media = 2)	(-)	2
Clasificación de servicio del motor principal (sólo para motores sin reducción de potencia)	pct. MCR	100
Tipo de combustible (HFO = 1, MD/GO = 2, LNG = 3, Dual fuel = 4)	-	1
Contenido de azufre en el combustible pesado (HFO)	pct.	1,0
Contenido de azufre en el gasóleo o gasóleo (DO/GO)	pct.	0,1
Motor principal de 2 tiempos con reducción de potencia (NO = 0, SÍ = 1)	-	1
¿Motor principal optimizado para el combustible? (NO = 0, SÍ = 1)	-	0
Motor TIER 1, 2 o 3 (1 - 3)	-	2
Especificar la tecnología de reducción de NOx: EGR (Recirculación de gases de escape) = 1, SCR (Reducción catalítica selectiva) = 2, Otra tecnología = 3.	-	1
Uso de lavadores de gases si se utiliza aceite (NO = 0, SÍ=1)	-	0
ESTADO REAL		
Carga útil/peso muerto en el calado de diseño	%	67,6
Utilización de la capacidad (100 % ~ condición de diseño)	%	100
Peso muerto real	t	7500
Carga útil real	t	5068
Desplazamiento real	t	14918
Velocidad de servicio con calado real	Nudos	18,00
Exponente de dependencia de la velocidad n (Potencia a velocidad n constante)	-	4,8
Potencia del motor en estado real	kW	
Consumo de combustible por hora (motores auxiliares)	t/h	0,1
Consumo de combustible por hora (motor principal)	t/h	2,0
Consumo de combustible por hora (motores principales y auxiliares)	t/h	2,1



Es importante definir el tipo de motor del buque, así como la tecnología adicional que este tiene para la reducción de emisiones, ya que será esto lo que defina el factor de emisión.

El buque se estudiará en su estado real, el cual consume un fuel oil pesado y aunque está preparado para la instalación de un Scrubber éste no está instalado, por lo tanto, no usa tecnología adicional para la reducción de emisiones. Como actualmente no navega por áreas con emisiones restringidas, únicamente se le exige que reduzca sus emisiones al entrar a algún puerto de la Unión Europea, éste usa MDO para entrar a estos puertos como medida de reducción de emisiones, no obstante, durante su navegación no tiene límite de emisiones de gases contaminantes.

8.1.2. Factores de emisión

Para el correcto cálculo de las emisiones es necesario saber cuánto se emite de cada agente contaminante por kW de potencia consumida, para ello se tendrá en cuenta que combustible se está utilizando, las características del motor y todas aquellas tecnologías que pueden disminuir el nivel de emisión. Teniendo en cuenta las características del buque en estudio mostradas en la primera parte de la Tabla 51 se obtienen los factores de emisión mostrados a continuación de la misma tabla.

Tabla 51 Tecnología y factores de emisión

Tecnologías de reducción de motores y emisiones	Motores principales
Tipo de motor principal (2 tiempos = 1, 4 tiempos = 2)	2
Motor principal reducido - sólo para motores de 2 tiempos (NO = 0, SÍ = 1)	0
Combustible para el motor principal (HFO = 1, MDO/GO = 2, LNG = 3 (sólo para 4 tiempos), Dual fuel = 4)	1
Motor principal optimizado para el combustible (0 = NO, 1 = SÍ)	0
Motor TIER 1, 2 ó 3 (Si se selecciona la tecnología de reducción de NOx individual, pulse 0)	2
Especificar la tecnología de reducción de NOx: EGR (Recirculación de gases de escape) = 1, SCR (Reducción catalítica selectiva) = 2 Otra tecnología = 3	1
Contenido de azufre en % en el fuel pesado (HFO)	1
Contenido de azufre en % en diesel/gasóleo (DO/GO)	0,1
Uso de lavadores (NO = 0, YES=1)	0
Factores de emisión	
Consumo de combustible (kg/kW/hora)	0,176
Emisión de CO ₂ (g/kW/hora)	552
Emisión de NO _x (g/kW/hora)	13,6
Emisión de CO (g/kW/hora)	0,35
Emisión de HC (g/kW/hora)	0,50
Partículas (g/kW/hora)	0,44
Contenido de S en aceite (pct.)	1,0
Emisión de SO ₂ (g/kW·hora)	3,69



Emisión de CO ₂ (g/kg de combustible)	3144
Emisión de NO _x (g/kg de combustible)	77,4
Emisión de CO (g/kg de combustible)	1,99
Emisión de HC (g/kg de combustible)	2,85
Partículas (g/kg de combustible)	2,53
Emisión de SO ₂ (g/kg de combustible)	21,0
Valor calorífico (MJ/kg de combustible)	40,5
Valor calorífico (MJ/kg de aceite)	40,5
Valor calorífico (MJ/kg GNL)	50,0
Cambio de SFOC debido a que el tipo de motor (pct.) se redujo en comparación con el motor normal	-4,0
Demanda de energía adicional debido al lavador (pct.)	0,0
Demanda de energía adicional debido a la tecnología de reducción de NO _x EGR (pct.)	2,0
Cambio total de SFOC (pct.)	-2,0
Reducción de NO _x en comparación con el Nivel 1 (pct.)	20
Reducción de partículas (pct.)	0
Reducción de SO ₂ (pct.)	0
Combustible dual	
Gasoil (combustible para pilotos) en pct.	6
Gas en pct.	94

Además de tener en cuenta la tecnología empleada para la definición de los factores de emisión, se tiene en cuenta el consumo de combustible y el valor calorífico de los mismos ya que su consumo dependerá de este. Los valores de los factores de emisión han sido extraídos de los estudios realizados por la Danmarks Tekniske Universitet (DTU) (Universitet, 2016).

8.1.3. Emisiones del buque en estudio

Las emisiones teniendo en cuenta únicamente la potencia instalada por el buque, sin variación durante la navegación son las que se muestran en la Tabla 52, aquí se observa que se parte de una potencia teórica fija que supone en consumo por kWh y unas horas de navegación fijas, con esto se está representando que el buque emite lo mismo durante todo el periodo de navegación, actualmente es de ésta manera en la que se calculan las emisiones anuales del buque, teniendo en cuenta la frecuencia de su ruta. Para obtener las emisiones reales del buque a las calculadas se les debe añadir las emisiones en puerto y maniobras.



Tabla 52 Emisiones a partir de la potencia instalada Fuente: Elaboración propia

Datos del buque		
Potencia teórica (Kw)	10305	kW
Consumo	0,173	kg/kWh
Horas de navegación	28	h
Factores de emisión		
F.E. CO ₂	552	(kg/kW/hora)
F.E. SO _x	3,69	(kg/kW/hora)
F.E. NO _x	13,6	(kg/kW/hora)
F.E. PM _x	0,44	(kg/kW/hora)
Resultados		
Emisiones de CO ₂	27.566.556,3	kg
Emisiones de SO _x	184.127,76	kg
Emisiones de NO _x	678.876,91	kg
Emisiones de PM _x	22.163,33	kg

Sin embargo, el buque no demanda la misma potencia durante todo su periodo de navegación tal y como se mostró en el capítulo 7. Tomando los resultados de la potencia demandada en cada zona de navegación, y el tiempo en el que el buque pasa en esta, se obtienen las emisiones de manera más próxima a la realidad, ya que se elimina la suposición de que el buque demanda la misma potencia. Estos resultados son lo que se muestran en la Tabla 53.

Tabla 53 Emisiones de navegación carena 1 Fuente: Elaboración propia

Condición 1	Fr 1	Fr 2	Fr 3
	0,1034	0,0944	0,0845
Emisiones de CO ₂ (kg)	29.610.145,5	22.142.704,1	14.661.041,7
Emisiones de SO _x (kg)	197.777,7	147.899,7	97.926,8
Emisiones de NO _x (kg)	729.204,0	545.304,6	361.055,0
Emisiones de PM _x (kg)	23.806,4	17.802,6	11.787,4

A simple vista se contempla que las emisiones son ligeramente mayores que las calculadas en la Tabla 52, las emisiones del buque para cada contaminante y velocidad del buque representado mediante el número de Froude se muestra en las Figuras 52-55.

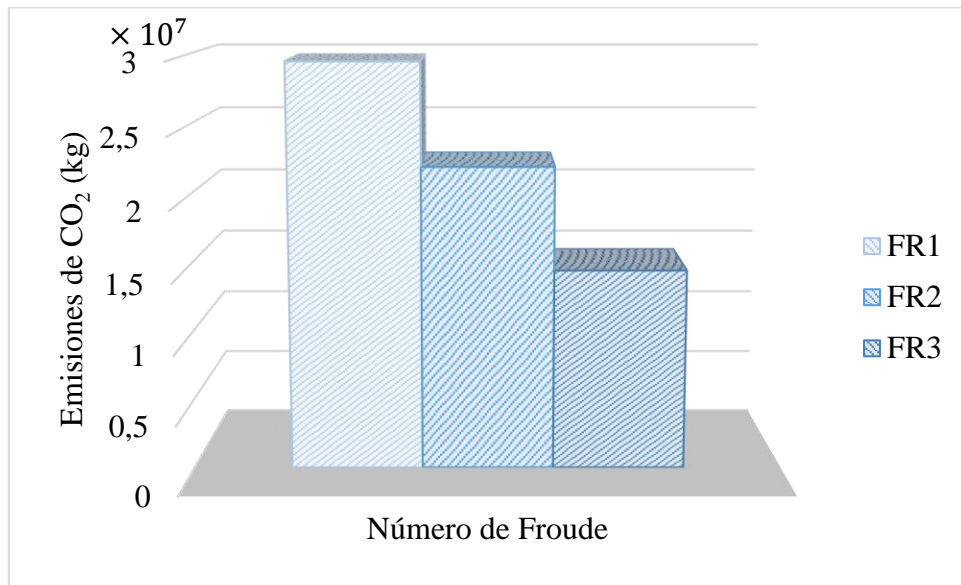


Figura 49 Emisiones de CO₂ Fuente Elaboración propia

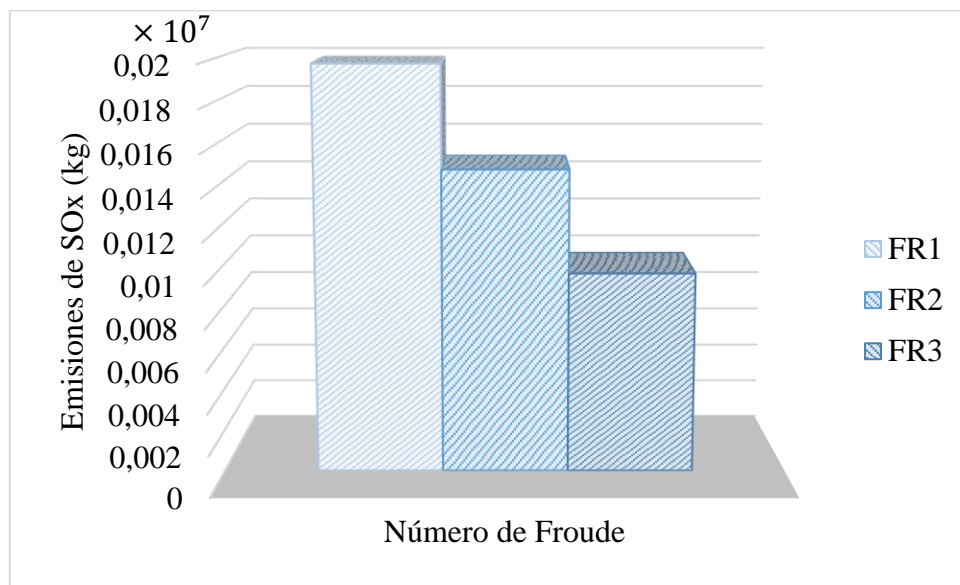


Figura 50 Emisiones de SO_x Fuente Elaboración propia

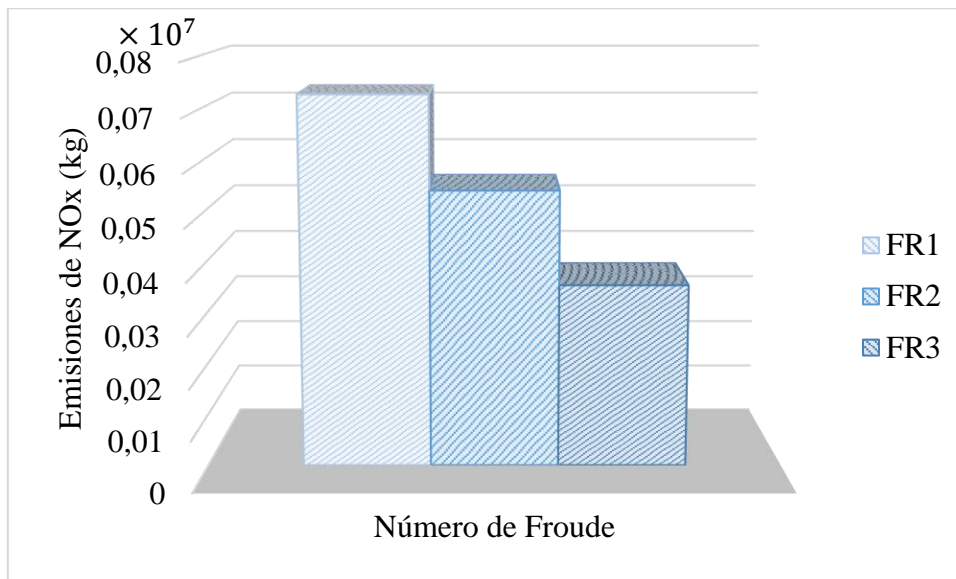


Figura 51 Emisiones de NOx Fuente Elaboración propia

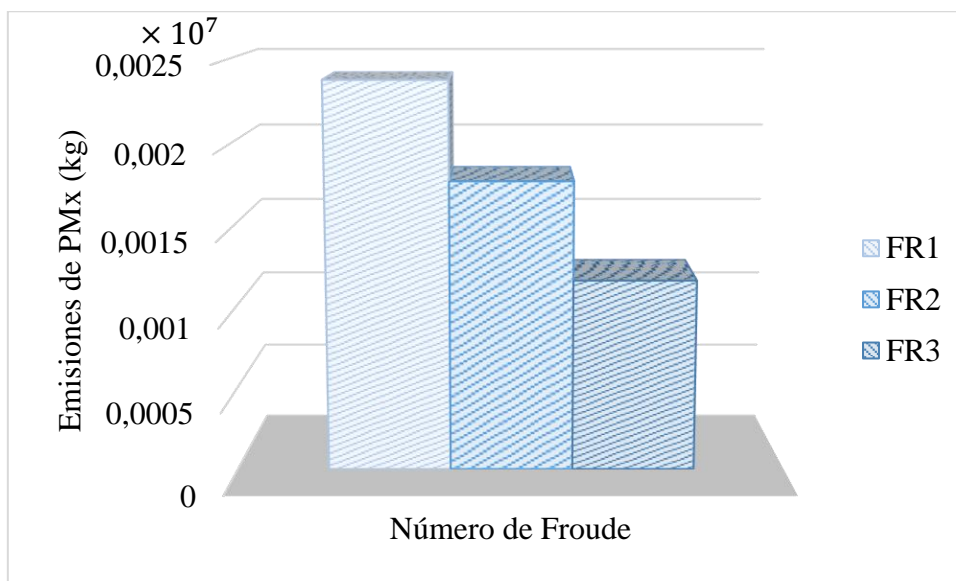


Figura 52 Emisiones de PMx Fuente Elaboración propia

Para validar los resultados obtenidos en la condición 1 se realizan las emisiones en la condición 2 las cuales se muestran en la Tabla 54, esto facilitará su posterior comparación;

Tabla 54 Emisiones carena 2 Fuente: Elaboración propia

Condición 2	Fr1	Fr2	Fr3
	0,1034	0,0944	0,0845
Emisiones de CO ₂ (kg)	27.287.167,7	18.963.302,9	12.767.219,3
Emisiones de SO _x (kg)	182.261,6	126.663,3	85.277,2
Emisiones de NO _x (kg)	671.996,5	467.006,0	314.416,1
Emisiones de PM _x (kg)	21.938,7	15.246,4	10.264,8

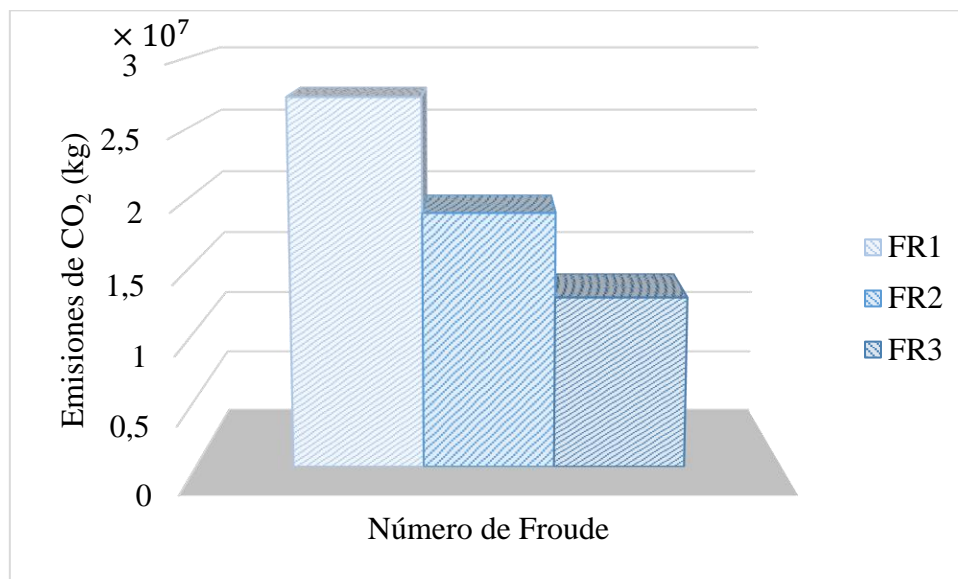


Figura 53 Emisiones de CO₂ condición 2 Fuente Elaboración propia

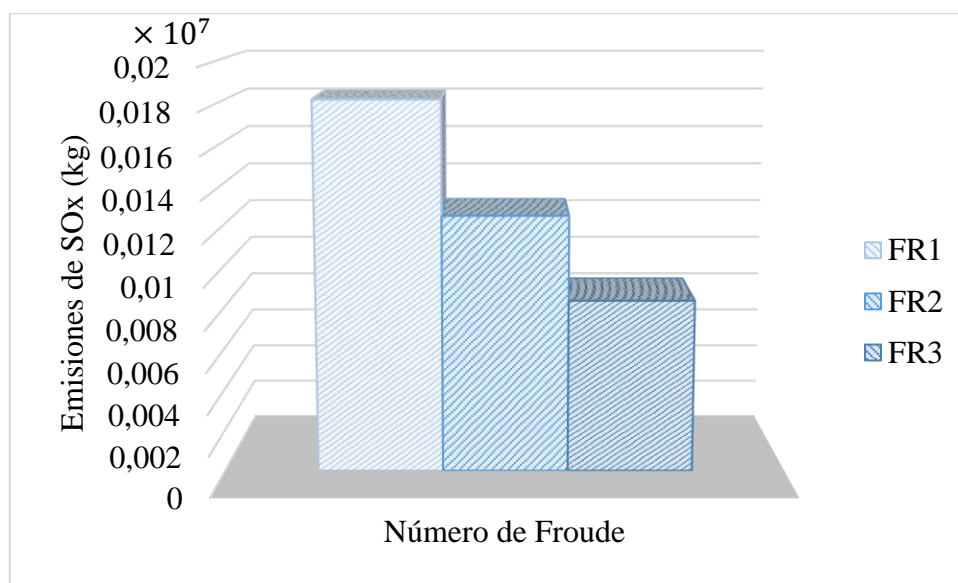


Figura 54 Emisiones de SO_x condición 2 Fuente Elaboración propia

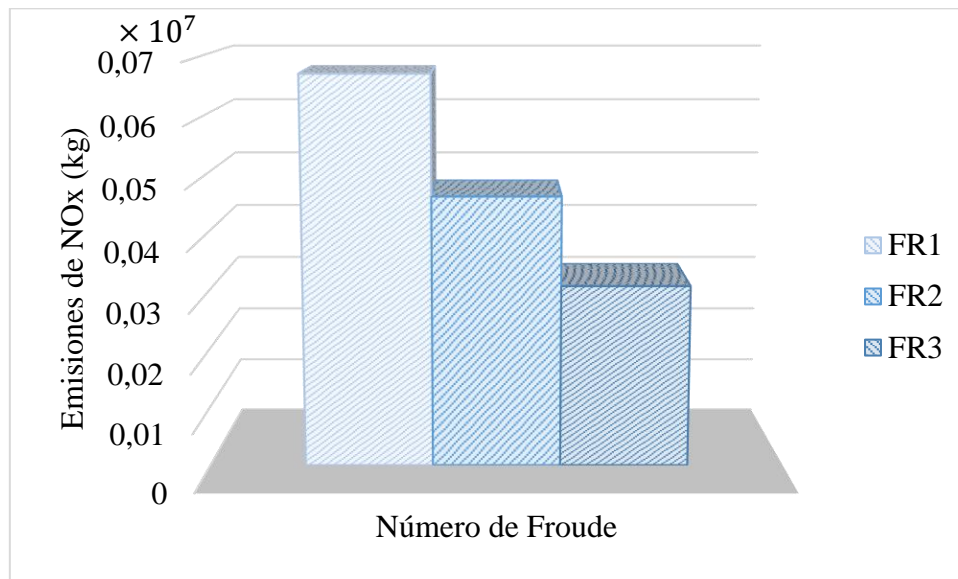


Figura 55 Emisiones de NOx condición 2 Fuente Elaboración propia

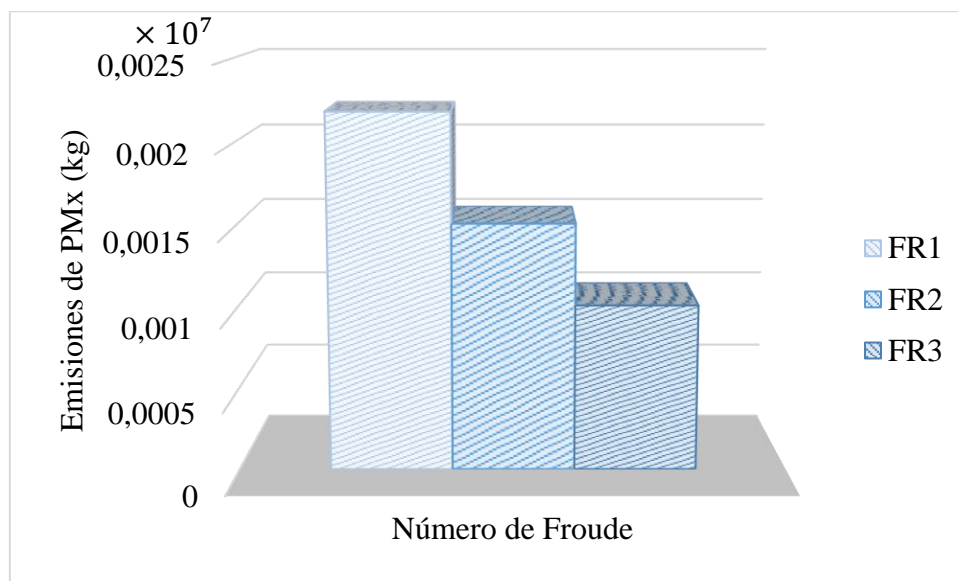


Figura 56 Emisiones de PMx condición 2 Fuente Elaboración propia



8.1.4. Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos mediante la potencia real demandada en navegación con la potencia teórica se obtienen los resultados de la Tabla XX

Tabla 55 Comparación de las emisiones Fuente: Elaboración propia

	P. Teórica	P. Condición 1	P. Condición 2
Emisiones de CO ₂	27.566.556,3	29.610.145,5	27.287.167,7
Emisiones de SO _x	184.127,8	197.777,7	182.261,6
Emisiones de NO _x	678.876,9	729.204,0	671.996,5
Emisiones de PM _x	22.163,3	23.806,4	21.938,7

Para llevar a cabo una comparación más visual se representan los datos mostrados en la Tabla 55, gráficamente donde las emisiones partiendo de la potencia teórica se representa mediante el número 1, las emisiones de la potencia calculada para la condición de carga 1 se representa con el número 2 y para la condición de carga 2 se representa con el número 3. Obteniendo lo mostrado en la Figura 60.

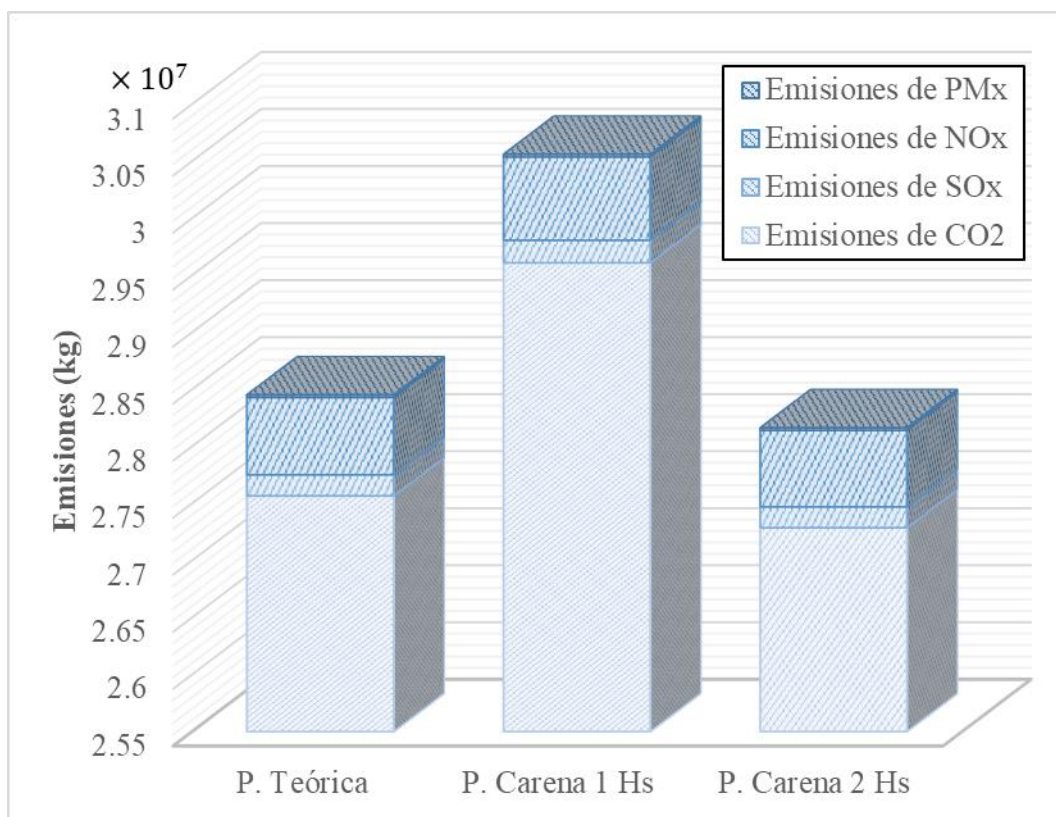


Figura 57 Emisiones contaminantes Fuente Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se puede concluir que las emisiones calculadas a partir de la potencia demandada por el buque en cada zona de navegación es un 10 % superior a las emisiones calculadas con la potencia teórica dada en los estudios preliminares del buque. Esto lleva a pensar que los resultados donde solo se contempla la potencia teórica y no la variación de esta debida a las condiciones ambientales dan como resultado un valor optimista de las emisiones contaminantes, desvirtuando de esta manera los resultados



generales. Por lo tanto, para poder dimensionar adecuadamente el cómputo global de las emisiones contaminantes a la atmosfera de parte de los buques se debe tener en cuenta la navegación de los mismos.

Las emisiones calculadas basadas en la potencia teórica de los estudios preliminares del buque, toma como parámetros iniciales que el motor está al 85% de su MCR (Maximum Continuum Rating) y a una velocidad de 18 nudos, por lo tanto, fue comparado con los resultados de las emisiones evaluadas a esa misma velocidad y condición de carga (mismo desplazamiento y calado).

No obstante, en el primer caso se toma que el buque navega a una potencia media de 10304kW durante las 28 horas de navegación , mientras que en el segundo caso, las emisiones son calculadas mediante la potencia demandada en cada zona de navegación por su tiempo de uso (horas que pasa el buque en esa zona de navegación), a continuación, en la Figuras 61 y 62, se mostrará el mapa de boyas que se tomó para la discretización de la ruta con un código de colores desde un rojo oscuro a un amarillo claro (descendente) que muestra las zonas donde se produce mayor emisión y menor emisión respectivamente.



Figura 58 Boyas y emisiones Fuente: Elaboración propia



Figura 59 Boyas y emisiones II Fuente: Elaboración propia

A consecuencia de los resultados obtenidos, se debe plantear alternativas para la reducción de estas emisiones; éstas podrán ser el cambio de combustible a uno más refinado o, añadir un sistema de limpieza de gases de escape.



8.1.5. Comparación de las emisiones del transporte marítimo y el transporte por carretera

Con el objetivo de comparar el transporte marítimo con el transporte por carretera en términos de emisiones, se realizará un estudio de las emisiones que se producen en el transporte de mercancías por carretera. Para ello se calculará las emisiones que supondría el traslado de la misma carga que transporta el buque en estudio por carretera.

Antes de comenzar dicho estudio, se comentará brevemente las ventajas e inconvenientes que presenta este tipo de transporte frente al transporte marítimo,

Entre las principales ventajas del transporte por carretera es que es uno de los transportes más baratos debido a que no se necesitan infraestructuras suplementarias para efectuar el transporte, únicamente se requiere del propio vehículo, esto supone una disminución de los costes. Un transporte versátil ya que permite trasladar todo tipo de materiales, incluso aquellas mercancías más peligrosas. Además, permite acceder muy cómodamente a las instalaciones o a su destinatario. Por tanto, es mucho más cómodo y permite una entrega más segura. Actualmente, la red de carreteras ha crecido mucho, por lo que se facilita el transporte y la llegada más rápida de la mercancía. Cuenta con una gran flexibilidad horaria, se trata de un servicio bastante rápido, especialmente en cortas y medias distancias. La capacidad de respuesta, por tanto, también es mayor permitiendo un mejor servicio hacia los clientes. Para este tipo de transporte, no es necesario realizar un gran papeleo, facilitando de esta forma su contratación y servicio.

El transporte por carretera también tiene una serie de desventajas como es su incapacidad de trasladar grandes cantidades de unidades de transporte individuales, además cuando las distancias son muy elevadas son menos rápidos que otro tipo de transporte. Un gran inconveniente que presenta es que en muchas zonas existen una masiva cantidad de transporte por carretera, factor que afecta a las emisiones y a la rapidez de estos. Además, aunque con los años las muertes en carreteras se han ido disminuyendo gracias a las diferentes políticas de seguridad en las mismas, sigue existiendo un alto riesgo de siniestralidad de toneladas por kilómetro.

La nueva denominación que podría llevar al mar Mediterráneo a convertirse en el año 2020 en un área de control de emisiones, podría desencadenar que el transporte marítimo vea su carga trasladada al transporte por carretera, este transporte complementario no es una solución en términos medioambientales, ya que por unidad de carga el transporte por carretera tiene mayores niveles de emisión que el transporte marítimo debido a los efectos de escala.

El transporte por carretera se enfrenta a altas emisiones de CO₂ principalmente, para realizar la misma ruta que realiza el buque Ro-Ro en estudio, se deben recorrer 861 Km desde Barcelona a Génova y luego 196 Km desde Génova a Livorno, esto sin contar las desviaciones debido a las paradas que se deben producir para cumplir con la normativa del transporte por carretera, y que no se llevará a cabo a una velocidad constante debido a los límites de velocidad que se deben cumplir.

Según la normativa europea del transporte por carretera, recogida en el Reglamento CE 561/2006, los tiempos de conducción, periodos de descanso y pausas deben ser los siguientes;



Los tiempos de conducción diaria son hasta 9 horas ampliables a 10 horas mientras no se realice más de dos veces por semana, semanalmente se pueden realizar hasta 56 horas considerando la semana desde las 0:00 horas del lunes a las 24:00 horas del domingo. La conducción durante dos semanas consecutivas es de hasta 90 horas.

Los periodos de descanso tras un periodo de conducción continuada de 4 horas y 30 minutos el conductor deberá hacer una pausa ininterrumpida de al menos 45 minutos. Siendo posible sustituir la pausa ininterrumpida de 45 minutos si se fracciona en dos periodos. La primera pausa deberá ser de al menos 15 minutos y la segunda, de 30 minutos, siempre en este orden y siempre intercaladas dentro del periodo de conducción continuado de 4,5 horas.

Además, se deben tener una serie de pausas obligatorias, estas deben de ser de 11 horas de descansos diarios que deben realizarse dentro de las 24 horas después de haber realizado el anterior periodo de descanso. Éstos se pueden fraccionar en dos periodos de 3 y 9 horas, siempre en ese orden. Se podría tener un periodo de pausa reduce el cual debe ser mayor de 9 horas, pero inferior a 11 horas. En una semana no es posible tomarse más de tres periodos de descanso reducidos. En una semana normal, se toman 45 horas, después de un máximo de seis jornadas de 24 horas, que empiezan a contar al inicio de cualquier actividad (no solo conducción) diferente a descanso, tras un periodo de descanso semanal y si se toma un descanso semanal reducido este debe tener un período mínimo de 24 horas, pero menos de 45 horas. Los periodos semanales reducidos se compensarán con un descanso equivalente (hasta completar las 45 horas) tomado en una sola vez antes de que finalice la tercera semana y unidas siempre a otro período de descanso de al menos 9 horas.

En el transcurso de dos semanas consecutivas, el conductor deberá tomar al menos dos períodos de descanso semanal normal o un período de descanso semanal normal y un período de descanso semanal reducido de al menos 24 horas. No se pueden tomar dos descansos semanales reducidos seguidos.

Por lo tanto, siguiendo las premisas anteriores para la ruta Barcelona-Génova-Livorno se dispone de la siguiente distribución de conducción, descansos y paradas mostrados en la Tabla 56, siendo A: Barcelona, B: Génova y C: Livorno tal y como se muestra en la Figura 63:

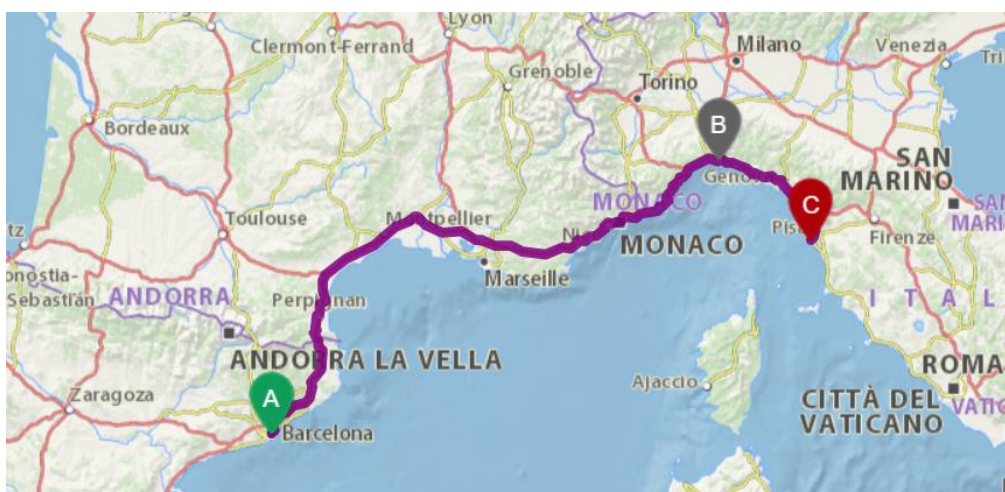


Figura 60 Ruta por carretera Fuente: Elaboración propia



Tabla 56 Desglose de ruta por carretera Fuente: Elaboración propia

Ruta por carretera Barcelona- Génova			
	T (h)	V (Km/h)	Distancia (Km)
Carga	2		0
Conducción	4	80	320
Pausa	0,75		320
Conducción	4	80	680
Descanso	11		680
Conducción	2,5	80	861
Descanso y Espera	11		861
Descarga	2		861
Carga	2		861
Total	39,25		861
Ruta por carretera Génova - Livorno			
	T (h)	V (Km/h)	Distancia (Km)
Carga	2		0
Conducción	3	80	196
Descanso y Espera	11		196
Descarga	2		196
Carga	2		196
Total	20		196

En términos de emisiones, se interpreta que si el consumo de fuel de un camión con características estándar es de 29,08l/100 km teniendo en cuenta que para realizar la primera parte de la ruta establecida se recorren 861 km se estaría consumiendo 250,37 l de fuel y para la segunda parte de la ruta se recorren 196 km consumiendo 56.99 l, se tiene que , el consumo total de fuel asciende a 307,37l. Teniendo en cuenta, que para el transporte de la carga por carretera el transporte destinado para ello pasa 15,15 horas en conducción se puede calcular las emisiones de un solo camión para una unidad de transporte individual de la siguiente manera:

$$\text{Consumo} \cdot \text{Factor de emisión} = \text{Total de emisiones} \quad (74)$$

Para el factor de emisión se debe tener en cuenta las siguientes premisas:

Tabla 57 Factores de emisión por combustible usado Fuente: Elaboración propia

Tipo de combustible	Valor	Unidades
Gasolina	2,196	Kg CO ₂ /l
Diésel	2,471	Kg CO ₂ /l

Para una unidad individual de transporte transportada por un camión éste emite dependiendo del combustible a usar:

Para el consumo de diésel:

$$307,3676 \text{ l} \cdot 2,471 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{l}} = 759,5053 \text{ Kg de CO}_2 \quad (75)$$



Para el consumo de gasolina:

$$307,3676 \text{ l} \cdot 2,196 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{l}} = 767,49792 \text{ Kg de CO}_2 \quad (76)$$

Teniendo en cuenta la capacidad de carga del buque en estudio es de 1400 metros lineales lo que equivale a 2100 unidades de transporte individual (UTI).

El transporte de la carga total del buque por carretera equivaldría a lo mostrado en la Tabla 58:

Tabla 58 Consumos de emisiones de CO₂ Fuente: Elaboración propia

	Kg de CO₂ por consumo	Total de Kg de CO₂ a la misma cantidad de carga que el buque Ro-Ro
C. Diésel	759,5053	24163661,1
C. Gasolina	767,4992	24417987

8.1.5.1. Comparaciones y análisis de los resultados

Comparando los resultados obtenidos mediante el cálculo de emisiones del buque Ro-Ro y las emisiones obtenidas por el transporte se obtienen los resultados de la Tabla 59.

Tabla 59 Comparación de las emisiones de CO₂ Fuente: Elaboración propia

	Kg de CO₂
Total Kg de CO ₂ del buque Ro-Ro	2,96x10 ⁷
C. Diésel	3,19x10 ⁷
C. Gasolina	3,22 x10 ⁷

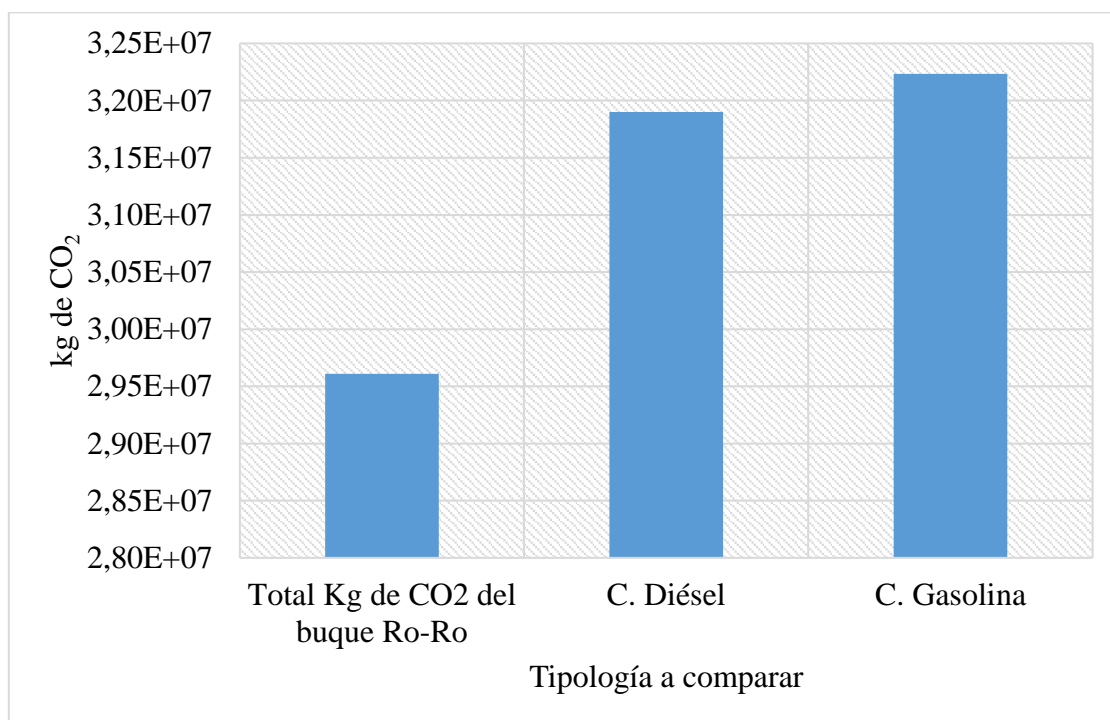


Figura 61 Comparación de emisiones CO₂ Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados se concluye que los efectos de escala favorecen de manera significativa a los buques Ro-Ro en cuanto a las emisiones de CO₂ se trata, debido a que para transportar la misma cantidad de UTI por carretera se debe realizar el mismo trayecto un número de veces mayor que si se realiza mediante buques, ya que no se puede desplazar la carga de manera masiva. Por lo tanto, en cuanto a tiempo y emisiones en esta ruta se demuestra que la ruta en régimen de transporte marítimo de corta distancia, el buque es mucho más respetuoso con el medio ambiente, a pesar que las tecnologías de reducción de emisiones viarias están más avanzado que las marítimas.

CAPÍTULO 9

SOLUCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



9. Soluciones para la reducción de emisiones

Los métodos para la reducción de emisiones en buques que se proponen para el estudio del buque llevados cabo son los siguientes:

- Cambiar el combustible usado en el buque el cual es *Heavy Fuel Oil* (HFO) a uno más ligero y que por ende contamina menos es el caso del *Marine Diesel Oil* (MDO).
- Usar el mismo combustible HFO, añadiéndole un *Scrubber* al buque como filtro de estas emisiones.
- Cambiar el motor del buque a un motor dual que pueda quemar Gas Natural Licuado (GNL) y *Marine Diesel Oil*.

9.1. Cambiar combustible de HFO a MDO

La primera alternativa en estudio es el cambio de combustible de un combustible menos refinado como es el HFO a un combustible refinado como es el MDO o MGO

Esta alternativa permite estudiar dos escenarios:

- El primero de ellos es quemar HFO durante la navegación cambiando a MDO a la llegada a puerto.
- El segundo es consumir durante la navegación y entrada a puerto MDO.

El Marine Diesel Oil (MDO) es un combustible destilado o carburante mixto. Se caracteriza por una buena calidad de ignición. Se distingue del HFO por valores, en general, más altos de viscosidad, la densidad y el contenido de azufre, así como también por unas tolerancias notablemente mayores. Es un combustible destinado a motores principales diesel que operan bajo condiciones de alta exigencia, para embarcaciones pequeñas y buques de guerra o plantas auxiliares de energía para buques mercantes.

El MDO es la única alternativa de las propuestas que supone “no hacer nada” en términos estructurales o de restructuración de algún equipo que el buque porte.

Se pasa de quemar un combustible con un alto contenido en azufre a un combustible destilado con un contenido en azufre con cifras cercanas al 0,5% S o 0,1% S. Dependiendo de las restricciones de la ruta se elegirá uno u otro ya que con 0,5% S podemos entrar en todos los puertos europeos, pero no navegar por zonas SECA o ECA es por ello que dependiendo de si navegamos continuamente o no por áreas de emisión controladas se usará uno u otro.

En una evaluación inicial esta alternativa supone la compra de un combustible más refinado y por ende más caro, no obstante, se debe someter al buque a determinados cambios en el sistema propulsivo, estos cambios no serán de un alto coste.

Uno de los riesgos del cambio de combustible de HFO al MDO es que, en su mayoría, los motores marinos han sido diseñados para consumir fuel, por lo que sus bombas podrían tener problemas en la succión de un producto como el gasóleo, que es menos viscoso. Por otro lado, podría haber riesgo de explosión por una mala operación como una purga incorrecta del combustible antes de la ignición. También podría causar formación de carbonilla en los quemadores. Una solución para prevenir esta acumulación de coque es la instalación de pantallas térmicas de protección.



Por último, el fuel tiene mejor lubricación que el gasóleo, por lo que se podría producir recalentamiento al consumir gasóleo. Se han reportado también numerosos incidentes de pérdida total de potencia en los inicios del año 2015, cuando comenzó el inicio del consumo de gasóleo en zonas ECA y numerosos buques no tomaron las medidas necesarias para cambiar de un consumo de fuel tradicional a destilados.

No obstante, se ha visto que en lugares de baja disponibilidad de este combustible empuja a que las refinerías inviertan en sistemas e instalaciones para producir mayores cantidades, aumentando el precio del combustible. Pero no son pocas las refinerías que, viendo la variabilidad en cuanto a normativa de emisiones, no se quieren arriesgar a invertir grandes sumas de dinero para poder ofrecer dichos combustibles. Por lo tanto, habrá que analizar la progresión a medio y largo plazo de la opción del uso de estos combustibles como medida para el cumplimiento de la normativa de reducción de emisiones de gases como el SO_x.

Sin embargo, la OMI ha puesto en cuestión la adopción del límite del 0.5% de contenido en azufre a nivel global del 2020. La entrada en vigor se ratificará o se prorrogará en función de un estudio que va a realizarse en relación a la disponibilidad de combustible que cumpla con la normativa, que será publicado durante el año 2018. Al ser el combustible más caro esto se ve repercutido en el precio del flete.

Las ventajas del MDO como método para la reducción de emisiones son las siguientes:

- No se requiere una inversión inicial importante.
- Desaparece la necesidad de un tratamiento previo del combustible, algo que sí requiere el *heavy fuel oil*.
- Es una de las alternativas que más reduce las emisiones de SO_x. En concreto, las reducciones estimadas de emisiones SO_x son de un 70% - 80%.
- Por el mayor poder calorífico del gasóleo frente al HFO, el consumo se reduce frente a aquel, en torno a un 5%.
- Se disminuye el volumen de generación de residuos a bordo procedentes del heavy fuel oil.
- Disminuye el mantenimiento en general.

Retos y desventajas del MDO:

- El precio del MDO es entre 200 y 300 €/Tn más caro que el HFO.
- Se desconoce si va a existir disponibilidad suficiente de MDO en las refinerías.
- Un aumento de demanda de este producto, provocará un aumento de precio si no se aumenta su producción. Esto produce que siga aumentando la diferencia de precios del MDO frente al HFO.

En el buque en estudio se debe seguir el siguiente procedimiento para adaptarse a la normativa SECA o ECA; primero se llevará a cabo el procedimiento del cambio de un combustible a otro.

La capacidad total del sistema de combustible desde las válvulas de aspiración de los tanques de diario HFO y MDO es de unos 0,648 m³.

Antes de proceder al cambio de combustible, los documentos técnicos aconsejan tener los siguientes niveles de los tanques de la siguiente manera:

- Tanque de MDO de la caldera lleno al 95%.



- Tanques de MDO de los MM.AA. llenos al 85%.
- Tanque almacén de MDO lleno al 90%.
- Tanque de diario de MDO lleno.

Al comienzo del cambio el enfriador de MDO debe mantenerse cerrado abriéndose el by-pass y así se deja circular el combustible sin intercambio de temperatura.

Posteriormente se deberá abrir la válvula de alimentación del tanque diario de MDO y cerrar la válvula del tanque de HFO.

Antes de abrir la entrada al paso del MDO se abrirá las válvulas de entrada y salida de agua salada, luego será cuando se vaya abriendo el paso de MDO.

A continuación, debe ponerse la depuradora de MDO en funcionamiento alimentando al tanque de diario de MDO. Se cambiará el filtro automático al manual del módulo de combustible, para evitar con los disparos de auto-limpieza que se llene el tanque de reboses de HFO con MDO.

Posteriormente se abrirán los calentadores para eliminar los restos de HFO, así como los filtros dúplex.



9.2. Uso de HFO con Scrubber

El Anexo VI del convenio MARPOL permite el uso de combustibles con alto contenido en azufre si los gases de exhaustación tienen un contenido de azufre equivalente al de haber consumido un combustible con el contenido de azufre establecido en la norma.

Para reducir el contenido de azufre en los gases de exhaustación, se usan unos filtros de limpieza de los gases de escape llamado *Scrubber*.

Esta tecnología usada normalmente en tierra se basa en tener un fluido que sea capaz de absorber SO_x y neutralizar los residuos que están en contacto con los gases de escape. El SO_2 que se absorbe reacciona con el material alcalino en el líquido, formando SO_4 . El azufre que contenía el producto sale del Scrubber con los demás residuos y los gases de escape desulfurados a través de la chimenea. Los residuos, o también conocidos como lodos, se almacenan a bordo para ser entregados a una instalación receptora en tierra.

Según la configuración del buque se realiza un diseño particular para cada motor principal o auxiliar, de los sistemas de limpieza de los gases de escape (LGE en adelante – también conocido como EGCS – Exhaust Gas Cleaning System). Por las restricciones del espacio y los costes se han ido desarrollando unidades LGE integrados que con solo una unidad para los motores principales y auxiliares sea suficiente.

Por lo tanto, los buques que dispongan de una instalación con Scrubbers pueden seguir usando combustibles con alto contenido en azufre, por ello es un punto importante que influye en las decisiones de inversión de las refinerías en combustibles más destilados.

Desde la OMI se han establecido las normativas correspondientes para los vertidos del agua de lavado que contiene azufre de los Scrubber abiertos que usan agua salada. Esta agua tiene una alta cantidad de sal y alta alcalinidad con el fin de neutralizar las emisiones de los ácidos y por tanto es un problema.

El tiempo de instalación de un Scrubber en un buque ya construido es relativamente pequeño, unos 20 días. Aunque tiene ciertos impedimentos como las descargas al mar o el peso de los equipos situados en cotas muy altas alterando en muchos casos la estabilidad del buque.

No obstante, una gran ventaja de este sistema es que cumple la normativa sobre el contenido de azufre. Sin embargo, para la limitación de óxidos de nitrógeno debemos instalar un sistema adicional de tratamiento de emisiones NO_x , este puede ser un catalizador.

Existe una tipología diversa en cuanto a los tipos de Scrubber que se pueden encontrar en el mercado, los diferentes sistemas que podemos encontrar son los mencionados a continuación:

- Sistema Húmedo: circuito abierto, circuito cerrado o circuito híbrido.
- Sistema Seco

Estos sistemas por lo general tienen tres componentes básicos independientemente si es un sistema seco o húmedo.

- Un recipiente que permite que el flujo de gases de escape desde los motores sea mezclado bien con el agua dulce como con agua salada. Por razones de espacio



disponible y acceso, las unidades de limpieza de gases de escape suelen ser situadas arriba del todo en el buque o alrededor del área del guardacalor.

- Una planta de tratamiento para eliminar los contaminantes del agua de “lavado” después del proceso de limpieza “scrubbing”.
- Una instalación de manejo de los lodos, el lodo eliminado por la planta de tratamiento con agua de lavado debe ser retenido a bordo para disposición en tierra y no puede ser quemado en los incineradores del buque. Estos lodos serán alojados en el tanque de lodos general del buque siempre y cuando no se tenga un tanque de almacenamiento para estos lodos de manera especial.

A continuación, se describen los tipos de Scrubber que se encuentran en el mercado;

- Scrubber tipo seco. Estos sistemas pueden llegar a eliminar hasta el 99% del SO_x mediante la utilización de un reactor lleno con hidróxido de calcio granulado.
- Scrubber tipo húmedo Dentro del Scrubber tipo húmedo se pueden encontrar varios tipos, Scrubber abierto, Scrubber cerrado o Scrubber híbrido.
 - Scrubber tipo abierto

El sistema puede ser de tipo “abierto”, a través del cual el agua a utilizar para el scrubbing se coge desde el mar, luego es tratado y se descarga de vuelta al mar. Estos requieren que los gases de escape sean mezclados completamente con el agua salada para disolver los óxidos de azufre.

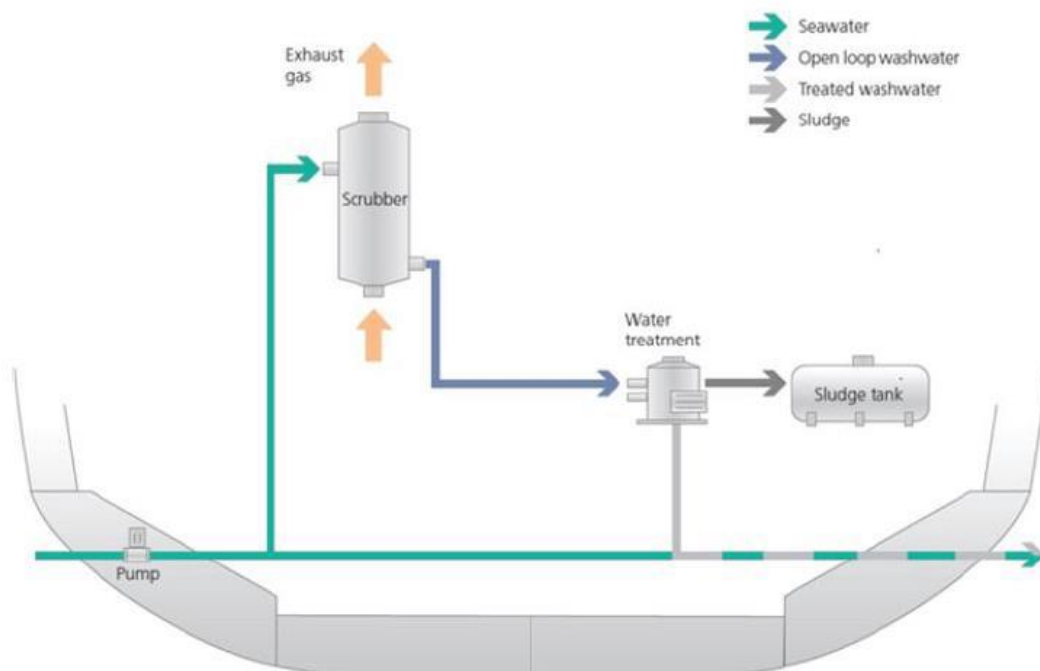


Figura 62 Scrubber tipo abierto Fuente: Alfa Laval

b. Scrubber tipo cerrado

Un Scrubber tipo cerrado, es el que utiliza agua dulce tratada con un químico alcalino como soda cáustica para neutralizar el SO_x y eliminarlo. El agua de lavado se hace recircular y se añade agua dulce adicional en caso de pérdidas de caudal. Una pequeña



cantidad del agua de lavado se purga a la planta de tratamiento para ser descargada al mar.

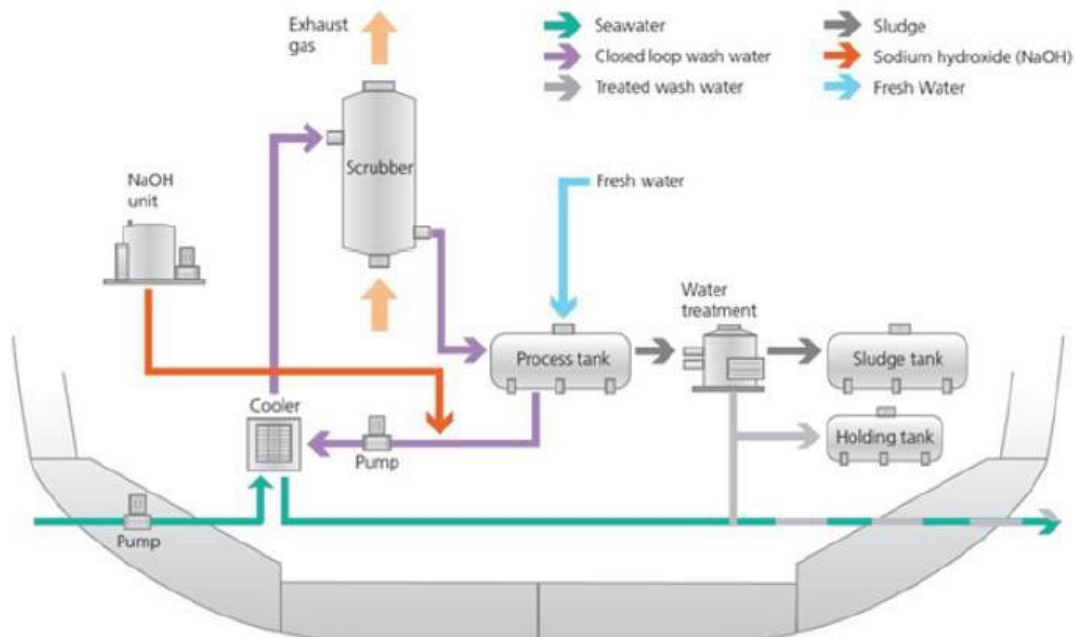


Figura 63 Scrubber tipo cerrado Fuente: Alfa Laval

c. Scrubber tipo híbrido

Cuando se opera en modo de circuito abierto, el agua de mar se mezcla con los gases de escape tal como se ha explicado en el sistema abierto y no se requiere ningún aditivo químico para la reacción de neutralización gracias a la alcalinidad natural del agua de mar. Cuando se trabaja en modo de circuito cerrado, la alcalinidad del agua del mar es sustituida por un producto alcalino, normalmente soda caustica, NaOH.

Este sistema de limpieza de gases de escape está regulado por las normativas de las emisiones de óxidos de azufre a la atmósfera establecidas en el Anexo VI del MARPOL, las directrices sobre los sistemas LGE revisadas en el MEPC 59/24/add.1 – Anexo 9 2009 especifican los requisitos para el ensayo, certificados de inspección y verificación de los sistemas de limpieza de gases de escape para asegurar que proveen la reducción eficaz de las emisiones.

Las ventajas que se encuentran al usar Scrubbers son:

- El buque puede continuar consumiendo HFO, un combustible más barato que el MDO.
- La disponibilidad del HFO es buena.
- La huella de carbono del uso de Scrubber es mejor que el uso de destilados, ya que, para producirlos, la refinería debe antes desulfurarlos mediante un proceso que tiene unas considerables emisiones de CO₂.

Mientras que los retos y desventajas de usar Scrubbers:

- La inversión inicial en estos equipos es alta.



- Los costes de operación también son más altos que en cualquiera de las otras opciones. Se incrementará el consumo de MDO en los motores auxiliares para dar potencia a estos equipos, así como un consumo de químicos y costes de su descarga adicionales,
- En los equipos de circuito híbrido y abierto, se requiere la descarga de residuos químicos. En ciertos países existen legislaciones que no permiten ninguna descarga.
- El espacio requerido por estos equipos es grande. Se debe buscar la localización idónea sin que merme la capacidad de carga comercial del buque o comprometa la estabilidad del buque.
- Estos equipos requerirán un mantenimiento especial debido a la naturaleza de los gases de escape y su localización.
- El uso de Scrubber no cumple con las limitaciones de NOx y CO₂.
- El buque debe tener la opción de consumir MDO, en caso de que el equipo Scrubber falle.
- Aún no se sabe si los actuales fabricantes de estos equipos podrán montar el suficiente número de equipos que demande el mercado.

Para el buque en estudio se ha calculado un sistema fabricado por la compañía Alfa Laval (<https://www.alfalaval.es/>), el cual ofrece un equipo compacto el cual se añade como un equipo al buque y al cual solo se debe realizar conexiones. Para su instalación se deberá varar el buque lo cual es un inconveniente para los navieros y armadores, aunque el tiempo de varada por lo general no excede los 20 días, esto podría repercutir en el mercado debido a su carácter de barco que realiza una ruta de tráfico regular. Es por ello que antes de tomar cualquier decisión se debe no solo analizar las alternativas propuestas desde el punto de vista técnico sino además desde el económico y social.

Para la instalación del buque se ha usado las tecnologías PureSOx 2.0, donde entre sus características principales destaca su diseño comprimido para el escaso espacio del que se dispone a bordo, así se evitar realizar excesivas modificaciones en el buque, que no solo influye en tiempo sino además en pérdidas económicas.

Dimensiones de la torre Scrubber	
Diámetro	3,2m
Altura	8,6m
Longitud (incluido el jet)	5,7m
Peso	15m
Material	Aleación de acero inoxidable



Figura 64 Equipo Scrubber Fuente: Alfa Laval

La instalación de la unidad Scrubber se realiza alrededor del área del guardacalor, donde hay un mayor espacio disponible y el acceso para su instalación y reparación es más fácil.

Por su flexibilidad a la hora de operación en el buque se instalará un sistema híbrido, esta combina los bajos costes de funcionamiento del circuito abierto con la flexibilidad garantizada por el sistema cerrado.

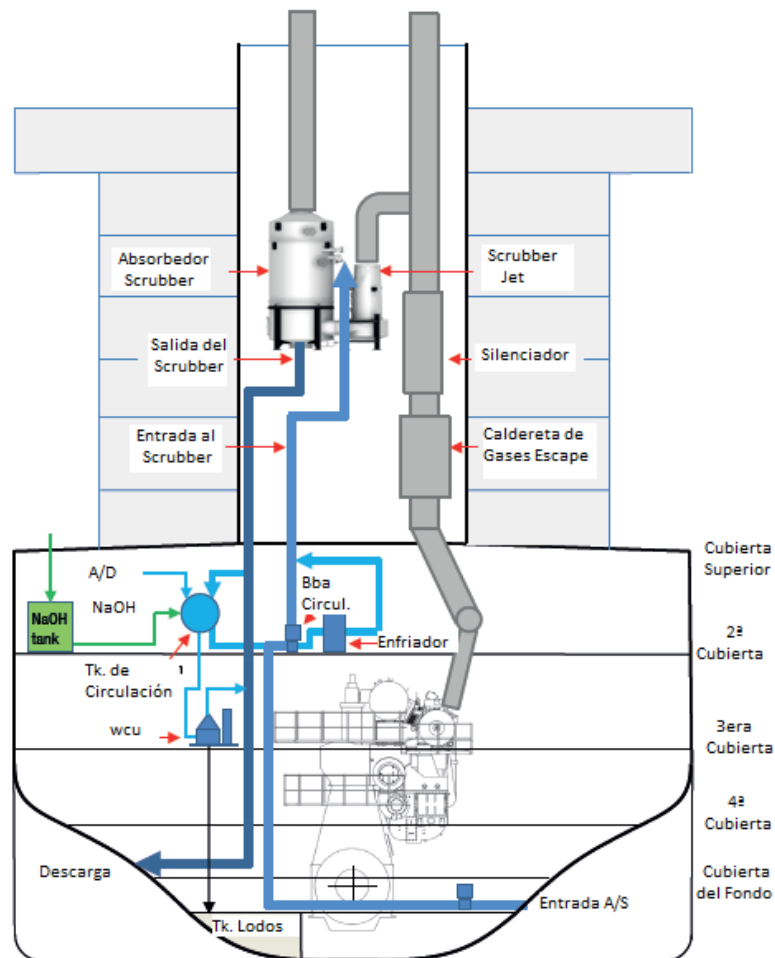


Figura 65 Instalación global de los equipos Scrubber Fuente: Alfa Laval

- Sistema de circuito abierto

Cuando el sistema se encuentra ante un circuito abierto la instalación es bastante sencilla, puesto que se utiliza el agua salada desde el propio sistema de agua salada del buque. Desde la salida del Scrubber, el agua es llevada a la descarga del agua del mar pasando primero por un control de calidad para verificar su cumplimiento con los requisitos y directrices de la OMI.

- Sistema de Circuito Cerrado

El equipamiento de un sistema de circuito cerrado incluye un tanque de circulación, un tanque de lodos, un tanque de almacén de NaOH, una bomba de circulación, un enfriador de agua dulce y una unidad de limpieza del agua.

A continuación, se realizarán los cálculos de dimensionamiento del sistema Scrubber a instalar en el buque, debido a que la formulación fue cedida por la empresa Alfa Laval, no se mostrará la formulación a utilizar.

- Tanque de NaOH

El proceso de lavado utiliza una solución de NaOH al 50%. En consecuencia, el tanque debe ser instalado en un espacio con una temperatura controlada o estar aislado y



equipado con sistemas de calentamiento. Además, la temperatura interior del tanque debe mantenerse por debajo de 45°C para evitar otros efectos negativos de la solución.

Tabla 60 Especificaciones técnicas de la solución NaOH Fuente: Alfa Laval

Especificaciones técnicas de la solución de NaOH		
Hidróxido de Sodio (como NaOH) (%)	49-50	(%)
Alcalinidad total (Na ₂ O)	38-39	(%)
Cloruro de Sodio (NaCl)	0,02	(%)máx.
Carbonato de Sodio (Na ₂ CO ₃)	0,25	(%)máx.
Sulfato de Sodio (Na ₂ SO ₄)	0,02	(%)máx
Hierro (Fe)	5	(ppm) máx.

- Tanque de Lodos

La salida de lodos de la unidad de limpieza del agua en el sistema cerrado es una solución acuosa formada por partículas de la combustión, componentes de azufre y otras materias separadas del agua de Scrubber.

- Tanque de Circulación

En los sistemas híbridos, el tanque de circulación actúa como depósito para el agua dulce durante la operación en circuito abierto y asegura una suave transición para el cambio entre circuitos. La dimensión del tanque define además el tiempo en el cual el sistema puede operar sin realizar ninguna purga al funcionar en modo cerrado.

La medida del tanque de circulación depende de los kW del motor en el caso del buque que se estudia el tanque de circulación tiene 20 m³

El equipo de limpieza de gases de escape es un sistema híbrido, para garantizar su correcto funcionamiento y a su vez verificar que se puede instalar en el buque en estudio se calcula el sistema a instalar en el buque en caso de elegirse dicha alternativa con la más beneficiosa desde diferentes puntos de vista para la reducción de emisiones.

El consumo eléctrico del sistema se calcula para cada tipo de sistema por separado, puesto que el sistema de circuito cerrado tiene más componentes que el circuito abierto, será el circuito cerrado el cual hará que aumente el consumo, además de tener distintos caudales, alturas y diferentes eficiencias de las bombas. De acuerdo con los parámetros que intervienen en el cálculo del consumo eléctrico se obtienen los siguientes valores:

- Sistema de circuito abierto :

La potencia requerida en el circuito abierto se corresponde a, la potencia instalada en los motores principales (PME), el % de potencia demandada (MCR%), el flujo de agua salada que se demanda en el circuito por segundo, por la gravedad, la densidad del agua de mar.



Tabla 61 Sistema de circuito abierto Fuente: Elaboración propia

PME (kW)	%MCR	P(Kw/h) 1 Ud.	P(Kw/h) 2 Ud.
2·5800	25	17,28	34,57
2·5800	50	34,57	69,14
2·5800	75	51,86	103,72
2·5800	100	69,14	138,29

- Sistema de circuito cerrado:

Es el sistema del Scrubber tipo híbrido que tiene mayor dificultad y que más energía demandará es por ello que se debe hacer un cálculo más exhaustivo, así como debido a que contiene más componentes que el circuito abierto se debe calcular los mismos teniendo en cuenta las características del buque. La formulación usada es la dada por el fabricante Alfa Laval ante la instalación de dicho equipo, los cálculos se deben realizar de forma exhaustiva y con ciertos márgenes de seguridad, no solo en cuanto a los equipos necesarios para que el sistema funcione sino además se debe plantear una solución viable de gestión de residuos que este produce, solo así se podrá garantizar que cumple con lo exigido en la normativa MARPOL en términos de emisiones contaminantes a la atmósfera (ANEXO VI)

Tabla 62 Circuito cerrado del sistema Scrubber Fuente: Elaboración propia

PME (kW)	%MCR	P(Kw/h) 1 Ud.	P(Kw/h) 2 Ud.
2·5800	25	5,15	10,31
2·5800	50	10,31	20,62
2·5800	75	15,46	30,93
2·5800	100	20,62	41,24

Cantidad de NaOH necesaria para la correcta operación del sistema en circuito cerrado:

Tabla 63 Cantidad del NaOH Fuente: Elaboración propia

%MCR	NaOH para Comb.3%S(kg/h)	NaOH para Comb.1%S(kg/h)
25	110,18	31,25
50	206,98	78,69
75	384,06	101,58
100	406,87	140,27

Se debe calcular la capacidad del tanque de almacén de la sosa cáustica, para ello se tendrán en cuenta los siguientes factores característicos de la operación del buque:

- Navegación del buque
- Intervalo programado de repostaje de sosa cáustica.

El buque RO-RO realiza una ruta regular de corta distancia entre Barcelona-Livorno-Génova con 3 salidas semanales y una duración aproximada de cada trayecto de X. Debido a su regularidad se propone realizar el cálculo del consumo total de la sosa cáustica al cabo de dos semanas y al cabo de un mes para su posterior análisis y determinar



que periodiza de repostaje sería la correcta para el buque según su espacio y el pedo del tanque de almacén.

Tabla 64 Cantidad de solución de NaOH Fuente: Elaboración propia

Cantidad de solución NaOH consumida en total en una semana y mes navegado	
Número de viajes por semana del buque	2
Días de parada en puerto	3
Duración media aproximada de un trayecto	28 horas
Horas navegadas a la semana	112
Horas navegadas en un mes	448
Cantidad de NaOH consumida en una semana (*)	35244,53 Kg
Cantidad de NaOH consumida en un mes	140970,14 Kg

(*)Cantidad de NaOH (semana) = horas navegadas(en una semana) * valor de consumo de sosa cáustica

El valor de consumo de soda cáustica de 314,6655 l/h por ser el correspondiente a la carga del motor de 75-85% que representa la carga de funcionamiento de los motores en la mayoría del tiempo de navegación (más del 50%) y utilizando combustible de hasta el 3% de contenido en azufre.

Se supone que la reposición de soda cáustica se realizará semanalmente, es decir, en este caso el buque tendría una autonomía de una semana de navegación. El tamaño del tanque se sobredimensiona un 33% según las indicaciones del fabricante, por tanto, tendría una capacidad de 19,52 m3.

Se elige el repostaje semanal debido a que el buque debe repostar combustible este repostaje se hará en la mayoría de casos en el puerto de Barcelona al mismo tiempo se producirá al repostaje de todos los consumibles del buque, esto se ha determinado así debido a que el buque ya está construido por lo tanto situar un tanque nuevo de grandes dimensiones supondría una dificultad a nivel estructurar, de merma de carga y dependiendo del peso general del equipo por llevaría a recalcular la estabilidad del mismo si esta pasa de un 2 % del peso en rosca del buque, tal y como indica la normativa SOLAS

Tal y como indica la normativa se debe calcular los lodos que produce el sistema:

Cálculo de la cantidad de lodo producido por el sistema Scrubber en circuito cerrado:

- Cálculo de la cantidad de lodos producida en el sistema de circuito cerrado:

Tabla 65 Cantidad de lodos del sistema de circuito cerrado Fuente: Elaboración propia

%MCR	Lodos usando Comb.3%S(kg/h)	Lodos usando Comb.1%S(kg/h)
25	141,35	67,58
50	255,35	121,58
75	400,65	183,95
100	539,52	248,55



9.3. Uso del gas natural licuado

El convenio MARPOL en su anexo VI hace alusión al uso de combustibles alternativos como es el gas natural licuado (LNG). usando este no son necesarias medidas adicionales de reducción de emisiones para cumplir con los requisitos de la OMI como sí ocurre con los combustibles pesados

El gas natural licuado se presenta como la alternativa más respetuosa con el medio ambiente ya que se basa en la eliminación total de los óxidos de azufre y una eliminación al 90% y superior en algunos casos de las emisiones de NO_x. Además, se reducen los gases de efecto invernadero como es el CO₂ en un 20% comparado con los combustibles refinados.

No obstante, en el consumo de metano como combustible marino entra un factor antes no tenido en cuenta y actualmente no contemplado por la OMI y es que todo el metano que no ha reaccionado en la combustión se convierte en metano que emitimos a la atmosfera, creando el fenómeno llamado “desplazamiento del metano”.

A pesar de esto, el uso del metano como combustible supone una serie de ventajas notables que en muchos casos priman ante la emisión del metano que se pierde durante la combustión y éstas son su erradicación de los óxidos de azufre (SO_x) por lo cual no necesitaría Scrubbers para la limpieza de los gases de escape, al mismo tiempo se reduce en un 80-90 % los gases de óxido de nitrógeno (NO_x) , se reduce el dióxido de carbono en un 25% aunque esta pérdida se ve compensada por la emisión de metano y por último no genera prácticamente emisiones de partículas (PM_x)

En cuanto a los cambios a realizar en los buques para poder consumir GNL, se debe estudiar la casuística de cada buque, mucho más cuando el buque no es de nueva construcción y es para la adaptación ya que los cambios que conllevan son:

Actualmente, hay dos razones fundamentales que empujan hacia el uso del GNL a pesar de los posibles inconvenientes que puede tener y son:

- Desde el punto de vista medioambiental reduce las emisiones a la atmósfera y el consumo de combustible.
- Desde el punto de vista operacional, en zonas ECA es una de las dos soluciones, y la única que no genera residuos adicionales.

El uso de GNL no solo afecta a la construcción y operación de los buques se ven afectados por el uso del Gas Natural Licuado sino además los puertos juegan un papel primordial en la operación de los mismos, pueden fomentar o reducir la tendencia de implantación de este combustible, implementando o no en los puertos sistemas de repostaje de este tipo de combustible fósil.

Los costes de inversión en la infraestructura necesaria para suministrar GNL a un buque son altos, esto hace que no se estén creando los suficientes puntos de suministro y, por tanto, que este mercado se esté desarrollando de una manera lenta.

Dichos costes dependerán de tres factores, la dimensión y tráfico del puerto, el tipo de buque más frecuente y su demanda de combustible y, por último, si en el puerto a considerar existía con anterioridad una terminal de GNL.



Un inconveniente tecnológico a resaltar en estos motores es el fenómeno llamado *Methane Slip*. Este término designa al gas no quemado que sale mezclado con el aire por la exhaustación. El metano como decíamos es un gas de efecto invernadero con efectos de entre 20 y 25 veces superiores al del CO₂. Se reportan emisiones de entre 4-8 g/kWh para motores “*spark-ignited*” y duales de baja presión (IHS, 2014). Este efecto no se produce en modo de ciclo diésel, sino sólo en el modo de ciclo Otto de motores duales y “*spark-ignited*”.

En la actualidad, existen cuatro opciones para suministrar GNL a un buque tal y como se muestra en la Figura 69:

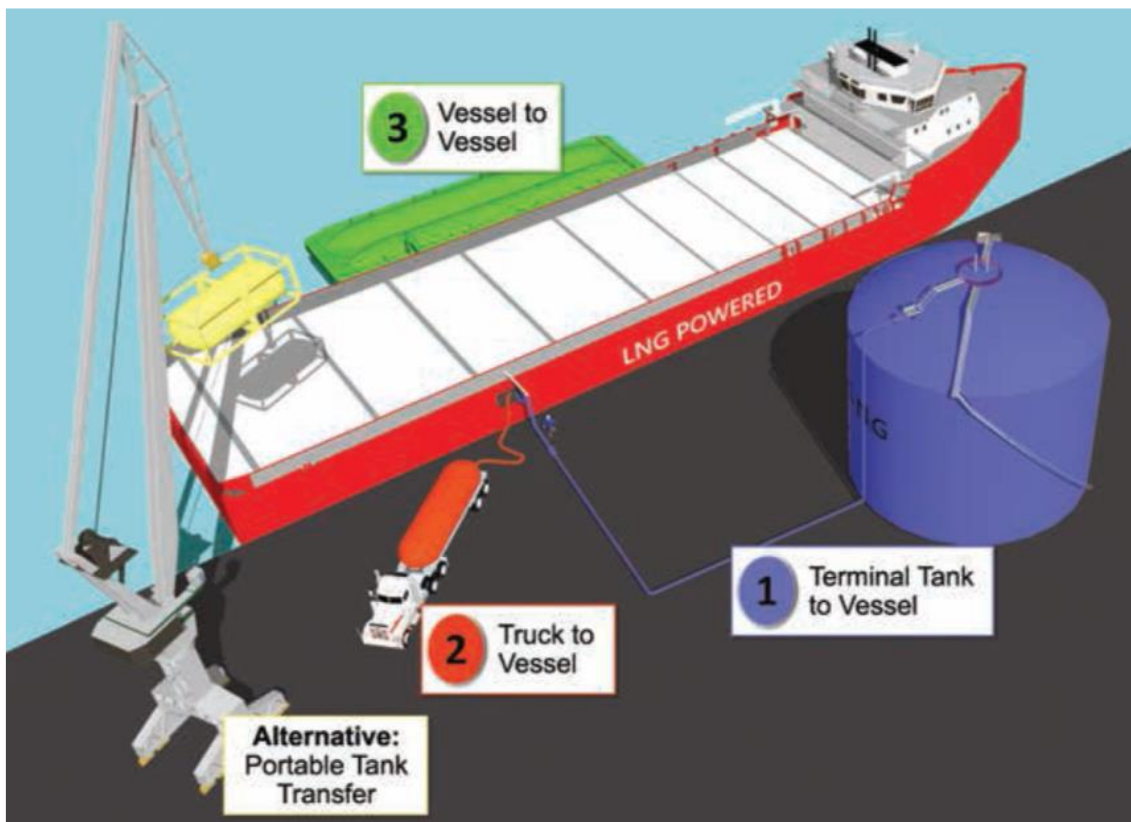


Figura 66 Diferentes métodos de suministrar GNL. Fuente: Costa Project-ValenciaPort

TPS (*Terminal to Ship by pipeline*): Una tubería lleva el GNL desde los tanques de tierra al buque receptor. Se utiliza para grandes buques receptores de GNL, ya que deben ser compatibles para conectarse a los brazos de carga de la terminal con grandes capacidades de bombeo. Las instalaciones son permanentes. Por otro lado, se muestran muy flexibles en cuanto a la cantidad a suministrar.

STS (*Ship to Ship*): utiliza una gabarra que puede suministrar al buque tanto en muelle como en zona de fondeo. Es el que requiere una mayor inversión para el suministrador, ya que requiere una fuerte inversión tanto en la construcción o adaptación de la gabarra, como en la instalación de tierra para cargar la gabarra en caso de que no existiera. La cantidad típica de suministro es de entre 100m³ y 10.000 m³.

TTS (*Truck to Ship*): un camión cisterna suministra al buque receptor pequeñas cantidades. Típicamente será unos 40 m³ aproximadamente.



TCS (*Tanks containers*): utiliza contenedores móviles que albergan tanques de GNL.

Evidentemente, los motores duales que pueden quemar tanto GNL como fuel, son más flexibles al permitir al operador elegir el combustible en función de:

- Restricciones medioambientales según la zona geográfica.
- Disponibilidad de infraestructura de GNL en los puertos de escala.
- El precio de ambos combustibles.

A modo conclusión, se resumen las ventajas e inconvenientes del uso del GNL en motores marinos.

Ventajas de usar GNL como combustible:

- Es una de las alternativas que más reduce las emisiones.
- Se disminuye el volumen de generación de residuos a bordo.
- El actual precio del GNL es menor que el del MGO y HFO.

Retos y desventajas de usar GNL como combustible:

- El coste de inversión es el más alto de las tres alternativas motivado, sobre todo, por el coste de almacenamiento y la instalación criogénica.
- Este tipo de propulsión requiere de aproximadamente 3,5 veces más de espacio a bordo para almacenar el GNL en condiciones criogénicas
- El fenómeno del metano “slip” no está plenamente controlado. Este escape de metano producido de restos de combustible no quemado tiene una aportación potencial al calentamiento global de aproximadamente 23 veces mayor que el CO₂.
- No existe una buena infraestructura desarrollada para el suministro de GNL.
- Hay una gran carencia de legislación sobre el uso de GNL.
- Faltan programas de entrenamiento y aprendizaje sobre el manejo de este combustible para tripulaciones que sólo han tratado combustibles tradicionales.



9.4. Presupuestos de las soluciones para la reducción de emisiones

Para la evaluación de las alternativas propuestas para la reducción de emisiones se ha realizado el presupuesto general del buque ya construidos, así como el presupuesto de la tecnología Scrubber y el uso de un nuevo combustible como es el caso del GNL. El cálculo del presupuesto tiene como objetivo no solo la estimación del coste de los cambios a cualquiera de las dos alternativas sino la repercusión que tendría en los beneficios globales del buque, es por eso que además se ha calculado el flete del buque, así como sus costes variables de manera que se pueda estimar de manera más precisa los costes directos e indirectos que se derivan de un cambio en un buque ya construido.

9.4.1. Presupuesto general del buque

El coste de adquisición de un buque, tiene una breve validez temporal, este solo será válido en el momento de su realización ya que debido a las reglas del mercado y en muchas ocasiones a la inestabilidad del mismo los precios de varios componentes del presupuesto serán variables. El presupuesto usa las partidas definidas por la US Navy, el cual calcula este mediante partidas presupuestarias que se dividen en los siguientes grupos:

- 100 - Estructura del casco.
- 200 - Planta propulsora.
- 300 - Planta eléctrica.
- 400 - Comunicaciones y control.
- 500 - Servicios auxiliares.
- 600 - Equipo y habilitación.
- 700 - Armamento.
- 800 - Servicios técnicos.
- 900 - Apoyo al buque durante la construcción.
- Personal dedicado a la obra.

Para el cálculo del presupuesto del Ro-Ro deberán ser calculados todos los grupos excepto el relativo al armamento debido a que el buque no forma parte de los grupos referidos a buques de guerra; por ello la partida 700 se deprecia.

1. El grupo 100 hace referencia a la estructura del casco el cual se separa en los siguientes subconceptos:

- Acero laminado.
- Piezas fundidas y forjadas.
- Timones y accesorios.
- Materiales auxiliares de construcción del casco.
- Preparación de superficies.
- Coste de pintado del buque.
- Coste de pinturas de tuberías.
- Galvanizado y cementado.
- Protección catódica.



2. El grupo 200 es la planta propulsora en este grupo se desglosa en las siguientes partidas presupuestarias:
 - Motores propulsores
 - Línea de ejes.
 - Hélices propulsoras.
 - Resto de la planta propulsora.
3. *El grupo 300 trata la planta eléctrica* este se dividirá en el coste de:
Grupos generadores principales y el grupo de emergencia, cuyo coste se estima mediante la siguiente expresión:
4. *El grupo 400 trata de las comunicaciones y control.*

Los equipos de comunicación y control del buque se estiman a partir de partidas presupuestarias de buques similares debido a la falta de información que existe

5. *El grupo 500 hace referencia a los servicios auxiliares del buque* aquí se realiza el presupuesto de todos los equipos auxiliares como son los equipos de fondeo y amarre, salvamento, hélices transversales entre otros.
6. *El grupo 600 engloba los equipos del barco y la habilitación*, aquí no se detallan el coste de los equipos de manera detallada es por ello que serán estimados a partir del peso de los mismos.
7. *El grupo 800 se refiere a los servicios técnicos y al apoyo del buque durante su construcción*, el cual se calculará por medio de un porcentaje del sumatorio del resto de conceptos que forman el presupuesto.

Aquí se engloba:

- Coste ciclo de vida del proyecto
 - Planos de construcción
 - Estudios, modelo y maquetas
 - Especificaciones de pruebas
 - Experiencias de estabilidad y pesos
 - Apoyo logístico integrado, mantenimiento y aparatos
8. *El grupo 900 se refiere al apoyo al buque durante la construcción*, al igual que la partida anterior se calcula por medio de un porcentaje del sumatorio del resto de conceptos que forman el presupuesto.

Aquí se engloban los siguientes subgrupos:

- Pruebas, entrega y garantía
- Inspección
- Control de pesos, andamios y camas
- Servicios y prestaciones temporales
- Manipulación de materiales
- Servicio de limpieza, plantillas, moldes y herramientas especiales



- Botadura y varada del buque.
9. *Personal* dedicado a la obra es el mayor de los costes de todo el proyecto naval, el cual trata el personal dedicado a la construcción, esta partida presupuestaria se divide en:
- Mano de obra, la cual se dividirá en directa y subcontratada.
 - Ingeniería, la cual se dividirá en funcional y de detalle (que es independiente del número de buques que se construyan) y de apoyo a la producción (que depende del número de embarcaciones), además de en directa y subcontratada

El coste total del buque finalmente será la suma de todas las partidas presupuestarias anteriormente desglosadas:

Tabla 66 Presupuesto por niveles Fuente: Elaboración propia

	Coste total (€)
Presupuesto 100	4016292,34
Presupuesto 200	3383600,56
Presupuesto 300	2118496,99
Presupuesto 400	150000,00
Presupuesto 500	3368501,72
Presupuesto 600	282696,37
Presupuesto 800	133195,88
Presupuesto 900	3157731,76
Personal	25031919,80
Total	41642470,42

Para la comprobación del presupuesto se le ha realizado al mismo un método de validación llamado método de Monte-Carlo que se basa en un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias es una herramienta común en estadística y campos relacionados. Dando los resultados que se muestran anteriormente con un porcentaje de probabilidad de ocurrencia de ese coste o menor.

Monte Carlo proporciona una herramienta para crear estudios de simulación de forma rápida y sencilla, en este estudio Monte Carlo se ejecuta como un estudio de simulación para una cuadrícula de parámetros definida previamente. Su importancia actual radica en la existencia de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilístico artificial (resolución de integrales de muchas variables, minimización de funciones, etc.)



Para la realización de Monte Carlos, a todas las partidas dentro de los grupos presupuestarios se le asigna una determinada confianza de los parámetros a usar los cuales pueden ser tres:

Tabla 67 Parámetros de Monte Carlo Fuente: Elaboración propia

	OPTIMISTA	PESIMISTA
Alto	95%	110%
Medio	90%	125%
Bajo	75%	175%

donde alto significa que el nivel de confianza de los parámetros a usar es muy buena, medio que es buena y bajo que tenemos poca confianza en el valor del parámetro a utilizar. Esto se le aplica a todos los grupos presupuestarios y sus componentes teniendo por lo tanto para cada partida presupuestario el valor real, un valor optimista que será menor que el real y un valor pesimista el cual será mayor al presupuesto real calculado.

En el caso a estudiar se ha elegido una distribución triangular debido a que es la mejor para el cálculo de presupuestos de este estilo, así lo demuestran varios estudios llevados a cabo al respecto.

Teniendo como resultado la siguiente distribución:

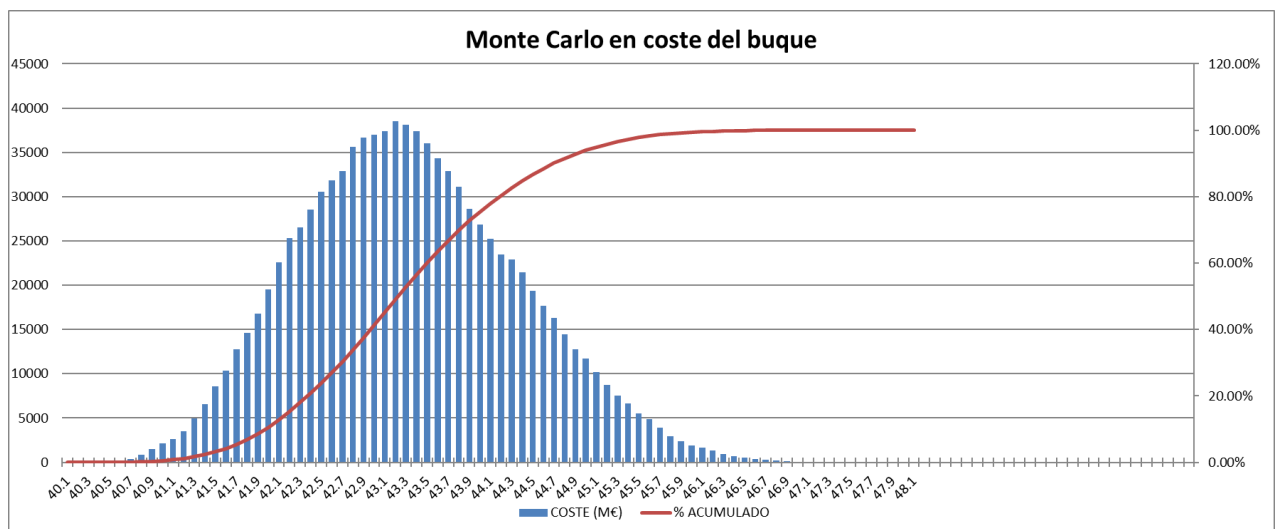


Figura 67 Distribución triangular de Monte Carlo Fuente: Elaboración propia

Tabla 68 Resultados de la simulación de Monte Carlo Fuente: Elaboración propia

Resultados	M€	Probabilidad
Presupuesto optimista	38,17	< 0,10%
Presupuesto probable	41,64	4,2%
Presupuesto pesimista	50,19	100%
Presupuesto probabilidad del 80%	44,10	80%
Presupuesto probabilidad del 95%	45,10	95%
Presupuesto probabilidad del 100%	48,10	100%



En la Tabla 68 se muestran los resultados obtenidos por el método de Monte-Carlo, estos son el coste del buque a ciertas probabilidades de cumplimiento del mismo, estas probabilidades indican la probabilidad de que el coste real del buque sea ese o menor.

9.4.2. Presupuesto de la tecnología Scrubber

El coste del Scrubber a bordo se va a calcular mediante la potencia de diseño del motor, dicho coste englobará tanto el equipo como el coste de su montaje y la mano de obra. Para ello se usará los valores del estudio de “*Danish Maritime Authority*”.

Tabla 69 Coste de la instalación Scrubber Fuente: *Danish Maritime Authority*

Inversión del coste de HFO/Scrubber			
		Renovación	Nueva Construcción
Inversión de depurador (incl. almacenamiento de residuos)	€/kW	150	150
Inversión SCR (incl. instalación de nueva construcción)	€/kW	45	45
Motor de inversión	€/kW		180
Generadores de inversión, sistema eléctrico, Propulsión, Dirección	€/kW		240
Coste de instalación del depurador	€/kW	225	180
Coste de instalación SCR/EGR	€/kW	9	

Para barcos ya construidos el coste por kW del motor principal en la instalación del Scrubber es de 225 €/kW del motor principal. Por lo tanto,

$$225€/kW \times 10305kW = 2318625€ \quad (77)$$

No obstante, se debe tener en cuenta el coste debido a que el buque permanece 20 días inutilizado debido a que debe ser varado para la reconversión. Para el cálculo de estos costes se ha calculado el flete del buque; para ello se ha analizado el flete de varias compañías navieras que realizan el mismo servicio que el buque en estudio obteniendo lo siguiente:

Tabla 70 Valor del flete para diferentes navieras Fuente: *Elaboración propia*

Naviera	Valor del flete	Unidades
Corsica ferries	37.26	€/mL
GNV	54.94	€/mL
Balearia	67.03	€/mL

De las tres navieras analizadas se ha elegido la tercera “Balearia” debido a que su ruta es la más parecida a la que realiza el buque en estudio, por lo tanto, se adapta en mayor medida a las necesidades del buque a analizar, el cálculo del flete se debería realizar de manera más exhaustiva para su mejor análisis. Por lo tanto,



Tabla 71 Pérdidas por inutilización Fuente: Elaboración propia

Días inutilizado	20	días
Coste por falta de operación/día	93850.0086	€

Para los costes por falta de operación se ha empleado la siguiente formulación;

$$\text{Coste por falta de operación al día} = 1400 \text{ metros lineales} * \text{Flete} \quad (78)$$

Se debe tener en cuenta que se han tomado los 20 días, pero realmente de esos 20 días el buque no está en operación su totalidad ya que tiene 3 salidas semanales, no obstante, se ha tomado un escenario pesimista tanto en el análisis de la alternativa de la tecnología Scrubber como en la alternativa de consumir GNL. Para basar ambas comparaciones en un mismo escenario. Finalmente, el coste total de la instalación de la tecnología Scrubber sería de,

Total de la instalación de un equipo Scrubber: 2412475.01 €

9.4.3. Presupuesto del GNL

El coste del cambio de combustible a gas natural licuado se va a calcular mediante los estudios de instalación y mantenimiento elaborados por ValenciaPort.

Tabla 72 Costes y rendimientos de distintas soluciones económicas Fuente: Valencia Port

	Coste		Rendimiento	
	UPC (\$/MW)	TLC (\$/MW)	SFC al 75 % de MCR (g/kWh)	Pérdida DWT (t/MWh)
GNL+Reformado+Pilas de combustible	2,40×10 ⁶	1,70×10 ⁵	153	0,09
GNL+ motor de 4 tiempos solo a gas	1,65×10 ⁶		150	0,09
GNL + Motor dual de 2 o 4 tiempos	1,65×10 ⁶		150	0,09
H2 + pilas de combustible + motor eléctrico	5,30×10 ⁶	1,70×10 ⁵	57	0,26
Metanol+reformado + pilas de combustible	1,70×10 ⁶	1,70×10 ⁵	389	0,07
Metanol +motor dual de 2 o 4 tiempos	9,50×10 ⁵		381	0,07

La viabilidad de cada uno de los tipos de combinaciones entre maquinaria y combustible descritas en la tabla anterior depende de los costes de capital, eficiencia, pérdida de espacio de carga, rendimiento ambiental y aspectos en cuanto a la seguridad.

Para el coste, el rendimiento y los parámetros de cada sistema se han estimado de la siguiente manera:

- Coste de adquisición unitario (UPC): o inversión inicial de capital, abarca el coste de los tanques de almacenamiento, el de los diferentes tipos de motores, pilas de



combustible y/o motores eléctricos. Así como costes adicionales como son las tuberías, los sistemas de alarma por fuga de gas, y otros sistemas de seguridad según sea necesario.

- Coste de utilización (TLC): excluyendo los costes de combustibles. Dependerá de los costes relacionados con el mantenimiento de cada sistema.
- Consumo específico de combustible (SFC) al 75% de MCR: incluye tanto la eficiencia del sistema como la energía de cada tipo de combustible.
- Toneladas de peso muerto perdidas (dwt_loss): estimación del efecto de la maquinaria y el almacenamiento de combustible, en combinación con la pérdida de espacio de carga.

Basando los cálculos en lo descrito anteriormente se obtienen los siguientes resultados,

Tabla 73 Costes de adquisición y uso de GNL Fuente: Elaboración propia

Coste de la adquisición y utilización	1.418.191,5	€/MW
Potencia del buque	10,305	MW
Total de la adquisición y utilización	14.614.463,4	€

Al igual que en la instalación de la tecnología Scrubber el buque para la conversión de quemar HFO a quemar GNL, el buque permanece 35 días inutilizado debido a que debe ser varado para la reconversión.

Tabla 74 Costes de inutilización del buque Fuente: Elaboración propia

Días inutilizado	35	días
Coste por falta de operación/día	93.850,01	€

Por lo tanto, el coste total de la conversión ascendería a,

Total de la reconversión a GNL: 14.708.313,4 €

9.4.4. Análisis económico de las alternativas

Para el análisis de como ambas alternativas afectan al buque durante su posterior operación se ha realizado el siguiente procedimiento;

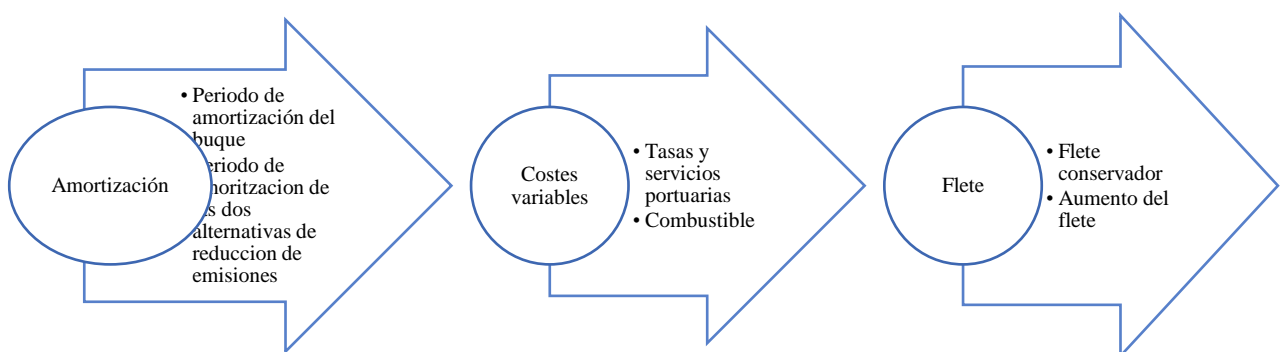


Figura 68 Procedimiento de análisis de las alternativas desde la perspectiva económica Fuente: Elaboración propia



A. Cálculo de la amortización

Para la amortización del buque se han tomado 10 años, el buque fue construido en el 2010 por lo tanto, se encuentra en el octavo año de amortización del mismo, anualmente se tendrá de costes fijos relativos a la construcción del buque; además se hace referencia al valor residual del buque el cual representa el valor final de un activo después de su depreciación o sea al final de su vida útil.

Tabla 75 Amortización del buque base anual Fuente: Elaboración propia

	Coste	Valor residual (22% del valor del buque)	Amortización anual
Coste total del buque (real)	4.16E+07	9.16E+06	3.25E+06
Coste total del buque (probabilidad del 80%)	4.41E+07	9.70E+06	3.44E+06
Coste total del buque (probabilidad del 95%)	4.51E+07	9.92E+06	3.52E+06
Coste total del buque (probabilidad del 100%)	4.81E+07	1.06E+07	3.75E+06

Las probabilidades mostradas anteriormente hacen referencia al estudio del presupuesto realizado con el método de Monte-Carlo para el presupuesto general calculado, el coste total del buque a la probabilidad del 80%, 95% o 100% es la probabilidad de que el coste total de construcción del buque sea ese o menor.

Amortización de la tecnología Scrubber

Periodo de amortización 2 años: 1.206.237,50 €

Amortización de la reconversión para usar GNL

Periodo de amortización 2 años 7.354.156,71 €

B. Cálculo de los costes variables

En los costes variables se tendrá en cuenta dos partidas fundamentales y que son las que en mayor medida definen los costes variables que son el coste de combustible y los costes de puerto.

Para el coste de combustible se ha realizado el siguiente procedimiento;

Tabla 76 Costes de combustible (HFO) Fuente: Elaboración propia

Combustible	Consumo	173	g/kWh
	Precio del combustible (HFO)	0,00039726	€/g
	Horas de navegación	28	h
	Potencia total	10305	kW



Coste de combustible en un trayecto: 19830,19 €

Se debe tener en cuenta que el precio del combustible variará dependiendo de la alternativa a usar; siendo éstos,

Tabla 77 Costes de los diferentes combustibles a utilizar Fuente: Elaboración propia

Combustible	\$/T	€/T	€/g
HFO (IFO 380)	416	359,26	0,00035926
HFO (IFO 180)	460	397,26	0,00039726
LNG	536,25	446,31	0,000446311
MGO	619,5	535	0,000535
MDO	676,55	584,27	0,00058427

Mientras que, para los costes relativos a los servicios y tasas portuarias, se han tomado la formulación y valores ofrecidos por las autoridades portuarias de cada puerto donde el buque teniendo lo siguiente,

Tabla 78 Coste de servicios y tasas portuarias Fuente: Elaboración propia

Puerto	Coste de puerto	Valor
Barcelona	Práctico	352,98 €
	Tasas del buque	17898 €
Livorno	Práctico	368,38€
	Tasas del buque	7517,16€
Génova	Práctico	385,79€
	Tasas del buque	8501,55€

C. Repercusiones en el flete

A continuación, se evaluará los beneficios anuales del buque a diferentes condiciones de carga y para las diferentes alternativas para ello se lleva a cabo la siguiente formulación, donde CF son los costes fijos del buque el cual engloba el coste de construcción del buque, mientras que CV hace referencia a los costes variables del buque tanto los costes de puerto como los costes de combustible, los costes de instalación serán los relativos a la tecnología a instalar. Finalmente, a esto se deberá sumar los beneficios obtenidos por el flete.

$$\text{Beneficios anuales} = -CF - CV - C. \text{instalación} + \text{Flete}(\text{anual}) \quad (79)$$



Los beneficios anuales para cada alternativa son los siguientes;

a. Utilización de HFO

Tabla 79 Beneficios anuales para HFO Fuente: Elaboración propia

Condición de carga	R1 (25)	R2 (50)	R3 (75)	R4 (100)
Coste total del buque (real) (€)	-13.042.280	-5.721.979	1.598.322	8.918.622
Coste total del buque (probabilidad del 80%) (€)	-13.233.967	-5.913.666	1.406.634	8.726.935
Coste total del buque (probabilidad del 95%) (€)	-13.311.967	-5.991.666	1.328.634	8.648.935
Coste total del buque (probabilidad del 100%) (€)	-13.545.967	-6.225.666	1.094.634	8.414.935

Donde, R1, R2, R3, R4 hace referencia a los cuatro escenarios de carga donde se calculan los beneficios obtenidos en cada alternativa, R1(25) condición de carga del buque al 25% de su carga real, R2(50) condición de carga del buque al 50% de su carga real, R3(75) condición de carga del buque al 75% de su carga real, R4(100) condición de carga del buque al 100% de su carga real.

b. Utilización de MDO

La diferencia con respecto al buque base que utiliza HFO, es el aumento de los costes variables derivados del aumento del precio del combustible del MDO con respecto al precio del HFO. Donde los resultados reflejan lo mismo que en el caso anterior.

Tabla 80. Beneficios anuales para MDO Fuente: Elaboración propia

Condición de carga	R1 (25)	R2 (50)	R3 (75)	R4 (100)
Coste total del buque (real) (€)	-15.954.817	-8.634.517	-1.314.216	6.006.085
Coste total del buque (probabilidad del 80%) (€)	-16.146.505	-8.826.204	-1.505.903	5.814.397
Coste total del buque (probabilidad del 95%) (€)	-16.224.505	-8.904.204	-1.583.903	5.736.397
Coste total del buque (probabilidad del 100%) (€)	-16.458.505	-9.138.204	-1.817.903	5.502.397



c. Utilización de la tecnología Scrubber

Tabla 81. Beneficios anuales para Scrubber Fuente: Elaboración propia

Condición de carga	R1 (25)	R2 (50)	R3 (75)	R4 (100)
Coste total del buque (real) (€)	-14.248.517	-6.928.216	392.084	7.712.385
Coste total del buque (probabilidad del 80%) (€)	-14.440.204	-7.119.904	200.397	7.520.698
Coste total del buque (probabilidad del 95%) (€)	-14.518.204	-7.197.904	122.397	7.442.698
Coste total del buque (probabilidad del 100%) (€)	-14.752.204	-7.431.904	-111.603	7.208.698

d. Reconversión para poder usar GNL

Tabla 82 Beneficios anuales para GNL Fuente: Elaboración propia

Condición de carga	R1 (25)	R2 (50)	R3 (75)	R4 (100)
Coste total del buque (real) (€)	-21.160.368	-13.840.067	-6.519.767	800.534
Coste total del buque (probabilidad del 80%) (€)	-21.352.055	-14.031.755	-6.711.454	608.847
Coste total del buque (probabilidad del 95%) (€)	-21.430.055	-14.109.755	-6.789.454	530.847
Coste total del buque (probabilidad del 100%) (€)	-21.664.055	-14.343.755	-7.023.454	296.847

En conclusión, el flete sufre la siguiente desviación dependiendo de la alternativa a utilizar si queremos obtener los mismos beneficios que actualmente obtiene el buque:

Tabla 83 Comparación del valor del flete Fuente: Elaboración propia

Alternativa	Valor del flete por mL (Primer y segundo año)	Valor del flete con el CF de la alternativa amortizado por mL
HFO	67,03 €	-
Scrubber	72,55 €	67,03 €
GNL	104,2 €	70,52 €
MDO	80,36 €	80,36 €

En cuanto al valor del flete se ve que ambas alternativas tienen un aumento significativo del flete los dos primeros años de amortización de la tecnología, no obstante, el uso de la tecnología Scrubber es más favorable que el uso del gas natural licuado tanto durante el periodo de amortización como posteriormente, esto radica que la tecnología es más barata al mismo tiempo que el precio del combustible también es menor que usar MDO o GNL.



9.5. Comparación de las diferentes alternativas

Para la correcta evaluación y comparación de las alternativas planteadas, se realizará un balance de las tres teniendo en cuenta las mismas características a comparar, a las cuales se las asignará un código de colores dependiendo de si es una ventaja (verde) o desventaja en menor o mayor medida (amarillo y rojo respectivamente).

	MDO	Scrubber	GNL
Inversión	Muy baja	Alta	Muy alta
Mantenimiento	Bajo	Mantenimiento caro que aumenta los costes operativos	El mantenimiento es un 20% más caro que en la propulsión tradicional
Precio del combustible	Muy alto rondando los valores de 584.27 €/T	Utiliza HFO con un precio de 359.26 €/T	El precio del GNL es de 446.31 €/T
Espacio	No afecta	Requiere de espacio en el guardacalor	Requiere mayor volumen de tanques
Merma de carga	No tiene merma de carga	No tiene merma de carga	Reduce la capacidad para cargar.
Reducción de emisiones	Requiere tratamiento de NOx si se navega por zona ECA	Reduce bien los SOx no obstante apenas reduce NOx	Reduce NOX, CO2 y carece de emisiones de SOx
Infraestructura	Mercado considerado	Alta disponibilidad de HFO	Mercado en crecimiento por lo tanto la infraestructura portuaria es escasa
Disponibilidad del producto	Baja	Oferta de Scrubbers todavía limitada	Alta
Manejo del sistema	No afecta	Requiere formación para saber operar el buque utilizando dicho sistema	Complejo sistema al usar un sistema criogénico.
Valor del Flete	Alto (80.36 €/mL)	Medio (67.03€/mL)	Medio (70.52€/mL)
Tecnología	Muy consolidada	En desarrollo	En desarrollo y tiene que hacer frente a retos como el Metano Slip
Tripulación	La tripulación no necesita de una formación añadida a la que tienen	La tripulación necesita ser formada para poder operar el buque.	La tripulación necesita ser formada para poder operar el buque.

De lo mostrado anteriormente, se puede concluir que el uso de combustibles más refinados como es el caso del MDO a simple vista es la alternativa más favorable, no obstante, sus cuatro aspectos negativos tienen un peso mayor en el cómputo global, el mayor problema es la disponibilidad del diésel marino ya que su demanda aumentaría en más de 12 millones de toneladas anuales, lo que hace que su disponibilidad se vuelva muy escasa. El segundo aspecto clave para el despreciar el uso del MDO es que precio de este combustible es una media de 300€/T más que el precio del fuel de alto azufre. Este mayor precio de combustible incrementará enormemente los costes del transporte marítimo y se trasladará a toda la cadena de suministro mediante el aumento del flete. Esto provocará que el transporte marítimo pierda competitividad frente al transporte por carretera, en determinadas rutas.

Son éstos inconvenientes lo que hace que se desarrollen las otras dos y se siga investigando e invirtiendo en ellas. El uso de Scrubbers requiere una inversión alta; sin embargo, permite seguir consumiendo fuel oil de alto contenido en azufre, lo que deriva



en un mantenimiento del valor del flete, con un precio de compra mucho menor que el del diésel. Su tecnología, por el momento, necesita de un espacio considerable en la zona de guardacalor para alojar los nuevos equipos y de un estudio de estabilidad del buque.

Por otro lado, el uso del GNL como combustible, implica una inversión elevada, compensada en parte por el precio del gas y del valor de su flete. Sin embargo, requiere de tanques de gas en torno a 3,5 veces más grandes que los de un combustible tradicional. Sin embargo, su mayor inconveniente, por el momento, es que carece de una infraestructura portuaria desarrollada que pueda asegurar el suministro a los buques con esta tecnología a bordo. Pero, la capacidad de reducción de emisiones es la mejor de todas, cumpliendo totalmente con la normativa OMI y la disponibilidad de gas, en estos momentos, es muy buena, lo que hace que su precio también sea bajo.

Las decisiones tomadas por los armadores y operadores dependerán del perfil operacional de sus buques, en particular, cuánto tiempo navegan dentro de zonas ECA y el escenario de precios diferenciador entre los tres productos.

La tendencia actual opta por usar equipos Scrubber cuando se trata de buques ya construidos debido al coste de la inversión y el menor riesgo que tiene la instalación en comparación a la reconversión del buque a gas natural licuado, no obstante, para la decisión de la mejor alternativa para el buque en estudio, se debe profundizar en el estudio de las alternativas.

Para cada buque se debe hacer una evaluación exhaustiva de la alternativa que mejor puede adaptarse al buque, en el caso que se expone en este estudio para buques ya construidos, la reconversión del buque a gas natural licuado supone además de una fuerte inversión, un fuerte cambio estructural que llevaría al buque a perder capacidad de carga lo que aumentaría el precio del flete de manera exponencial, por otro lado el cambio de combustible y el uso de tecnología Scrubber lleva al buque a modificar de manera leve la operación del buque y los cambios estructurales del mismo.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



10. Conclusiones

A continuación, se mostrarán las diferentes conclusiones obtenidas de la realización del estudio llamado “*Estudio de la influencia de la resistencia añadida en olas en las emisiones contaminantes de buques*”

En dicho estudio se ha realizado un análisis de las emisiones de los buques Ro-Ro que realizan una ruta de línea regular en el Mediterráneo, a consecuencia que en el año 2020 la actual legislación sobre emisiones se endurezca. Mediante el procedimiento llevado a cabo en este estudio se puede calcular las emisiones a partir de la potencia demandada por el buque en cada instante de su navegación, obteniendo así unos resultados de emisiones más próximos a la realidad.

En primer lugar, se ha realizado el cálculo de la potencia demandada por el buque durante una discretización de su zona de navegación en 6 áreas. Calculando mediante la mecánica de fluidos computacional y un software capaz de simular las condiciones ambientales de esas 6 zonas, la resistencia en aguas tranquilas en primer lugar y en segundo lugar la resistencia añadida en olas. Sumando éstas se obtiene la resistencia total del buque. Pudiendo calcular a partir de esta la potencia real demandada por el buque.

De los resultados obtenidos de dichos cálculos se puede concluir que la resistencia añadida en olas obtenida representa entre el 10% y el 30%, de la resistencia en aguas tranquilas. Esto lleva a la conclusión de que, si solo se calcula la resistencia en aguas tranquilas tal y como se había hecho hasta el momento, se está considerando que se demanda una potencia menor que la real, desvirtuando así los posteriores resultados de las emisiones.

Tras el cálculo de la potencia real demandada por el buque Ro-Ro, en cada instante de su navegación, se procede a calcular las emisiones contaminantes, teniendo en cuenta cuatro agentes contaminantes: CO₂, SO_x, NO₂ y PM_x.

Para poder llevar a cabo una comparación que demostrase que se desvirtúa los resultados de las emisiones si no se tiene en cuenta la potencia real demandada por el buque, se realizó el cálculo de las mismas primero tomando como potencia de cálculo la potencia al 85%MCR de la potencia instalada, obteniendo así que el buque emite en cada zona la misma cantidad de agente contaminante, en segundo lugar se calculó éstas mismas emisiones pero teniendo en cuenta la potencia demandada en cada zona de navegación y las horas que pasa en las mismas. Comparando ambos resultados, se concluye que las emisiones son un 10% mayor si se calcula de manera dinámica variando la potencia en cada zona de navegación. Demostrando así, que si se toma únicamente la potencia instalada se está dando un resultado optimista de las emisiones que se emiten a la atmósfera.

Además, para demostrar que el transporte marítimo tiene unas emisiones por unidad de carga menor, que cualquier otro medio de transporte, se comparó los datos obtenidos de las emisiones de CO₂ por unidad de carga en el transporte marítimo, frente al transporte por carretera, demostrando así, que se emite mucho menos en el transporte marítimo debido a sus efectos de escala, porque aunque en un solo trayecto este tenga unos niveles de emisión mayores, que un trayecto por carretera, para trasladar el mismo volumen de carga en el transporte por carretera se necesita un mayor número de desplazamientos, dando lugar en cómputo global a un mayor nivel de emisiones de CO₂.



Finalmente, partiendo de los datos de emisiones obtenidos se ha propuesto una serie de alternativas para reducir estos niveles de emisión. Éstas alternativas analizadas fueron el cambio de combustible de HFO a MDO o GNL, o el uso de HFO con un sistema de limpieza de gases de escape. Tras la evaluación de las tres alternativas se determina que el uso del sistema de gases de escape es el más óptimo para el buque a analizar debido a que los cambios estructurales son mínimos al mismo tiempo que se consume el mismo combustible, siendo el HFO el combustible más barato actualmente en el mercado y permitiendo el uso normal de los tanques de almacenamiento de fuel.

Este estudio debería ser el principio de un estudio mayor donde, además de calcular las emisiones para el estado actual del buque, se pueda calcular las emisiones de cada una de las alternativas propuestas. La hoja de cálculo de emisiones está en disposición de calcularlas, no obstante, no era uno de los objetivos del trabajo. Del mismo modo, una de las futuras líneas de investigación que se pueden extraer del estudio presentado es el análisis de más buques mediante esta metodología, para así garantizar que se cumplen los mismos porcentajes de error de emisiones.

CAPÍTULO 11

REFERENCIAS



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA AÑADIDA EN OLAS EN LAS
EMISIONES CONTAMINANTES DE BUQUES



11. Referencias

- Agency, E. E. (2013). The impact of international shipping on European air quality and climate forcing.
- Alonso Pardo, B. (2017). Apuntes Hidrodinámica Naval Avanzada. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Arriba Pérez, F. (2007). Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves. *Ocean Engineering*, 34.
- Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale. (2017). *Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale*. Obtenido de <https://www.portialtotirreno.it/>
- Esquivá, N. G. (2017). Estudio y dimensionamiento de una instalación de suministro de energía eléctrica a buques desde tierra basada en la tecnología onshore power supply. Cartagena, Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Europea, C. (2013). Programa "Aire Puro". *Programa Aire Puro para Europa*. Bruselas.
- García Espinosa, J., & Servan Camas, B. (2018). A non-linear finite element method on unstructured meshes for added resistance in waves. *Ships and Offshore Structures*.
- GeoEnciclopedia. (2016). *GeoEnciclopedia*. Obtenido de <http://www.geoenciclopedia.com/mar-mediterraneo/>
- Huijsmans, R. S. (s.f.). Time-domain calculation of first- and second-order force on a vessel sailing in waves. .
- López, F. d. (2015). *Evaluación de las consecuencias de la nueva regulación de la OMI sobre combustibles marinos*. Madrid: Departamento de Arquitectura, Construcción, Sistemas Oceánicos y Navales UPM.
- Menendez, P. G. (2016). *Short Sea Shipping*.
- Molland, A. F. (2011). Practical Estimation of Ship Propulsive Power .
- Olier Aguilar, A. E., & Álvarez Lara, W. (2015). *Caracterización del impacto ambiental causado por las emisiones de gases en buques*.
- OMI. (2011). *Convenio MARPOL*. Londres.
- Pérez, E., Mestre, A., Sáez, L., & Lara, J. (2016). *Feasibility of LNG as a Fuel for the Mediterranean SSS Fleet*. Fundación Valencia Port.
- Ports of Genoa. (2016). *Ports of Genoa*. Obtenido de <https://www.portsofgenoa.com/it/>
- Puerto de Barcelona. (2017). *www.portdebarcelona.cat*. Obtenido de <http://www.portdebarcelona.cat>
- Puerto de Valencia. (2017). *www.valenciaport.com*. Obtenido de <https://www.valenciaport.com/>



Puertos del Estado. (2017). *www.puertosdeestado.es*. Obtenido de <http://www.puertosdeestado.es>

SETRAM. (s.f.). *SETRAM Logística de automoción*. Obtenido de <http://www.setram.com/>

TU Delft. (2012). *Massie in Offshore Hydromechanics*.

Universitet, D. T. (2016). *Emission factor of pollutant gas*.