Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Traslación y aplicación de la normativa de la eficiencia energética en la marina mercante al ámbito militar

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Antonio Liarte Pérez

DIRECTORES: María Elena Arce Fariña

Andrés Suárez García

Pedro Carrasco Pena

CURSO ACADÉMICO: 2016-2017

Universidade Vigo

Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Traslación y aplicación de la normativa de la eficiencia energética en la marina mercante al ámbito militar

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

El estudio de la mejora de la eficiencia energética es una vía de solución para reducir el coste energético, económico y medioambiental de las actividades humanas sin impedir el desarrollo socioeconómico de la humanidad. La preocupación actual por el cambio climático y la contaminación atmosférica ha llevado a gobiernos y organismos internacionales a exigir un mayor control de las emisiones y el uso de energías menos contaminantes a bordo de los buques. Por su parte, la reducción de los costes de navegación por las empresas privadas siempre ha sido un objetivo a alcanzar para el aumento de los beneficios en la actividad económica.

El estudio de las normativas de eficiencia energética, las investigaciones y mejoras de aplicación en los buques supone una labor de interés para la Armada Española. En el presente Trabajo de Fin de Grado se lleva a cabo el estudio de transposición de la normativa en eficiencia energética de la marina mercante a la Armada Española, así como diferentes propuestas de uso y mejoras que sirvan de punto de comienzo en este campo de estudio. Conseguir la mejor eficiencia de los buques de la Armada supondrá un ejemplo a seguir en materia de reducción del consumo de energía, compromiso con el medio ambiente y de aumento de sus capacidades, logrando el mejor uso del dinero de los españoles.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia energética, Armada Española, Marina Mercante, Energía, Medioambiente.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia y a mis padres por haber sido el mayor de los apoyos durante estos cinco duros años de trabajo y estudio que, se culmina con este Trabajo de Fin de Grado. Agradecer también a mi novia por el aporte de datos relacionados con la salud y medioambiente y su interés en mi trabajo.

Por otro lado, quiero agradecer a la Escuela Naval Militar y al Centro Universitario de la Defensa por la formación que he recibido durante estos cinco años, tanto como oficial de Cuerpo General de la Armada Española como ingeniero de la rama mecánica con intensificación en tecnología naval, sin la cual la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

Por último, quiero agradecer a los tutores que han guiado este Trabajo de Fin de Grado, María Elena Arce Fariña, Andrés Suárez García y al Teniente de Navío Pedro Carrasco Pena. Por la gran ayuda a la hora de encaminar este proyecto y por hacerme ver la continuación de mi interés por la eficiencia energética en la Armada Española, iniciada en mi formación previa ya en mi anterior instituto. Mi más sincero agradecimiento especialmente al Teniente de Navío Carrasco Pena por continuar su tutorización desde Sídney donde sirve de apoyo logístico a la fragata "Cristóbal Colón", siendo sus consejos y conocimientos de gran ayuda para la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas....6
Glosario de acrónimos....7
1 Introducción y objetivos....8
1.1 Presentación del proyecto 8
1.2 Objetivos del proyecto 9
1.3 Estructura de la memoria 9
2 Estado del arte 10
2.1 Eficiencia energética....10
2.1.1 Introducción....10
2.1.2 Impacto del transporte marítimo en el consumo energético....16
2.1.3 Impacto del transporte marítimo en el medio ambiente 19
2.1.4 Eficiencia energética en el transporte marítimo 26
2.2 Marco Regulador sobre la eficiencia energética en buques....29
2.2.1 Antecedentes....29
2.2.2 Índice de Eficiencia Energética de Diseño (EEDI) 30
2.2.3 Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) 33
2.2.4 Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI)....35
2.2.5 Reglamento de eficiencia energética en transporte marítimo de la UE....37
2.2.6 Sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible de los buques....38
2.3 Estado actual de la aplicación de las mejoras de eficiencia energética en buques 39
2.3.1 Avances e investigaciones realizadas en la marina mercante....39
2.3.2 Combustibles alternativos....46
2.3.3 Avances e investigaciones realizadas por la flota pesquera 53
2.3.4 Avances e investigaciones realizadas por la Armada de Estados Unidos 56
2.3.5 Avances e investigaciones realizadas por otras marinas de guerra 57
3 Desarrollo 59
3.1 Posibilidades de aplicación de la normativa sobre eficiencia energética de la marina mercante a la Armada Española 59
3.1.1 Estudio de la posibilidad de aplicación de la normativa....59
3.1.2 Implementación del Índice de Eficiencia Energética de Diseño en la Armada Española 65
3.1.3 Implementación del Indicador Operacional de la Eficiencia Energética en la Armada ...65

3.1.4 Plan de gestión de la eficiencia energética del buque....68
3.1.5 Plan de Seguimiento, Notificación y Verificación para la Armada Española....70
3.2 Propuesta de aplicación práctica de la normativa. Calculadora del EEOI....74
4 Resultados....78
4.1 Ejercicio práctico del uso de la calculadora del EEOI....78
4.2 Análisis de sensibilidad de los parámetros de estudio en la calculadora EEOI....88
5 Conclusiones y líneas futuras....90
6 Bibliografía....92
7 Anexos....98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Metodología a seguir en el proyecto....9

Figura 2-1 Objetivos energéticos Europa 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Comunicación de la Comisión Europa 2020: Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador [7]....11

Figura 2-2 Producción energética UE28. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12]....12

Figura 2-3 Estimaciones consumo interior bruto de energía UE28. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12]....12

Figura 2-4 Relación producción-importación energía UE. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12]. 13

Figura 2-5 Relación entre producción e importación de energía en España. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12]. 13

Figura 2-6 Dependencia energética europea y española. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12]....14

Figura 2-7 Principales medidas y publicaciones OMI-UE. Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de datos de OMI y normativa UE. 15

Figura 2-8 Evolución del consumo de combustible debido al sector marítimo. Fuente: Elaboración propia a partir de Estudio GHG OMI 2014 y 2009 [20], [22]. 18

Figura 2-9 Evolución del consumo de combustible debidas al transporte marítimo. Fuente: Elaboración propia a partir de Estudio GHG OMI 2014 y 2009 [20], [22]....18

Figura 2-10 Comparación cronológica de consumo de combustible sector marítimo frente al total consumido. Fuente: Estudio Elaboración propia a partir de estudios de la OMI y BP [20]-[22]....19

Figura 2-11 Comparación de emisiones de CO_2 totales y debidas al sector marítimo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Estudio OMI 2014, Estudio OMI 2009 y el Centro de Análisis e Información del CO_2 [20], [22], [25]. 21

Figura 2-12 Gramos de CO_2 emitidos por tonelada de carga y kilómetro recorrido. Fuente: Maersk [27]....23

Figura 2-13 Mapa de niveles de contaminación (Dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre) promedio en 2005. Fuente: Agencia Europea de Medioambiente. 24

Figura 2-14 Mapa de niveles de contaminación (PM 2.5, tetraóxido de azufre y ozono) promedio en 2005. Fuente: Agencia Europea de Medioambiente. 25

Figura 2-15 Medidas para la reducción de emisiones. Fuente: ICCT. Elaboración propia. 26

Figura 2-16 División de las mejoras de la eficiencia energética. Elaboración propia. 27

Figura 2-17 Normativas de la marina mercante a estudio. Elaboración propia. 29

Figura 2-18 Fórmula EEDI en bloques. Fuente: OMI MEPC 245 2014. Elaboración propia. 33

Figura 2-19 Ciclo de mejora del SEEMP. Elaboración propia. 34

Figura 2-20 Sistema de seguimiento y notificación. Elaboración propia....37

Figura 2-21 Mejora Hi-FIN de la hélice. Fuente: Marine log [39] 39

Figura 2-22 Sistema de lubricación de aire del casco. Fuente: Fondear [41].....39

Figura 2-23 Función del bulbo. Fuente: AB surveyors [42] 40

Figura 2-24 Inclusión del generador de cola en un sistema híbrido. Fuente: Ingeteam [44] 41

Figura 2-25 Mejora conseguida con el sistema de eficiencia de "MAN Diesel and Turbo". Fuente: Dimensionado de un sistema de recuperación de gases de escape para un portacontenedores de 2700 TEU [46] 42

Figura 2-26 Sistemas de la energía eólica en buques. Fuente: Elaboración propia con datos de Ingeniería marina [47].....43

Figura 2-27 Propulsión eólica en buques militares. Fotograma de la serie "The Last Ship".....44

Figura 2-28 Buque Turanor "Planet Solar". Fuente: www.planetsolar.org 44

Figura 2-29 Buque Solemar. Fuente: www.seacleaner.com 45

Figura 2-30 Caudalímetro electromagnético tipo brida. Fuente: ACS Control System.....46

Figura 2-31 Combustión de una emulsión de combustible. Fuente: Incbio [56]. 47

Figura 2-32 Comparativa de emisiones del GNL frente a otros combustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MINETAD [58].....48

Figura 2-33 Comparación de equivalencias energéticas entre combustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDAE [11].....49

Figura 2-34 Precio del GNL. Fuente: Elaboración propia a partir del informe BP Statistical Review of World Energy 2014 [59].....49

Figura 2-35 Precio del petróleo. Fuente: Elaboración propia a partir del informe BP Statistical Review of World Energy 2014 y US Energy Information Administration [59], [60].....50

Figura 2-36 Vuelo de avión radiocontrol con combustible de agua de mar por investigadores del laboratorio de la Armada de Estados Unidos. Fuente: U.S. Naval Research Laboratory.....51

Figura 2-37 Buque de funcionamiento de hidrógeno FCS Alsterwasser. Fuente: Proton-motor [64]. 52

Figura 3-1 Relación de normativas a estudio de aplicación. Elaboración propia. 59

Figura 3-2 Distribución del consumo energético F-105. Fuente: Elaboración propia a partir de [76]. 61

Figura 3-3 Distribución del consumo energético de un buque de pesca para navegación con carga. Fuente: Elaboración propia a partir de [77]. 62

Figura 3-4 Situaciones energéticas de un buque en puerto. Fuente: Elaboración propia a partir de [76].....63

Figura 3-5 Clasificación de los buques de la Armada Española. Fuente: www.armada.mde.es. Elaboración propia 66

Figura 3-6 Factores de estudio para el EEOI genérico. Elaboración propia. 67

Figura 3-7 Ciclo de mejora del SEEMP. Elaboración propia. 68

Figura 3-8 Relación de buques de la Armada según su arqueo bruto. Fuente: Lista Oficial de Buques de la Armada 2015. Elaboración propia.....69

Figura 3-9 Proceso de toma de datos y registro del consumo de combustible. Elaboración propia. 71

Figura 3-10 Estructura del sistema de notificación de consumos de combustible propuesta para la Armada Española. Elaboración propia.....71

Figura 3-11 Equipos a monitorizar por caudalímetro. Fuente: www.armada.mde.es Elaboración propia. 72

Figura 3-12 Coste combustible navegación Ferrol-Rota por buque escolta. Fuente: Servicio de Combustibles del Arsenal Militar de Ferrol. Ratios de 2016. Elaboración propia. 73

Figura 3-13 Comparativa de coste navegación frente a coste de instalación de caudalímetros. Elaboración propia. 73

Figura 3-14 Procedimiento relleno de datos. Elaboración propia. 75

Figura 4-1 Calculadora EEOI, hoja "Datos del buque". Elaboración propia. 79

Figura 4-2 Calculadora EEOI, hoja "Navegación en curso". Elaboración propia. 80

Figura 4-3 Calculadora EEOI, hoja "Eficiencia navegación". Elaboración propia. 81

Figura 4-4 Calculadora EEOI, hoja "Resumen Navegaciones". Elaboración propia.....82

Figura 4-5 Calculadora EEOI, hoja "Consumos navegaciones". Elaboración propia. 83

Figura 4-6 Calculadora EEOI, hoja "Consumos en puerto". Elaboración propia. 84

Figura 4-7 Calculadora EEOI, hoja "Informe EEOI". Elaboración propia. 85

Figura 4-8 Calculadora EEOI, hoja "Informe Total consumido/Distancia navegada". Elaboración propia. 86

Figura 4-9 Calculadora EEOI, hoja "Informe Consumido propulsión/Distancia navegada". Elaboración propia. 87

Figura 4-10 Análisis combustible consumido. Elaboración propia.....89

Figura 4-11 Análisis variable distancia navegada. Elaboración propia. 89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Flota mercante mundial. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe de Clarkson Research Services Limited (CRSL) [18]. 16

Tabla 2-2 Tráfico mundial por vía marítima. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe de Clarkson Research Services Limited (CRSL) [18]. 17

Tabla 2-3 Relación de emisiones de CO_2 (millones de toneladas) debidas al sector marítimo y el total emitido por la actividad humana. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Estudio OMI 2014, Estudio OMI 2009 y el Centro de Análisis e Información del CO_2 [20], [22], [25].....20

Tabla 2-4 Estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero (millones de toneladas de CO_2 equivalente). Fuente: Elaboración propia a partir de Estudios de la OMI 2014 y 2009 y Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) [20], [22], [26].....22

Tabla 2-5 Coeficientes de conversión de combustibles a CO_2. Fuente: OMI CIRC. 684. Elaboración propia. 36

Tabla 2-6 Unidades de uso para cuantificar la masa de carga transportada. Fuente: OMI Circ. 684. Elaboración propia. 36

Tabla 2-7 Reducción de niveles de azufre en combustibles marinos. Fuente: Regla 14 Anexo VI Convenio Marpol de la OMI. Elaboración propia. 46

Tabla 2-8 Medidas adoptadas en el proyecto ESB. Fuente: Proyecto ESB Cataluña. Elaboración propia. 54

Tabla 3-1 Distribución del consumo energético F-105. Fuente: Elaboración propia a partir de [76]. 61

Tabla 3-2 Balance energético de un buque palangrero. Fuente: Elaboración propia a partir de [77]. 62

Tabla 3-3 Comparativa distribución de consumos entre buque de pesca tipo palangrero y buque escolta F-105. Fuente: Elaboración propia a partir de [76], [77]. 63

Tabla 3-4 Distribución temporal de las distintas situaciones de un buque de guerra. Fuente: Elaboración propia a partir de [76]. 64

Tabla 3-5 Factores para el cálculo del EEOI específico. Elaboración propia 68

Tabla 3-6 Análisis del coste de instalación de caudalímetros en buques designados de la Armada Española. Elaboración propia. 73

Tabla 3-7 Glosario de unidades de uso en la calculadora. Elaboración propia. 77

Tabla 4-1 Parámetros e índices analizados en el estudio de sensibilidad de la calculadora EEOI. Elaboración propia. 88

Tabla 7-1 Consumos de combustible debidos al sector marítimo y al transporte marítimo en Mtep. Fuente: OMI 2014, 2009 y BP Statistical Review. Elaboración propia. 98

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

OMI	Organización Marítima Internacional
EEDI	Índice de eficiencia energética de diseño
EEOI	Indicador operacional de la eficiencia energética
EE	Eficiencia energética
SEEMP	Plan de gestión de la eficiencia energética
SNV	Seguimiento, notificación y verificación
UE	Unión Europea
AJEMA	Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada
CO_2	Dióxido de carbono
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
MARPOL	Contaminación Marítima, Marine Pollution
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
UNCTAD	Conferencia de Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo
ANAVE	Asociación de Navieros Españoles
OMS	Organización Mundial de la Salud
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ICCT	Consejo Internacional sobre Transporte Limpio
INEGA	Instituto Energético de Galicia
MEPC	Comité de Protección del Medio Marino
CE	Consejo Europeo
GNL	Gas natural licuado
LED	Diodo emisor de luz
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit, unidad de contenedores normalizados de 20 pies.
BP	British Petroleum
MPA	Zona de protección marítima
US	Estados Unidos
BAC	Buque de aprovisionamiento para el combate
LHD	Landing Helicopter Dock
PIP	Periodo de Inmovilización Programada

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Presentación del proyecto

El mundo actual está cada vez más concienciado con el respeto al medio ambiente y la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles para nuestro desarrollo. El sector marítimo se está integrando en esta vía de avances tecnológicos respetuosos no sólo con el medio ambiente, sino con la rentabilidad económica.

La Organización Marítima Internacional (OMI) aprobó en Julio de 2011 el Índice de Eficiencia Energética de Proyecto (EEDI) para buques de nueva construcción, el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) y el Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI) [1]. La Unión Europea (UE) ha puesto en marcha en Abril de 2015 un plan de Seguimiento, Notificación y Verificación (SNV) para la reducción de emisiones de gases contaminantes por parte de buques mercantes, comenzando a realizarse a partir del 1 de Enero de 2018 [2]. Por su parte, la Armada de Estados Unidos lleva a cabo investigaciones y mejoras en la propulsión de sus buques en búsqueda de una mejor eficiencia energética (EE), tales como mejoras hidrodinámicas basadas en la inclusión de un segundo bulbo o mejoras en revestimiento del casco [3].

Las medidas adoptadas y los avances tecnológicos integrados en los buques, tanto mercantes como buques de guerra, buscan estos dos objetivos: reducir el consumo de los buques, consiguiendo así una mayor autonomía, y la disminución de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, para minimizar los efectos del cambio climático.

Como podemos apreciar, las fechas de los estudios y normativas impuestas por la OMI y la UE son muy recientes. La iniciativa en el desarrollo basado en un mejor aprovechamiento energético supondrá la mejor opción para el ahorro y sostenibilidad, que no ha hecho más que comenzar en los últimos años.

Por ello, en el presente proyecto se busca una mejora en la eficiencia de los buques de la Armada Española, adaptando el plan de mejora en la marina mercante dictado por la Unión Europea y la OMI. Con ello se obtendrían tres principales mejoras, la económica, siendo menor el coste del movimiento de nuestros buques, la medioambiental, con reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, y la de mejora de la autonomía, permitiendo con el mismo combustible, la navegación a mayor distancia sin necesidad de repostar.

Se sigue así el compromiso del mejor aprovechamiento de los recursos y la menor contaminación ambiental definida en su política ambiental en el documento Líneas Generales de la Armada, promulgado por el Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada (AJEMA) en septiembre de 2007: "*La Armada continuará impulsando medidas de protección ambiental en buques e instalaciones en tierra y mantendrá su política de minimizar el impacto sobre la vida marina y el medio ambiente durante la realización de actividades de preparación de la fuerza*" [4]

1.2 Objetivos del proyecto

El presente trabajo tiene como objetivos principales los siguientes:

1. Conocer el estado del arte en materia normativa en EE aplicable en el sector naval y las mejoras tecnológicas.
2. Determinar las condiciones de aplicación de la misma a buques de guerra.
3. Establecer las posibilidades de aplicación que desde el marco normativo y tecnológico nos ayude a mejorar la EE en los buques de la Armada.

Se propondrán tres medidas basadas en la normativa de la marina mercante para la mejora de la EE:

1. Sistema de Seguimiento, Notificación y Verificación (SNV) de las emisiones de CO_2 en los buques de la Armada. Con objeto de permitir su mejor estudio y posibles mejoras.
2. Implementar el Índice de Eficiencia Energética de Diseño (EEDI) en los buques de nueva construcción de la Armada. Con objeto de adquirir las mejores prestaciones de los nuevos buques en materia de EE.
3. Proponer el uso de una calculadora del Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI) para los buques de la Armada y en base a este, aplicar el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) definido por la OMI para la reducción del consumo energético a bordo.

Para el cumplimiento de los objetivos se seguirá la metodología del esquema representado en la Figura 1-1.

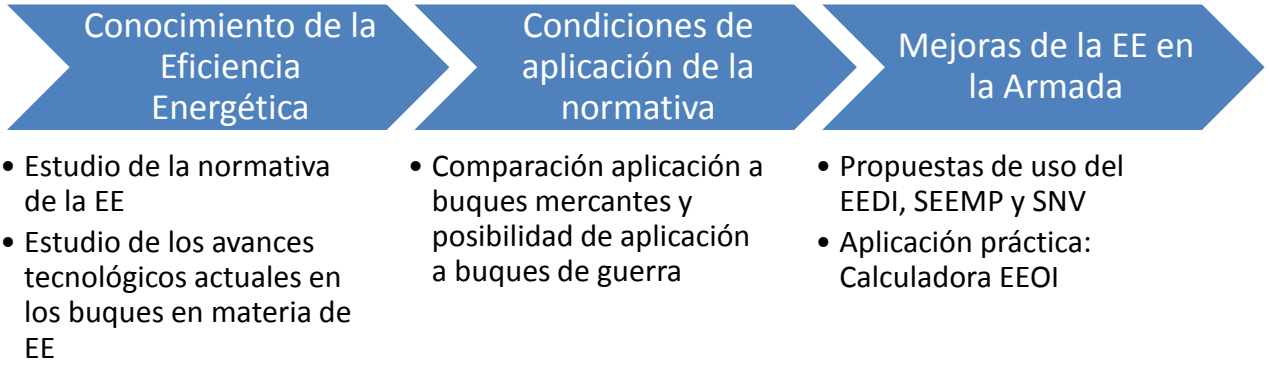

Figura 1-1 Metodología a seguir en el proyecto

1.3 Estructura de la memoria

La estructura del presente proyecto se organiza en cinco apartados, resumidos a continuación. (i) Introducción y objetivos, presenta el proyecto y sus objetivos, así como la metodología a seguir para conseguirlos. (ii) Estado del arte, expone la información acerca de la eficiencia energética en el sector marítimo, da explicación de la normativa actual en materia de EE para el sector estudiado y ofrece algunas de las principales mejoras en EE desarrolladas por parte de la marina mercante, flotas pesqueras y marinas de guerra, para la divulgación de los últimos avances dados en éste ámbito de la ingeniería. (iii) Desarrollo, que estudia la posibilidad de aplicación de las normativas en eficiencia energética de la marina mercante a la Armada Española, para lo cual se realiza una comparativa de los buques de guerra y mercantes, estableciéndose los criterios a seguir para su mejor implantación. Por último se propone el uso en los buques de guerra de una calculadora EEOI correspondiendo a la propuesta por la OMI, y además de la realización de un ejemplo de uso con datos de navegación. (iv) Resultados, en el que se muestran los resultados del ejemplo de uso de la calculadora EEOI con datos de navegación y unas conclusiones del desempeño de la misma. (v) Conclusiones y líneas futuras, con las que se cierra el TFG y con las que se pretende obtener elementos de estudio y fundamentos que permitan la continuidad y desarrollo futuro de esta línea de estudio que se abre con este trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Eficiencia energética

2.1.1 Introducción

Las necesidades energéticas humanas han aumentado en las últimas décadas. La necesidad de ahorro energético y el cambio climático son temas de gran importancia en la actualidad. La escasez de combustibles fósiles y la obligación de importarlos de otros países, junto a la grave crisis económica mundial ha llevado a la Unión Europea a la búsqueda de la mejora de la EE. Su objetivo, reducir el coste económico y ser más respetuosos con el medio ambiente, buscando, así, disponer de sistemas más sostenibles que los tradicionales. Consiguiendo un mejor aprovechamiento de los recursos necesarios para el normal funcionamiento de su industria, economía y aumento del desarrollo económico [5], [6].

Es por ello que se han llevado a cabo laboriosas investigaciones dirigidas por la Unión en el uso de las energías no renovables y la sustitución por energías alternativas. Los Gobiernos de los principales países han tomado conciencia a nivel global de los efectos del cambio climático y en consecuencia, la UE ha decidido establecer políticas que lleven hacia la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y reducción del consumo energético, sin afectar al progreso socio-económico [5].

Para comprender que se busca con estas normativas hay que primero definir que es eficiencia energética. Según la Asociación Ecologista de Defensa de la Naturaleza (AEDENAT), "*la eficiencia energética es la obtención de los mismos bienes y servicios energéticos, pero con mucha menos energía, con la misma o mayor calidad de vida, con menos contaminación, a un precio inferior al actual, alargando la vida de los recursos y con menos conflicto*".

El fomento de la EE por parte de la UE ha llevado a la Directiva 2012/27/UE de 25 de octubre de 2012 del Parlamento Europeo y del Consejo, en la que se establecen medidas para la consecución de unos objetivos enmarcados en el proyecto Europa 2020 de la Unión Europea [6].

Europa 2020 tiene tres objetivos principales (Figura 2-1) en el tema de energía: La reducción en un 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a niveles de 1990, que la producción del 20% de la energía eléctrica consumida provenga de energías renovables y el aumento en un 20% de la EE [7].

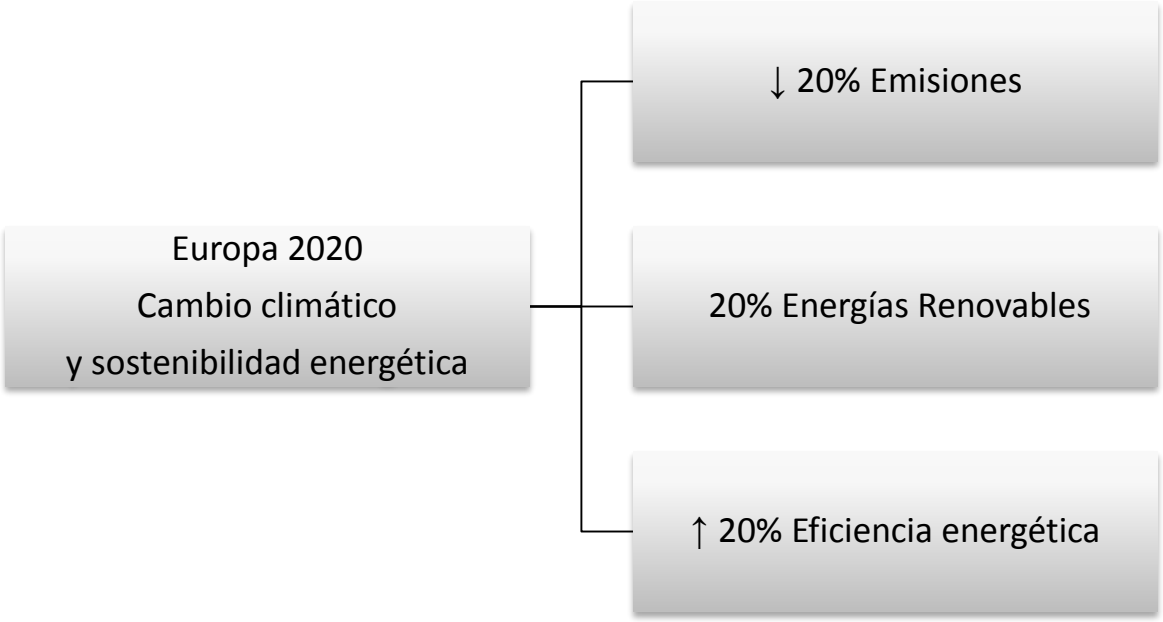

Figura 2-1 Objetivos energéticos Europa 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Comunicación de la Comisión Europa 2020: Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador [7].

España ha puesto en marcha una serie de medidas para la reducción del consumo energético y ahorro nacional mediante la mejora de la EE. El Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2014-2020 [8], desarrollado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), organismo perteneciente al Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital español, para el cumplimiento de la directiva de la Unión Europea [6]. El plan lleva al mejor aprovechamiento de la energía y auditorías energéticas en edificios, organismos públicos, transportes e industria. De esta forma, se presenta una serie de medidas para el control y seguimiento de estas mejoras de la eficiencia energética en diferentes ámbitos para el cumplimiento de los objetivos definidos en el plan Europa 2020 [7].

Proyecto que seguirá en desarrollo con el objetivo Europa 2030 en el que se busca una reducción en un 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con niveles de 1990. El Consejo Europeo (CE) a 23 y 24 de Octubre de 2014 afirmó la importancia de decrementar las emisiones de gases de efecto invernadero, refrendando el objetivo Europa 2030 e instando al estudio y mejora de la eficiencia energética en el transporte y la disminución de las emisiones [9]. En línea con la hoja de ruta de la energía para 2050 en la que se tiene como objetivo una economía hipocarbónica y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80-95% antes de dicha fecha. Se considera así que el ahorro energético y la eficiencia energética son la ruta óptima para las cuestiones de seguridad energética, la dependencia externa, el aumento de los precios de los combustibles fósiles y las preocupaciones ambientales [10].

Según los estudios realizados en esta materia por la UE, las estimaciones prevén que decline la producción energética proveniente de combustibles fósiles y un aumento de las energías renovables, pasando de un 17% en 2015 a un 36% del total producido en 2050. Tal y como se puede ver en la Figura 2-2, la producción energética de la UE se reducirá en unos 200 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), unidad de energía equivalente a la liberada por la combustión de un millón de toneladas de crudo de petróleo [11], 1 Mtep equivale a 12 TWh. Pasando de 760 Mtep en 2015 a alrededor de 660 Mtep en 2050.

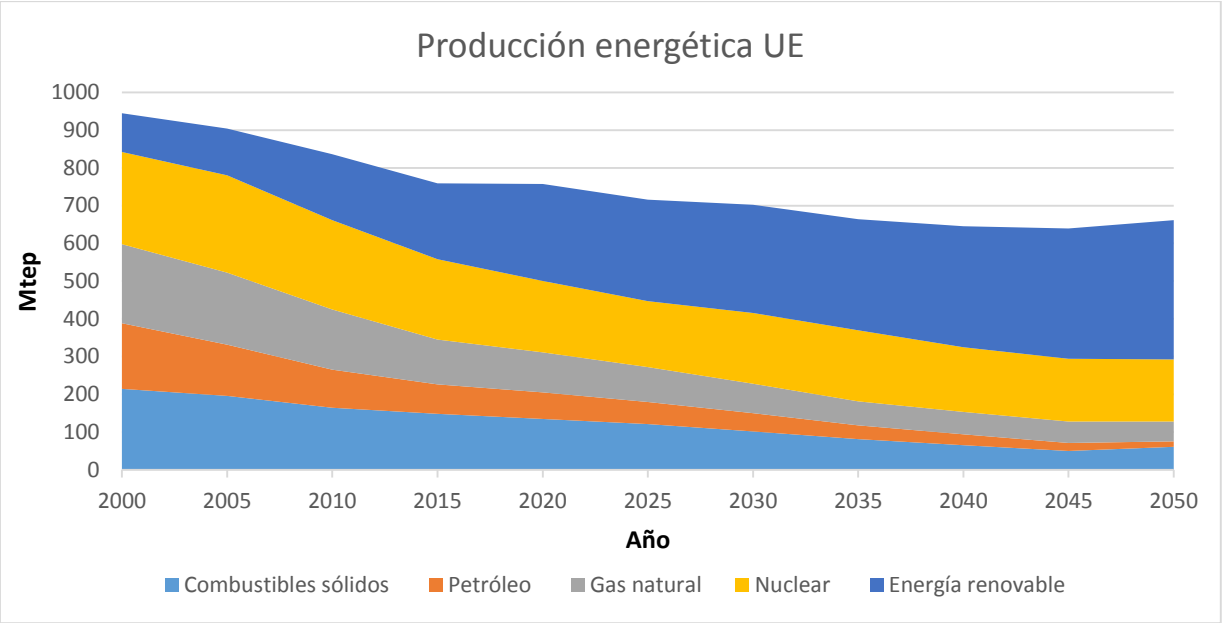

Figura 2-2 Producción energética UE28. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12].

Por otro lado, la demanda energética en la UE también se espera que se vea reducida, pasando de 1666 Mtep en 2015 a una estimación para 2050 de 1490 Mtep, como se puede ver en la Figura 2-3. Pese a la mayor producción de energías limpias por parte de Europa, no será así con la energía adquirida de otros países, siendo la previsión del estudio que el 25% de la energía consumida en la UE para 2050 será renovable.

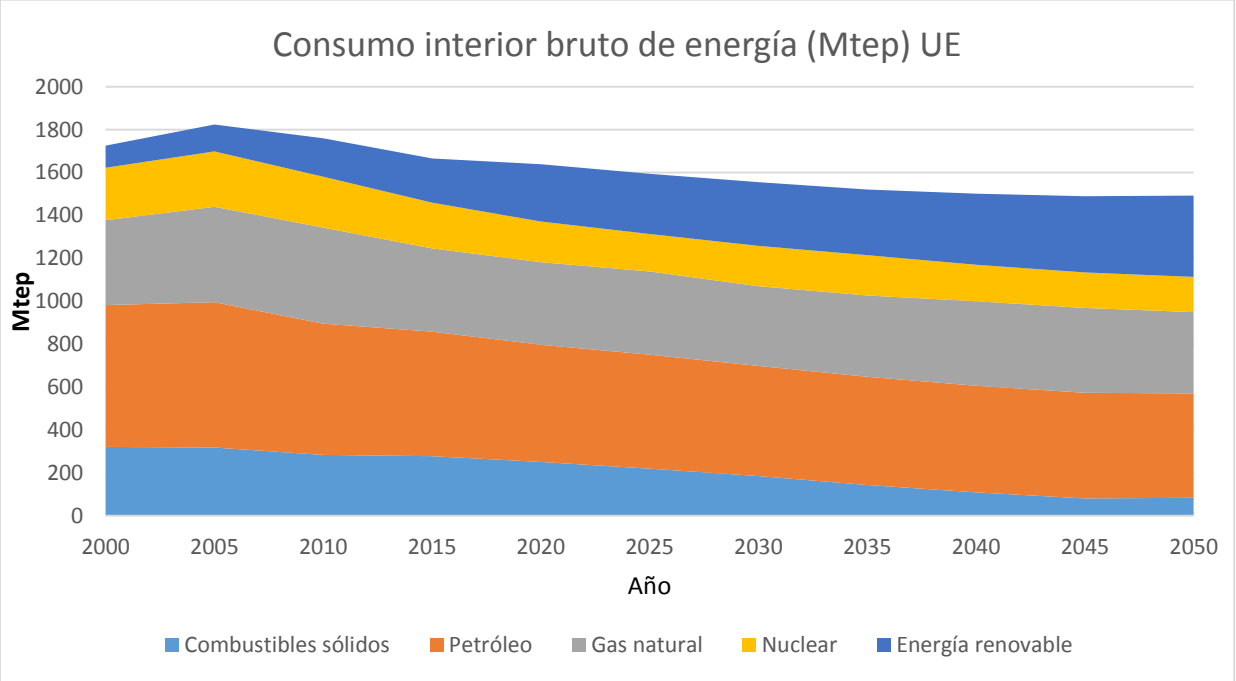

Figura 2-3 Estimaciones consumo interior bruto de energía UE28. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12].

Comparando estas dos últimas tablas (Figura 2-2, Figura 2-3) destaca la diferencia de energía producida frente a la consumida en Europa. Es decir, uno de los principales problemas para la UE es la dependencia energética [12].

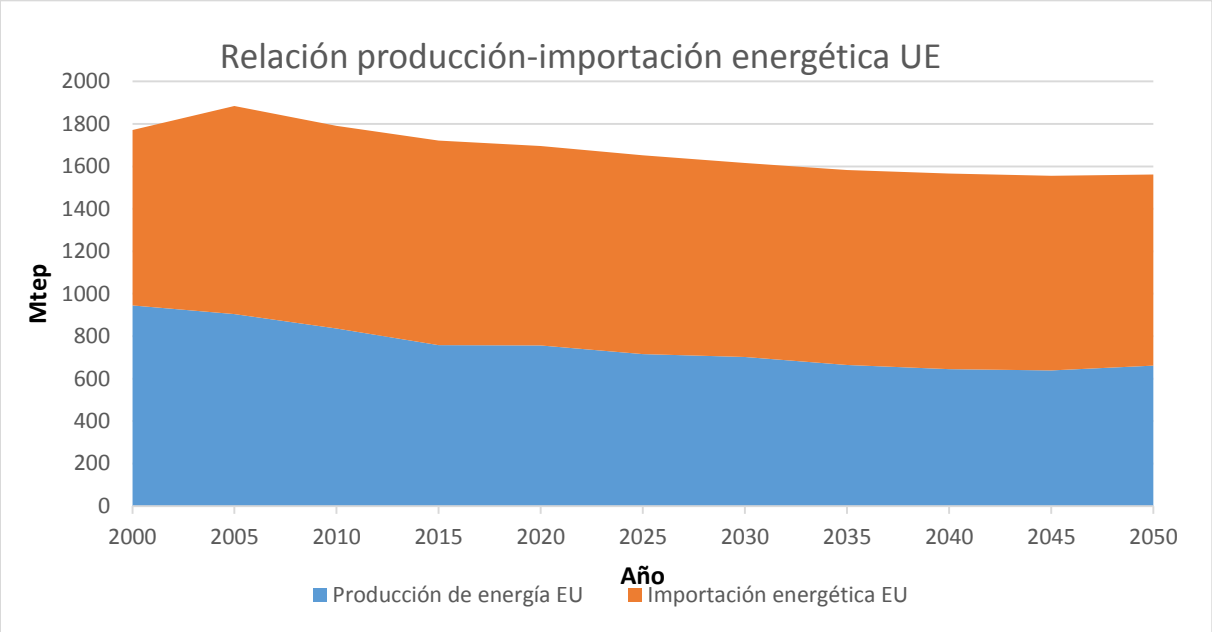

Figura 2-4 Relación producción-importación energía UE. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12].

La Figura 2-4 expone esta diferencia entre la producción de energía y necesidades energéticas de la UE y la Figura 2-5 el mismo caso en España. La escasez de yacimientos de petróleo y gas natural convencionales en Europa lleva a la obligación de tener que importarlos de otros países. Esto empuja a la Unión a buscar otras fuentes como son el gas de esquisto, del cual si existen yacimientos en Europa, con el que poder producir gas natural a partir del mismo, pero insuficiente para suplir la demanda [13].

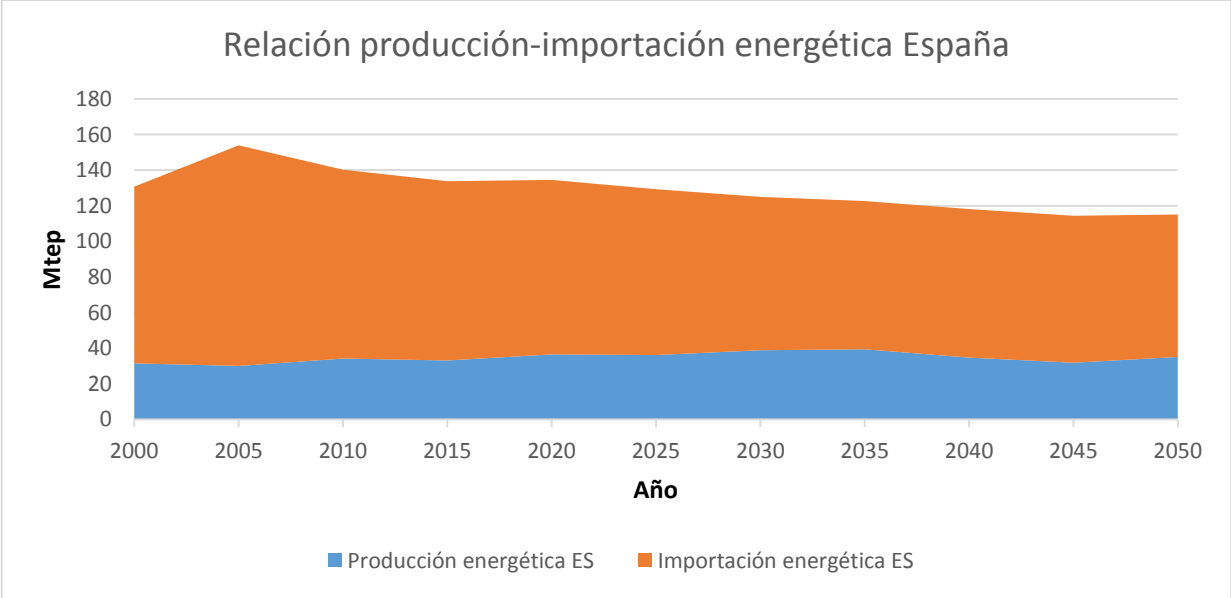

**Figura 2-5 Relación entre producción e importación de energía en España.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12].**

Por lo tanto, la dependencia energética europea se verá incrementada de un 53% en 2010 a un 58% en 2050. Para el caso de España, la dependencia es mayor, un 75% en 2015, si bien se prevé una reducción de la misma para una dependencia del 69% para 2050 [12], véase en la Figura 2-6. Este es uno de los hechos que justifican la necesidad de conseguir una mejor gestión del uso de la energía en Europa y en España, en todos los sectores.

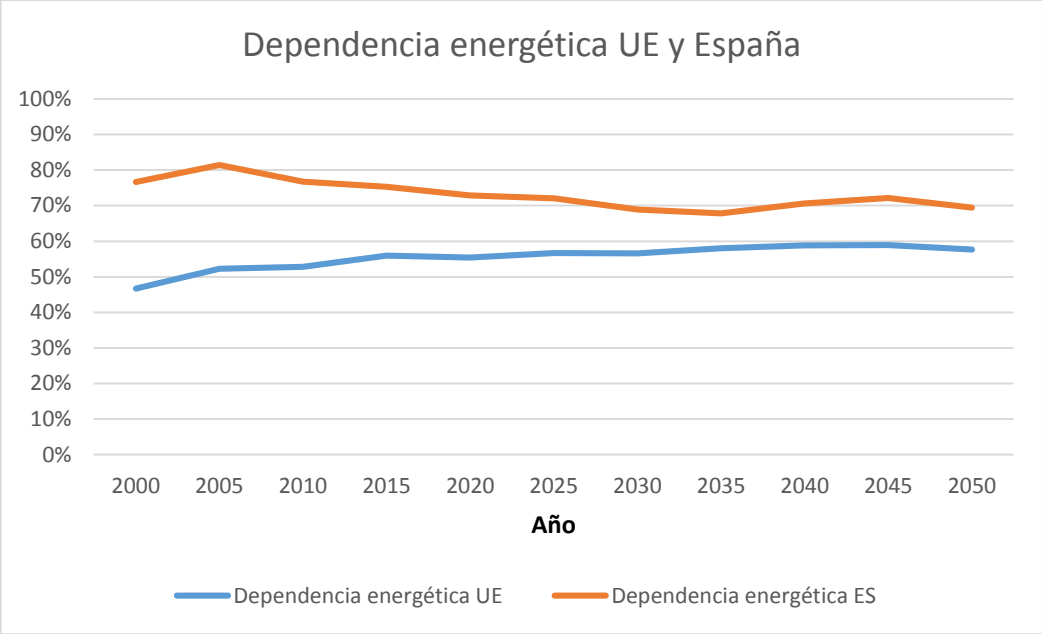

Figura 2-6 Dependencia energética europea y española. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de EU Reference Scenario 2016 [12]

En lo referente al transporte marítimo, en este marco de políticas medioambientales, reducción de consumos y optimización del aprovechamiento energético, las principales organizaciones promulgan medidas sobre el asunto. En julio de 2011, la OMI adopta una serie de medidas técnicas y operativas, el Índice de Eficiencia Energética de Proyecto (EEDI) para los buques nuevos, el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) y el Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI). Estas medidas aportarán mejoras desde el punto de vista de la reducción del aumento previsto de las emisiones de gases de efecto invernadero, pero insuficientes para llegar a las reducciones absolutas de las emisiones del transporte marítimo internacional necesarias para alcanzar el objetivo global establecido en la Cumbre del clima de París de las Naciones Unidas de limitar a 2°C el aumento de las temperaturas mundiales [5].

La UE, viendo la necesidad de aplicar mayores medidas que las dirigidas por la OMI, promulga un reglamento a 29 de abril de 2015 en el que establece un sistema de Seguimiento, Notificación y Verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo en la Unión [2]. De esta forma podrá llevar un control real de las mismas y poner en marcha mejoras en los buques en lo referido a eficiencia energética.

En la siguiente figura (Figura 2-7) se exponen en orden cronológico, las principales medidas adoptadas por la OMI y por la UE.

Figura 2-7 Principales medidas y publicaciones OMI-UE. Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de datos de OMI y normativa UE.

2.1.2 Impacto del transporte marítimo en el consumo energético

El sector marítimo supone el principal medio de transporte del comercio internacional, representando el 80% del mismo y suponiendo el 70% del valor financiero según datos de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD) [14], [15]. Es un sector imprescindible de importancia estratégica tanto en el desarrollo económico global; con generación de empleo e ingresos, facilita el comercio, apoya las cadenas de suministro para la industria; como a nivel social, protección del medio ambiente, conservación de los recursos y unión de comunidades.

El Review of Maritime Transport (Informe sobre el Transporte Marítimo) de las Naciones Unidas es un estudio acerca de las cifras que mueve este medio de transporte cada año. En el último informe, de 2016, destaca el crecimiento de la flota mundial en un 3,5%. En la Tabla 2-1 se puede observar este aumento sucesivo a nivel mundial del número de buques así como el tonelaje de registro bruto, TRB, GT o arqueo bruto, que se calcula con la siguiente fórmula $TRB = (0{,}2 + 0{,}02 \times \log_{10} V) \times V$, siendo V el volumen total de todos los espacios cerrados del buque expresado en metros cúbicos [16], de la flota mundial con datos procedentes de la Asociación de Navieros Españoles (ANAVE) [17].

Como se puede observar, las variaciones en el número de buques son bien distintas según el tipo de buque y la época. Por ejemplo, buques como los de carga general (22700 de buques en 1980 y en 2015 16700 de buques) que son menos empleados en favor de otros buques como los portacontenedores (700 de buques en 1980 frente a 5100 de buques en 2015). En general, ha ido aumentando progresivamente el número total de buques. Creciendo entre los años 2010 y 2015 en 7400 buques la flota mundial, y sólo en el último intervalo entre el año 2015 y 2016 en 2200 buques.

Flota mercante mundial por tipos de buques																
Tipos de buques	**1980**		**1985**		**1990**		**1995**		**2000**		**2005**		**2010**		**2015**	
	NB	**TRB**	**NB**	**TRB**	**NB**	**TRB**	**NB**	**GT**	**NB**	**GT**	**NB**	**GT**	**NB**	**GT**	**NB**	**GT**
Petroleros	7,5	201,2	7,1	162,1	6,9	154,5	6,8	159,8	7,3	163,7	7	170,9	7,4	209,8	7,7	240
Gaseros	0,6	7,4	0,8	9,9	0,8	10,6	0,9	14	1,1	17,9	1,2	24,7	1,5	46,1	1,7	56,3
Graneleros	4,3	83,3	5	110,3	4,8	113,4	5,7	129,7	6,1	149,4	6,5	175,8	8	250,5	10,9	405,4
Carga General	22,7	81,3	21,7	80,1	19,7	72,7	18,9	66,2	18,9	65,6	17,7	59,6	18,6	65,5	16,7	62,7
Portacontenedores	0,7	11,3	1	18,4	1,2	23,9	1,6	35,1	2,5	55,3	3,2	85,8	4,7	145,5	5,1	200,3
Otros mercantes*	6,2	15,4	7,6	18,4	6,8	23,5	8,6	46,2	10,1	63,5	11,4	84,8	13,8	123,2	14,5	141,6
Total mercantes	42	399,9	43,2	399,2	40,2	398,6	42,5	451	46	515,4	47	601,6	54	840,6	56,6	1106,3
Otros no mercantes	31,7	16,3	33,2	17	38	24,9	38	24,8	40,8	28,2	42,9	31,6	48,2	42,1	53	59,1
Total	73,7	416,2	76,4	416,2	78,2	423,5	80,5	475,8	86,8	543,6	89,9	633,2	102,2	882,7	109,6	1165,4
* Incluye quimiqueros, otros buques tanque, ferries, ro-ros, transportes de vehículos, etc.																
GT: Millones de GT TRB: Millones de TRB NB: Miles de buques																

Tabla 2-1 Flota mercante mundial. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe de Clarkson Research Services Limited (CRSL) [18].

A continuación en la Tabla 2-2 se cuantifica la importancia del transporte marítimo, representando la materia transportada según el tipo de carga desde el año 2000 hasta el 2016, intervalo en el cual casi se ha duplicado el número de toneladas de carga. En proporción con el aumento del número de buques, también viene al alza el tráfico marítimo mundial. Incrementando en un 2% el número de toneladas transportadas en 2015 con respecto al año anterior y siendo la estimación del crecimiento en un 2,2 % para el año 2016. Según los diferentes estudios de la OMI en cuanto a emisiones de efecto invernadero procedentes del sector marítimo, el consumo de los buques no ha hecho más que crecer hasta el año 2007, hecho que si bien la OMI lo relaciona con el descenso de velocidad media de los buques a lo que también se puede relacionar con el comienzo de la crisis económica en 2008 [19].

Año	Graneles sólidos (1)		Otros graneles sólidos		Crudo y producción del petróleo		Otros graneles líquidos (2)		Carga en contenedores		Carga general convencional		Total tráfico marítimo	
	t	t·milla	t	t·milla	t	t·milla	t	t·milla	t	t·milla	t	t·milla	t	t·milla
2000	1219	6516	1054	6159	2238	9607	304	1117	609	3184	837	4377	6261	30960
2001	1262	6806	1046	6093	2207	9326	307	1141	641	3349	838	4379	6301	31094
2002	1307	6954	1098	6103	2190	8968	323	1193	692	3602	880	4582	6490	31402
2003	1388	7466	1162	6515	2349	9708	342	1259	802	4219	817	4300	6860	33467
2004	1509	8086	1260	7297	2498	10403	359	1334	911	4790	775	4074	7312	35984
2005	1609	8647	1307	7468	2591	10741	377	1379	1001	5278	754	3976	7639	37489
2006	1715	9257	1397	8133	2663	11056	406	1514	1091	5769	739	3906	8011	39635
2007	1851	9991	1500	8449	2712	11026	432	1631	1215	6425	657	3473	8367	40995
2008	1953	10511	1478	8203	2728	11221	438	1688	1271	6737	710	3765	8578	42125
2009	2026	11027	1313	7213	2653	10652	453	1717	1133	6033	689	3668	8267	40310
2010	2264	12359	1472	8230	2754	11240	507	1968	1291	6839	742	3933	9030	44569
2011	2398	13059	1589	8839	2762	11401	550	2216	1412	7472	729	3856	9440	46843
2012	2608	14166	1624	9085	2821	11887	556	2237	1463	7678	768	4028	9840	49081
2013	2761	14726	1721	9669	2793	11719	572	2266	1543	8077	796	4166	10186	50623
2014	2982	15786	1711	9931	2770	11742	585	2303	1638	8576	825	4318	10511	52656
2015	2947	15713	1741	10036	2898	12218	601	2370	1686	8771	845	4397	10718	53505
2016	2934	15514	1768	10266	3001	12650	623	2499	1762	9150	869	4512	10957	54591
15/14 (%)	-1,2	-0,5	1,8	1,1	4,6	4,1	2,7	2,9	2,9	2,3	2,4	1,8	2	1,6
16/15 (%)	-0,4	-1,3	1,6	2,3	3,6	3,5	3,7	5,4	4,5	4,3	2,8	2,6	2,2	2
(1) Carbón, mineral de hierro, grano								t: Millones de toneladas						
(2) Gases licuados y productos químicos Datos 2016 estimados								t·milla: Miles de millones de toneladas milla						

Tabla 2-2 Tráfico mundial por vía marítima. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe de Clarkson Research Services Limited (CRSL) [18].

En los estudios de emisiones de gases de efecto invernadero de la OMI de 2009 y 2014 se detallan los consumos de combustible en millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) del sector marítimo (siendo el conjunto total de actividades marítimas de transporte, comercio, pesca, recreo y otras) y debidas al transporte marítimo (siendo únicamente las actividades de transporte y comercio). Los datos de consumo de combustible de los buques son estimaciones realizadas por la OMI [20], debido a la inexistencia de una monitorización plena del uso del combustible en el sector, estudiándolas para un escenario pesimista y optimista, obteniendo una media de consumos. Se toma como punto de partida 1990, que es el año fijado de referencia para conseguir los objetivos de disminución de las emisiones. En la Tabla 7-1 del anexo se recogen los datos de consumos de sector marítimo, con los que están realizadas las siguientes figuras (Figura 2-8, Figura 2-9). Para los datos del consumo mundial de petróleo se ha tenido como referencia un Estudio estadístico sobre la energía de 2016 de la empresa petrolera "British Petroleum" (BP) [21].

El consumo de los buques desde 1990 ha ido en incremento hasta el año 2006. Tras el descenso en 2007 y años sucesivos, inició una subida a partir del año 2011, último año con datos de estudio de la OMI, coincidiendo con la salida de la crisis económica global. Esta evolución se puede observar en la Figura 2-8 con datos estimativos para el sector marítimo.

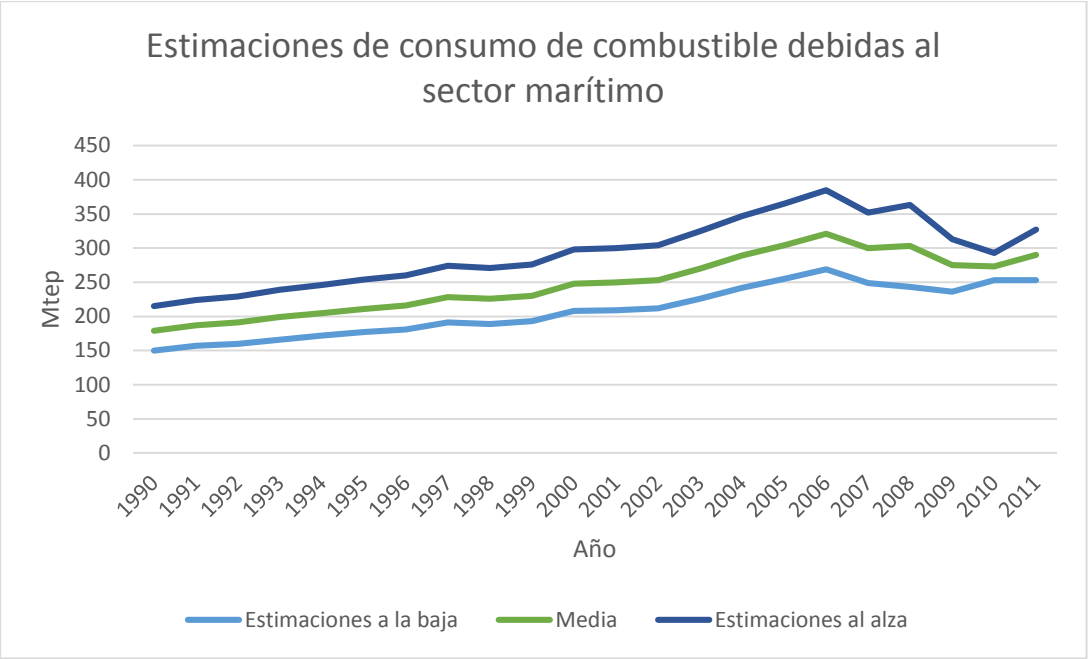

Figura 2-8 Evolución del consumo de combustible debido al sector marítimo. Fuente: Elaboración propia a partir de Estudio GHG OMI 2014 y 2009 [20], [22].

Dentro del sector marítimo, la actividad que más consumo realiza es la del transporte y comercio marítimo, siendo del orden del 80-85% del total. En la Figura 2-9 se muestra la evolución cronológica del consumo del transporte marítimo para los años estudiados.

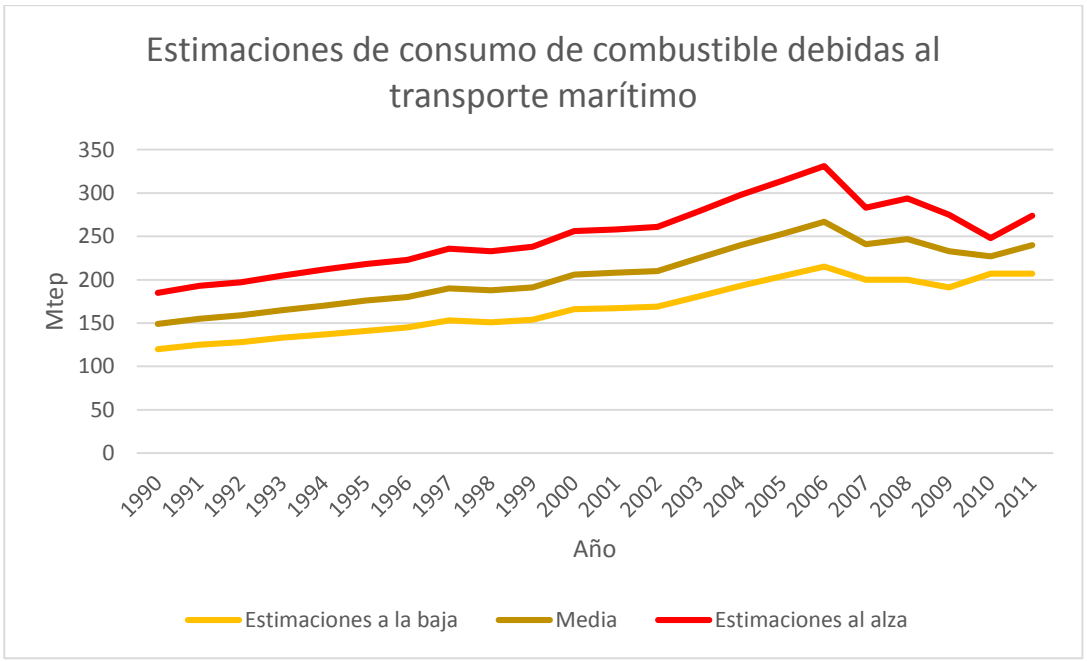

Figura 2-9 Evolución del consumo de combustible debidas al transporte marítimo. Fuente: Elaboración propia a partir de Estudio GHG OMI 2014 y 2009 [20], [22].

El consumo de petróleo y sus derivados en el sector marítimo es de relevancia en el uso total del mismo, siendo la media desde 1990 hasta 2011 de un 6,8% (comparando los datos de las fuentes estudiadas) (Figura 2-10) [21], [22]. Correspondiendo el consumo del sector marítimo un 7% del total. Considerando así a las actividades marítimas un grupo de importancia en el aprovechamiento de los combustibles fósiles, teniendo el potencial de la reducción de este consumo mediante la mejora de la EE a bordo de los buques.

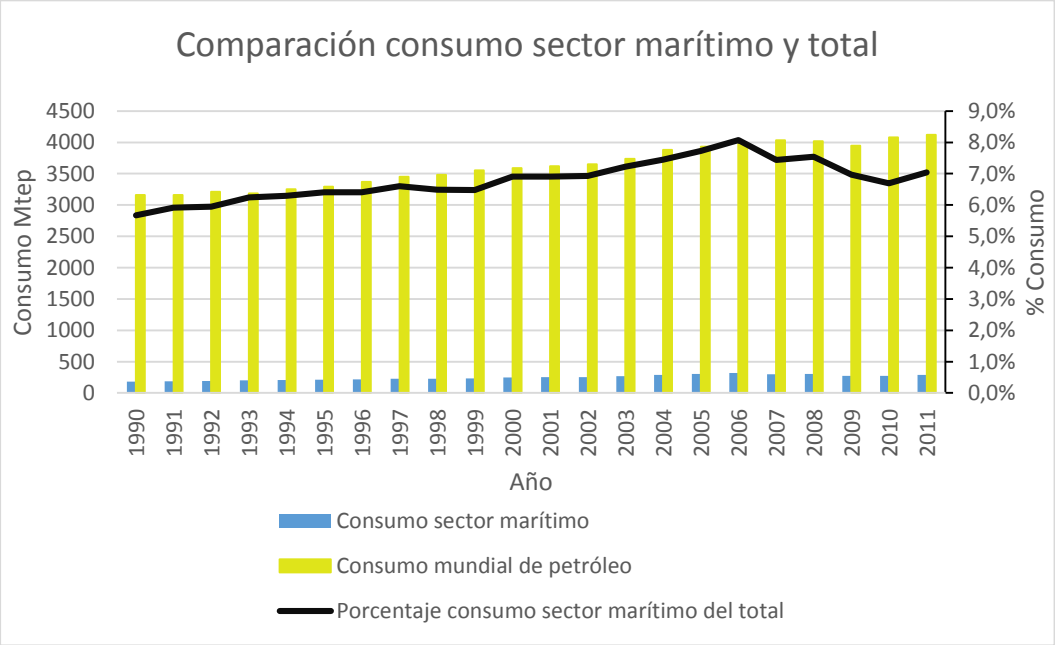

Figura 2-10 Comparación cronológica de consumo de combustible sector marítimo frente al total consumido. Fuente: Estudio Elaboración propia a partir de estudios de la OMI y BP [20]-[22]

2.1.3 Impacto del transporte marítimo en el medio ambiente

Aparentemente, la contaminación producida por el sector marítimo parece ser muy escasa en comparación con otras fuentes como el transporte terrestre o la industria, debido a la cercanía a la población. Es así una contaminación más invisible a la población pero no por ello menos dañina.

El Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL, Contaminación Marítima del inglés, Marine Pollution) de la OMI es la guía de referencia de normativas con respecto a la contaminación de los buques. Actualmente, la OMI está compuesta por 172 países miembros y tres estados asociados [23]. Mediante las normativas adoptadas desde 1973, se ha conseguido minimizar el aumento de la contaminación procedente del transporte marítimo. En el presente trabajo nos centraremos en la emisión de gases nocivos a la atmósfera, expuesto en el anexo VI del Convenio MARPOL que es el que nos atañe en cuanto a la mejora de la EE. Este anexo, ratificado por 60 estados (que suponen el 84% de la flota mundial), fue firmado en 1997 y se encuentra en vigor desde 19 de Mayo de 2005, con el que se compromete a la disminución de las emisiones de gases nocivos procedentes de los buques mediante la implementación de normativas y ejecución de investigaciones y estudios divulgativos [24].

El tráfico marítimo conlleva las siguientes consecuencias para el medio ambiente:

- Descarga al mar de sustancias nocivas sólidas y líquidas.
- Aguas negras y basuras.
- Vertidos de hidrocarburos.
- Ruidos provocados por las hélices, motores de buques o sonar.
- Descarga al mar de residuos de limpieza de tanques.
- Emisión de gases nocivos.

Según el último estudio sobre la emisión de gases de efecto invernadero de la OMI, en el año 2012, el transporte marítimo fue el responsable de la emisión de 796 millones de toneladas de CO_2 a la atmósfera, un 2,2% del total de emisiones producidas por el hombre [22]. Si incluimos todas las actividades del sector marítimo, esto supone la emisión de 938 millones de toneladas, un 2,6% de las

emisiones totales. Las emisiones suponen un 14% menos que en 2007, si bien si aumentaron las emisiones de CO_2 globales de la actividad humana.

En la siguiente tabla (Tabla 2-3) podemos ver el aumento de las emisiones de CO_2 totales en el periodo entre el 1990 y 2012, y de la misma forma, el incremento de emisiones debidas al sector marítimo, medidas en millones de toneladas de CO_2. El aumento de las emisiones debidas al sector marítimo disminuye sin embargo a partir de 2009, año en que comienza a descender hasta 2012, mientras el resto de emisiones continúan al alza. Al igual que como sucedía con el consumo (Figura 2-10), los efectos de la crisis económica global han provocado el inferior número de desplazamientos de buques, con ello menor consumo de combustible y en consecuencia, menores emisiones de gases de efecto invernadero debidos a este sector.

Año	Emisiones de CO_2 totales	Emisiones de CO_2 debidas al sector marítimo	% de las emisiones totales	Emisiones debidas al transporte marítimo	% de las emisiones totales
1990	22354	562	2,5%	468	2,1%
1991	22629	587	2,6%	488	2,2%
1992	22405	598	2,7%	498	2,2%
1993	22383	624	2,8%	519	2,3%
1994	22765	644	2,8%	535	2,4%
1995	23263	663	2,8%	551	2,4%
1996	23802	679	2,9%	565	2,4%
1997	24162	717	3,0%	596	2,5%
1998	24096	709	2,9%	590	2,4%
1999	24052	722	3,0%	601	2,5%
2000	24668	778	3,2%	647	2,6%
2001	25251	784	3,1%	652	2,6%
2002	25471	794	3,1%	660	2,6%
2003	27015	849	3,1%	706	2,6%
2004	28364	907	3,2%	755	2,7%
2005	29428	955	3,2%	795	2,7%
2006	30462	1008	3,3%	838	2,8%
2007	31125	1100	3,5%	885	2,8%
2008	32042	1135	3,5%	921	2,9%
2009	31687	978	3,1%	855	2,7%
2010	33505	915	2,7%	771	2,3%
2011	34866	1022	2,9%	850	2,4%
2012	35464	938	2,6%	796	2,2%
Media	27011	812	3,0%	676	2,5%

Tabla 2-3 Relación de emisiones de CO_2 (millones de toneladas) debidas al sector marítimo y el total emitido por la actividad humana. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Estudio OMI 2014, Estudio OMI 2009 y el Centro de Análisis e Información del CO_2 [20], [22], [25]

La cantidad de CO_2 emitido a la atmósfera debido al sector marítimo supone una media del 3% del total emitido por la actividad humana. Porcentaje que si bien ha ido siendo incrementado hasta el año 2008, a partir de entonces ha comenzado a disminuir, mientras que el CO_2 emitido por el conjunto de todos los sectores, no ha parado de aumentar. En la Figura 2-11 se compara la cantidad de este gas emitido a la atmósfera, frente a las emisiones totales, que hasta 2009 el porcentaje de emisiones de este sector con respecto al total mundial fue al alza, y desde entonces en decremento, hasta las últimas fechas recogidas por este estudio [22].

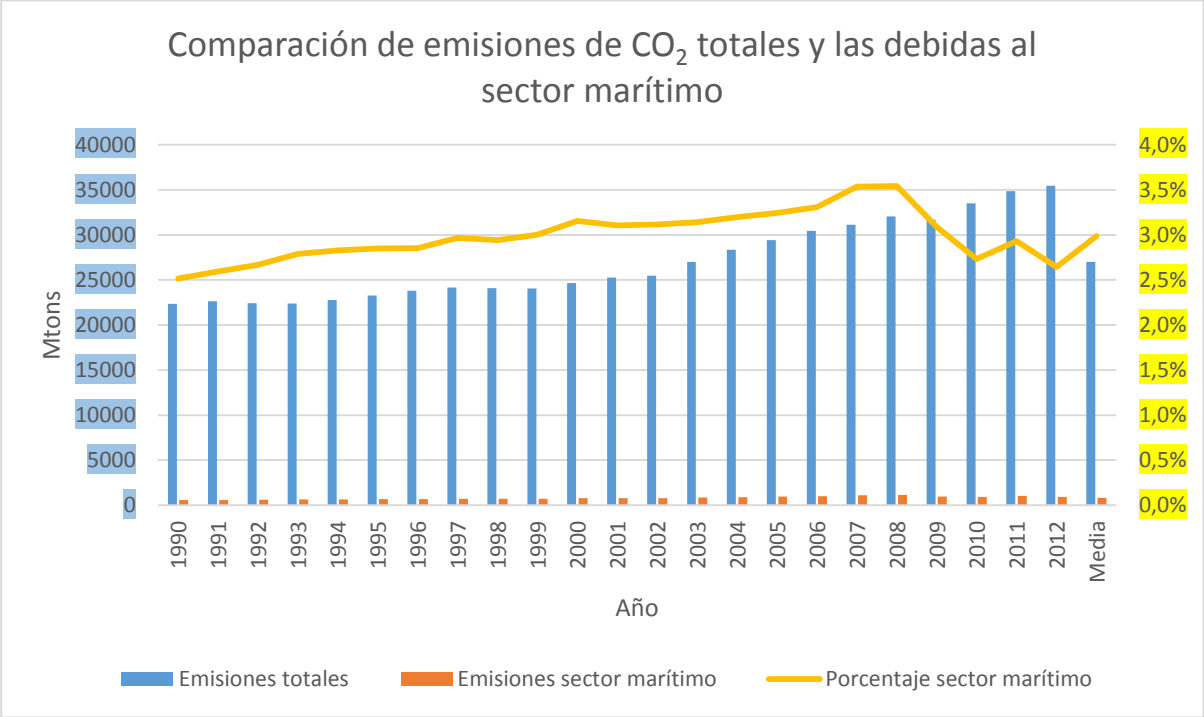

Figura 2-11 Comparación de emisiones de CO_2 totales y debidas al sector marítimo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Estudio OMI 2014, Estudio OMI 2009 y el Centro de Análisis e Información del CO_2 [20], [22], [25].

Estos estudios sobre los consumos y emisiones tienen una gran incertidumbre (de un 20% de error según la OMI) [20]. Además, como indica en el tercer estudio sobre las emisiones de la OMI, se tienen errores debido a la incertidumbre de las fuentes estadísticas de consumo de combustible, diferencias de calidad de datos entre países pertenecientes y no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), números de datos idénticos entre año y año de algunos países y grandes variaciones entre año y año en algunos otros.

A continuación (Tabla 2-4) se muestran las emisiones de CO_2 equivalente, en millones de toneladas, correspondiendo a la suma de CO_2, metano y dióxido e nitrógeno para el estudio de los datos de gases de efecto invernadero según la OMI [20]. Se da el mismo caso que con el CO_2, aumentando de forma global las emisiones pero disminuyendo las asociadas al sector marítimo a partir del año 2009. La OMI relaciona esta disminución de las emisiones a la reducción de la velocidad de diseño de los buques en un 12% de media lo que supuso un menor consumo de combustible, bajando un 27%. En algunas categorías de buques la reducción de uso de la energía fue mayor, siendo de un 50% en petroleros y algunas categorías de portacontenedores en un 70%.

Sin embargo la OMI no ve en esto una solución, pues indican que una menor velocidad y su consecuente disminución de consumo de combustible, no se relacionan con un aumento en la EE. Además será necesario un mayor número de barcos y días en la mar para realizar el mismo transporte. El informe, que analiza posibles escenarios futuros económicos y de desarrollo tecnológico, incide en el aumento entre un 50% y un 250% de las emisiones debidas al sector marítimo para 2050 [22]. Por ello, la OMI aboga por la mejora en la EE de los buques, para lo cual lanzó sus normativas explicadas más adelante.

Año	Emisiones de CO_2 equivalente totales	Emisiones de CO_2 equivalente debidas al sector marítimo	% de las emisiones totales	Emisiones debidas al transporte marítimo	% de las emisiones totales
1990	25306	576	2,3%	480	1,9%
1991	25532	602	2,4%	500	2,0%
1992	25479	613	2,4%	510	2,0%
1993	25231	640	2,5%	532	2,1%
1994	25716	660	2,6%	548	2,1%
1995	26237	679	2,6%	565	2,2%
1996	26808	696	2,6%	579	2,2%
1997	27392	735	2,7%	611	2,2%
1998	27217	727	2,7%	605	2,2%
1999	27007	740	2,7%	616	2,3%
2000	27588	797	2,9%	663	2,4%
2001	28036	803	2,9%	668	2,4%
2002	28321	813	2,9%	676	2,4%
2003	29851	870	2,9%	723	2,4%
2004	31272	929	3,0%	773	2,5%
2005	32393	978	3,0%	814	2,5%
2006	33562	1032	3,1%	858	2,6%
2007	34386	1121	3,3%	903	2,6%
2008	35074	1157	3,3%	940	2,7%
2009	34755	998	2,9%	873	2,5%
2010	36590	935	2,6%	790	2,2%
2011	37989	1045	2,8%	871	2,3%
2012	38617	961	2,5%	816	2,1%
Media	**30016**	**831**	**2,8%**	**692**	**2,3%**

Tabla 2-4 Estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero (millones de toneladas de CO_2 equivalente). Fuente: Elaboración propia a partir de Estudios de la OMI 2014 y 2009 y Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) [20], [22], [26].

Es de destacar el pequeño porcentaje (un 2,8%) de emisiones de gases de efecto invernadero que supone la actividad del transporte marítimo comparando con otras actividades como el transporte de carga rodada, tal y como se dijo en el apartado 2.1.2 supone el 80% de la mercancía transportada mundial. Podría decirse que el medio de transporte más limpio es el marítimo, siendo el que tiene un menor emisión de CO_2 por tonelada de carga y distancia recorrida. Ejemplo de ello son los buques clase Triple E de la empresa de transporte y energía MAERSK, en los que, por su relación de capacidad de carga y consumo de combustible, emiten 3 gramos de CO_2 por cada tonelada de carga y kilómetro navegado (Figura 2-12).

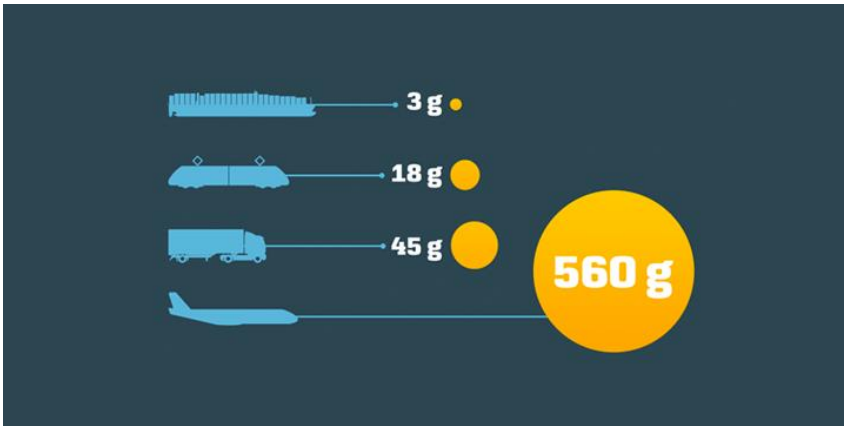

Figura 2-12 Gramos de CO_2 emitidos por tonelada de carga y kilómetro recorrido. Fuente: Maersk [27]

Aun así, la actividad del sector marítimo conlleva una contaminación significativa. Uno de los datos a tener en cuenta es la importancia de las sustancias nocivas emitidas por el sector marítimo. El combustible utilizado por los buques contiene un alto porcentaje de azufre, siendo su contenido medio del 2,7% en masa, un 90% más alto que el diésel convencional usado por el transporte rodado [28].

La contaminación atmosférica producida por los buques influye de forma notable en las zonas de costa cercanas a las rutas marítimas y sobre todo de gran afluencia de paso. Se estima que cerca del 70% de las emisiones debidas al sector marítimo ocurren a 400 kilómetros de costa [29], contribuyendo significativamente a los problemas de calidad del aire en zonas costeras. En aguas europeas, el 89% de las emisiones se producen a menos de 50 millas y el 97% a menos de 100 millas de la costa. El incremento del flujo comercial marítimo de entradas y salidas de puerto, no sólo afecta a los mayores puertos, sino también a los de menor entidad [29].

En las siguientes gráficas (Figura 2-13, Figura 2-14) podemos observar la contaminación atmosférica media anual del año 2005 y la debida al sector marítimo. Como podemos ver, en las zonas de principales rutas marítimas, la actividad marítima supone sobre el 70-90% de las emisiones del total.

La contaminación atmosférica marítima destaca en el caso del dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. En las zonas de principales rutas marítimas y zonas de paso abundante de buques como el Estrecho de Gibraltar, se dan niveles de entre 8 y 10 microgramos de dióxido de nitrógeno por metro cúbico y mayores de 2 microgramos de dióxido de azufre por metro cúbico, siendo el límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 40 microgramos por metro cúbico de media anual de dióxido de nitrógeno y de 20 microgramos por metro cúbico de media en 24 horas de dióxido de azufre.

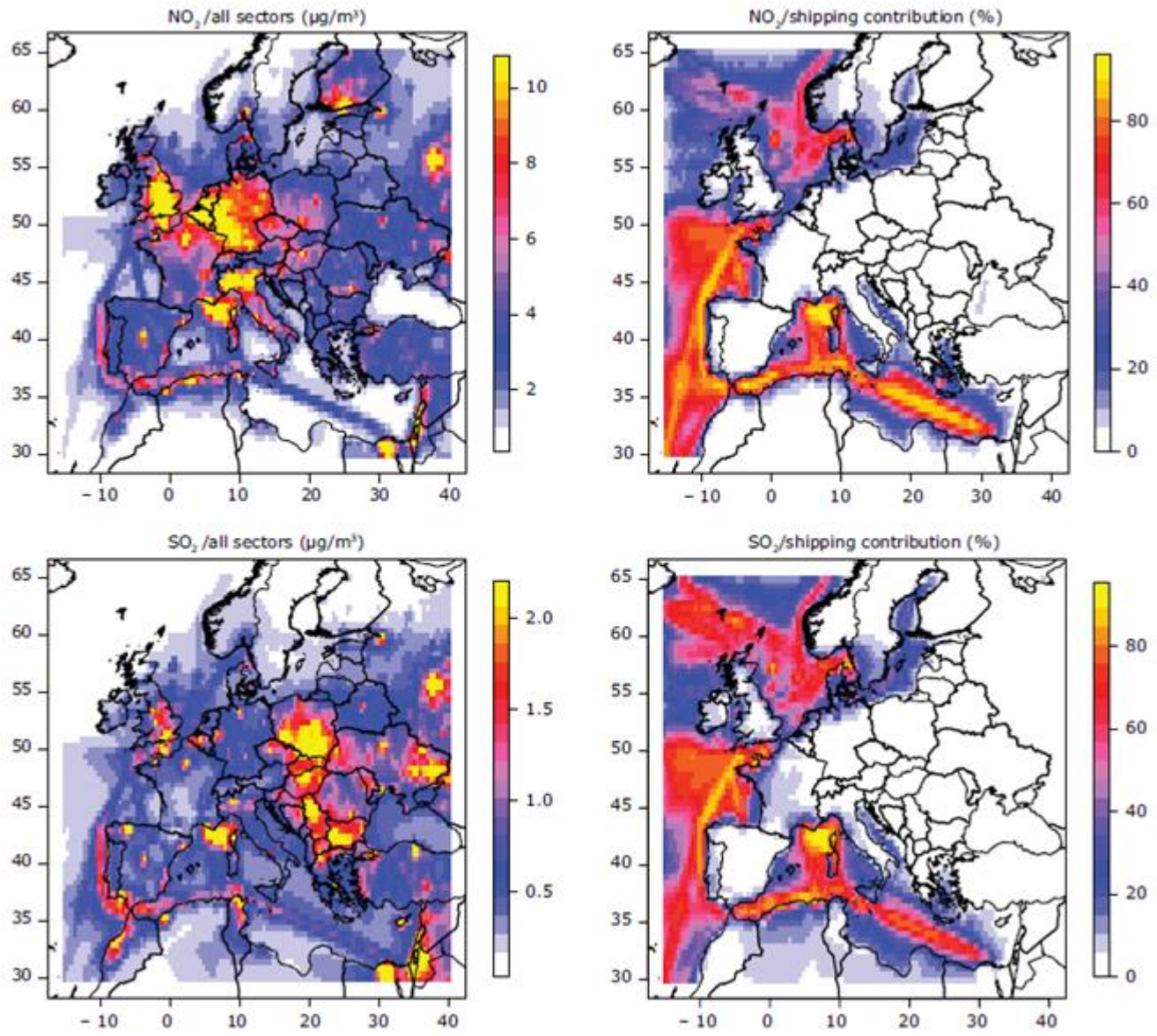

Figura 2-13 Mapa de niveles de contaminación (Dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre) promedio en 2005. Fuente: Agencia Europea de Medioambiente.

Tras el Protocolo de Kioto en 1997, con la preocupación sobre el calentamiento global, la OMI adopta el Anexo VI del Convenio MARPOL, con estudios y normativas relacionadas con la prevención de la contaminación atmosférica. Además, la OMI estudiará fijar como fecha límite 2020 o 2025 para que el combustible utilizado por los buques contenga como máximo un 0,5% de dióxido de azufre, frente al actual límite de 3,5%. Por su parte, la Agencia Europea de Medioambiente de la UE promulga sus estudios acerca de la contaminación atmosférica [30]. Ambas ponen la vista en la mejora de la EE del transporte marítimo como solución a este aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Reduciendo el consumo de combustible se consigue la disminución de la emisión de gases nocivos procedentes del sector marítimo.

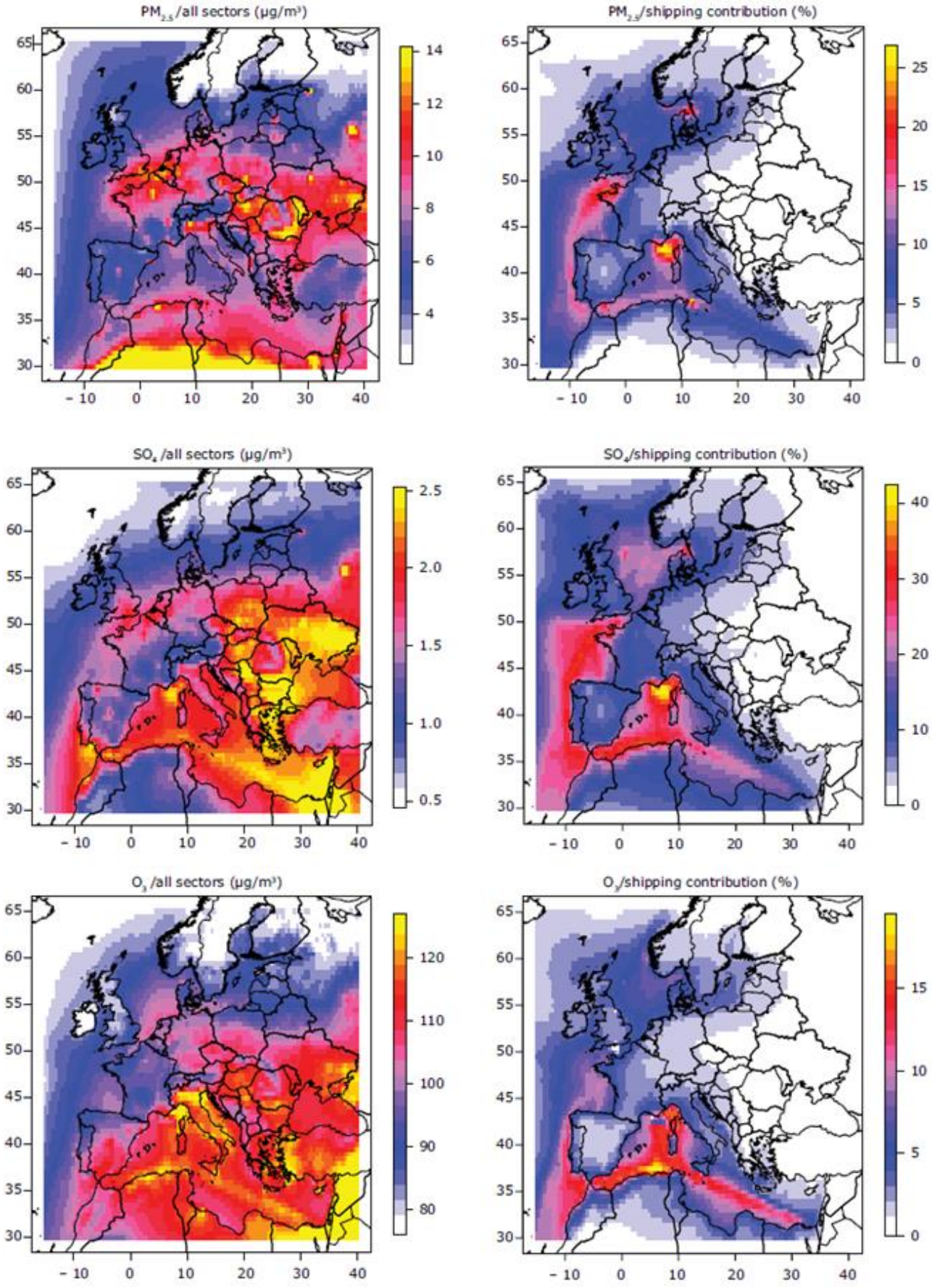

Figura 2-14 Mapa de niveles de contaminación (PM 2.5, tetraóxido de azufre y ozono) promedio en 2005. Fuente: Agencia Europea de Medioambiente.

2.1.4 Eficiencia energética en el transporte marítimo

El aumento progresivo de la actividad marítima es un hecho [17]. El incremento del comercio internacional hace imprescindible navíos cada vez más seguros, rápidos y eficientes para el progreso y desarrollo económico. A la vez, la tecnología actual con la que cuenta la propulsión naval genera una dependencia de los combustibles fósiles, un bien cada vez más escaso y más caro, que contribuye a la contaminación atmosférica y cambio climático.

La incorporación de avances de ingeniería en el diseño de buques de nueva construcción y la mejora de los buques ya existentes es clave para la reducción del consumo de combustibles, cons la actividad marina más limpia y rentable.

En la siguiente imagen (Figura 2-15), se exponen algunas de las medidas de posible aplicación en un buque, con sus respectivos porcentajes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, recomendadas por el Consejo Internacional sobre Transporte Limpio (ICCT). Entre las mejoras, destacan las de los motores generadores con una mejora global de entre el 1% y el 5%, las de operación con mejoras entre el 11% y 37%, la mejora de la hidrodinámica con mejoras totales de entre el 3% y un 19% y las de la eficiencia del motor con mejoras entre el 20% y el 49% [31].

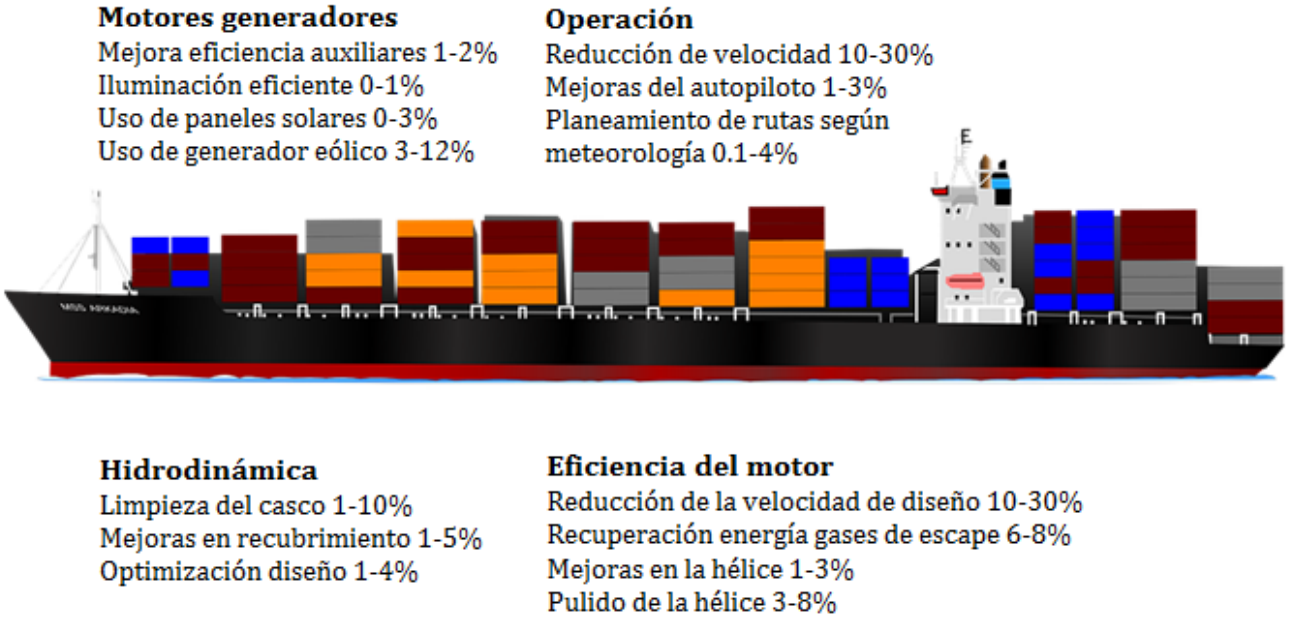

Figura 2-15 Medidas para la reducción de emisiones. Fuente: ICCT. Elaboración propia.

La mejora en eficiencia y potencia del motor optimizan el buque y reducen el consumo de combustible. Los avances en la tecnología de la propulsión diésel han llevado a motores de mayor potencia con mayor eficiencia, la incorporación de motores mejorados permite su uso en buques con cada vez mayor capacidad de carga. El uso de buques de mayor capacidad conlleva a una mejoría en la relación tonelada transportada-coste. Según un estudio de la OMI (año 2008) se puede incrementar la eficiencia energética en un 30% duplicando el tamaño de un buque. Sin embargo, esta medida tiene un límite que son los factores físicos (dimensión de los canales y puertos o profundidad de los puertos) [32]. Así, comprobamos que la mejora de la EE, no es solamente posible con la mejora de los motores o diseño inicial del buque, sino con planeamientos y estudios previos para el mejor aprovechamiento de la energía como se refleja en el esquema siguiente (Figura 2-16).

La reducción del consumo de combustible para la propulsión convencional se puede dividir en dos métodos principales, mejorando la eficiencia energética pasiva o la eficiencia energética operacional. Las medidas de eficiencia energética pasiva consisten en la instalación o renovación de equipos y sistemas que tengan un menor consumo por su uso, como por ejemplo el cambio de luces incandescentes por luces LED. Mientras las activas u operacionales se refieren al uso de la energía, por ejemplo la navegación a velocidad económica, sin cambios bruscos de velocidad.

A continuación (2.1.4.1, 2.1.4.2, 2.1.4.3) se muestra un resumen de las mejoras propuestas en el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) 213(63) "Guía en las mejores prácticas para la operación de eficiencia del combustible para buques" para Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) junto con algunas propuestas por un estudio para la mejora de la EE en buques de pesca del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el Instituto Energético de Galicia (INEGA) y el Centro Tecnológico de la Pesca de Celeiro [33], [34].

Figura 2-16 División de las mejoras de la eficiencia energética. Elaboración propia.

2.1.4.1 Mejoras en el uso del combustible

Entre las distintas mejoras en el uso del combustible, podemos relacionar las siguientes:

- **Optimización de la velocidad**: Para minimizar el consumo de combustible, teniendo en cuenta las especificaciones de los diseñadores del motor y la disponibilidad de atraque en el siguiente puerto.
- **Optimización de la potencia**: Mejorada seleccionando un régimen de revoluciones constante.
- **Planeamiento de las rutas de navegación**: Cuidadoso planeamiento y ejecución de las singladuras.
- **Previsión meteorológica**: Ahorros energéticos potenciales conociendo previamente la meteorología en ruta.

- **Just in time**: Optimización de la velocidad basada en el conocimiento previo de la disponibilidad de punto de atraque en el siguiente puerto.
- **Mantenimiento óptimo del sistema de propulsión**: Minimización de las pérdidas mecánicas y de calor mediante mantenimientos rutinarios y de optimización.
- **Uso de la energía**: Análisis del uso de la energía en sistema eléctrico y sistema de climatización.
- **Tipo de combustible**: Uso potencial de combustibles alternativos emergentes.
- **Cogeneración**: Generación de electricidad o propulsión a raíz de la recuperación del calor de gases.
- **Uso de programas de cálculo del consumo de combustible**: Conocimiento del consumo del buque y su correspondiente archivo para posteriores análisis.
- **Sistema de alimentación de combustible**: Uso de caudalímetro intrusivo para el conocimiento del consumo instantáneo.

2.1.4.2 Mejoras en el uso de la plataforma

El mejor aprovechamiento y estado del buque durante la navegación consigue las mejores condiciones de navegabilidad y como consecuencia la mejora de la EE. A continuación se relacionan las principales:

- **Trimado óptimo**: Operar con el trimado óptimo para el calado y velocidad especificado.
- **Lastrado óptimo**: Lastrado para el mejor trimado y condiciones de gobierno.
- **Uso óptimo del timón y sistemas automáticos de gobierno**: Reducir la distancia navegada fuera de ruta y minimizando pérdidas debidas a correcciones del timón. Posibles mejoras mediante el diseño optimizado del timón.
- **Mantenimiento del casco**: Uso de sistemas de recubrimiento, mejor planeamiento de intervalos de limpieza e inspección submarina.
- **Organización de la flota**: Mejor uso de la capacidad de la flota y uso optimizado. Aprovechamiento de los medios disponibles.
- **Manejo de la carga**: Adaptabilidad de la carga a requerimientos del buque y puerto.
- **Otras medidas**: Tales como el uso de sistemas de iluminación eficientes, uso de energías renovables o sustitución de equipos antiguos por otros más modernos de menor consumo.

2.1.4.3 Mejoras en el diseño de la plataforma

El diseño de un buque para conseguir una mejor hidrodinámica supone un coste inicial mayor que a la larga se puede rentabilizar. El diseño ha de ser óptimo para la velocidad de uso estándar, para ello se debe tener en cuenta el sistema de propulsión a instalar. A continuación se detallan algunas de las medidas:

- **Hélice óptima y consideraciones del flujo de entrada en la hélice**: Posibles mejoras en el diseño de la hélice y/o modificadores del flujo como aletas o conductos para mejorar la eficiencia.
- **Diseño del bulbo o inclusión de un segundo bulbo**: Mejorando la hidrodinámica y disminuyendo la resistencia al avance.
- **Elección del sistema de propulsión óptimo para la plataforma**: El sistema de propulsión elegido debe adecuarse a las necesidades del buque y ser lo más rentable posible.
- **Dinamo de cola**: Instalación de un generador movido por el motor de propulsión para producir energía eléctrica.

2.2 Marco Regulador sobre la eficiencia energética en buques

2.2.1 Antecedentes

El marco regulador de objeto de estudio en el presente proyecto es el usado por la Marina Mercante Europea. Esto incluye todas las medidas para la mejora de la EE introducidas por la OMI y por la UE (Figura 2-17).

En lo referente a la OMI, se presentan las normativas dictadas por los Comités de protección del medio marino (MEPC) hasta la fecha e incluidas en el Convenio MARPOL (Convención Internacional para la Prevención de la Polución de los Buques) Anexo VI aprobado en 1997, con regulaciones en relación a la prevención de la contaminación atmosférica, y que entró en vigor el 19 de Mayo del 2005, es de destacar las siguientes normativas: El Índice de Eficiencia Energética de Proyecto (EEDI), el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) y el Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI), incluidas en el MEPC 62 de Julio de 2011 [23], [33]. Se incluye, asimismo, la reciente normativa de la OMI sobre el Sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible de los buques, basado en el Reglamento de la Unión Europea y presentado en el MEPC 70 de Octubre de 2016, y aún con directrices y circulares en proceso de elaboración [35].

En lo referente a la UE, se expone el "Reglamento de la Unión Europea 2015/757 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de Abril de 2015 relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE" [2].

La Unión Europea, mediante este reglamento, establece una serie de normas para el seguimiento, notificación y verificación (Sistema SNV) de las emisiones de dióxido de carbono y otra información pertinente que arriben, zarpen o se encuentren en puertos bajo jurisdicción de un Estado miembro para reducir el consumo de combustible a bordo de los buques y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

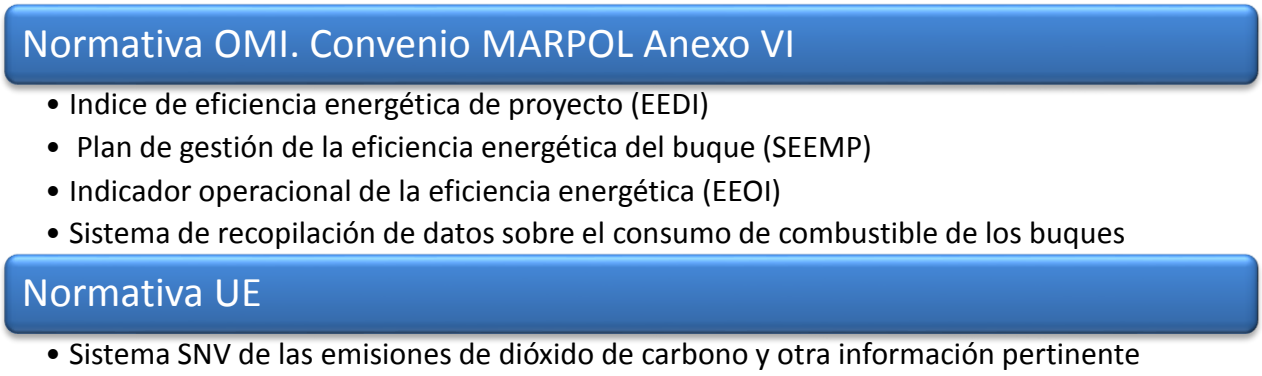

Figura 2-17 Normativas de la marina mercante a estudio. Elaboración propia.

2.2.2 Índice de Eficiencia Energética de Diseño (EEDI)

El índice de eficiencia energética de diseño permite conocer información sobre la eficiencia energética de un buque, usado para buques de nueva construcción, da a relacionar la cantidad de masa de CO_2 emitido a la atmósfera (en gramos) por cantidad de carga transportada (en toneladas por milla).

Es así, una medida de la eficiencia calculada para un barco de nueva construcción, con objeto de incentivar el desarrollo técnico e innovación de todo lo necesario para la mejor eficiencia energética del buque. Pudiendo establecerse para un barco de nueva construcción tener que superar un umbral por debajo del cual el buque no pueda ser aprobado y permitiendo a astilleros poder calcular el EEDI para optimizar el aprovechamiento energético en el diseño de la embarcación [36].

Para el cálculo del EEDI se sigue la fórmula de forma simplificada mostrada a continuación:

$$EEDI = \frac{EMP + EMA + TEEA - TEEP}{VTR}$$

Siendo:

EEDI	Índice de Eficiencia Energética de Diseño
EMP	Emisiones del Motor Principal
EMA	Emisiones de Motores Auxiliares
TEEA	Tecnologías implementadas para mejora de la Eficiencia Energética en generación eléctrica de Auxiliares
TEEP	Tecnologías implementadas para mejora de la Eficiencia Energética en la Propulsión
VTR	Valor del Trabajo Realizado

Esta fórmula puede no ser aplicable a buques de propulsión diesel-eléctrica, turbinas o sistemas de propulsión hibrida, excepto para cruceros de pasajeros y buques de carga de gas natural licuado (GNL).

El significado de cada bloque y los elementos de la ecuación se explican con detalle a continuación:

2.2.2.1 Índice de eficiencia energética de diseño (EEDI)

Índice de eficiencia energética de diseño. Mide la cantidad de emisiones de dióxido de carbono emitidas por cada unidad de trabajo realizada, es decir el producto de la capacidad del buque y su las millas navegadas.

Así, según la unidad de capacidad que se use, se podrá expresar en distintas unidades, para capacidad expresada en toneladas de carga, el EEDI tendría las siguientes unidades, $^{gCO_2}/_{t \cdot NM}$.

2.2.2.2 Emisiones del motor principal (EMP)

Supone el total de emisiones de CO_2 debidas al motor o motores principales, entendiendo éstos como los utilizados para dar energía a la propulsión.

$$EMP = \left(\prod_{j=1}^{n} f_j\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right)$$

f_j $(-)$ - Factor de corrección que tiene en cuenta los elementos de proyecto específicos del buque (corrección de potencia para los buques que estén diseñados para la navegación en zona de hielos). Será igual a uno en caso de no tener dicha necesidad.

$P_{ME(i)}$ (kW) - Potencia de los motores principales, indicada como el 75% de la potencia nominal. Se tendrá en cuenta el generador acoplado al eje en caso de tenerlo.

$C_{FME(i)}$ $\left({}^{\mathrm{g}CO_2}/_{gfuel}\right)$ - Coeficiente de conversión a CO_2 del combustible utilizado en el motor principal.

$SFC_{ME(i)}$ $\left({}^{g}/_{kWh}\right)$ - Consumo específico de combustible de los motores principales, según los valores de certificación NO_x para una potencia $P_{ME(i)}$.

n_{ME} $(-)$ – Número de motores principales.

2.2.2.3 Emisiones de motores auxiliares (EMA)

Suponen el total de las emisiones de CO_2 ocasionadas por el motor o motores auxiliares, encargados de generar la electricidad necesaria para el consumo energético del buque.

$$EMA = P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} *$$

P_{AE} (kW) - Requerimientos de potencia de los motores auxiliares para condiciones normales de navegación.

C_{FAE} $\left({}^{\mathrm{g}CO_2}/_{gfuel}\right)$ - Coeficiente de conversión de CO_2 del combustible utilizado en los motores auxiliares.

SFC_{AE} $\left({}^{g}/_{kWh}\right)$ - Consumo específico de combustible de los motores auxiliares, para valores de certificación NO_x.

* Si parte de la carga nominal máxima en el mar se obtiene con generadores acoplados al eje, para dicha parte de la potencia podrá utilizarse SFC_{ME} y C_{FME} pueden ser usadas en lugar de SFC_{AE} y C_{FAE}.

2.2.2.4 Tecnologías implementadas para mejora de la Eficiencia Energética en generación eléctrica de Auxiliares (TEEA)

Este apartado de la fórmula está compuesto por dos partes. De forma aditiva a la fórmula total, las emisiones debidas al motor generador del sistema de retroalimentación del eje (en caso de que el buque disponga del mismo) y reduciendo esta potencia necesaria ($P_{PTI(i)}$), las tecnologías implementadas para la mejora de la eficiencia energética en la generación eléctrica de los motores auxiliares, contribuyendo con un valor de $P_{AEff(i)}$.

$$TEEA = \left(\left(\prod_{j=1}^{n} f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)$$

f_j $(-)$ - Factor de corrección que tiene en cuenta los elementos de proyecto específicos del buque (corrección de potencia para los buques que estén diseñados para la navegación en zona de hielos). Será igual a uno en caso de no tener dicha necesidad.

$P_{PTI(i)}$ (kW) - El 75% de la potencia de cada motor generador dividida por la media ponderada de la eficiencia del generador en un sistema de retroalimentación del eje. En este sistema el eje es alimentado por los motores auxiliares, además de la forma convencional mediante los motores principales.

n_{PTI} $(-)$ - Número de sistemas de recuperación energética.

f_{eff} $(-)$ - Factor de corrección según la disponibilidad de las tecnologías de EE utilizadas (será igual a 1.0 si está disponible). Permite dar una corrección frente a la desventaja de incorporar una tecnología que esté en fase de desarrollo o en pruebas.

$P_{AEff(i)}(kW)$ - Reducción de requerimientos de potencia debido al uso de mejoras de eficiencia en los motores auxiliares.

C_{FAE} $\left({}^{\mathrm{g}CO_2}/_{gfuel}\right)$ - Coeficiente de conversión de CO_2 del combustible utilizado en los motores auxiliares.

SFC_{AE} $\left({}^{g}/_{kWh}\right)$ - Consumo específico de combustible de los motores auxiliares, para valores de certificación NO_x.

2.2.2.5 Tecnologías implementadas para mejora de la Eficiencia Energética en la Propulsión (TEEP)

Este elemento del numerador incluye cualquier medida y avance tecnológico utilizado que provea de potencia mecánica para la propulsión del buque, como por ejemplo, el uso de la energía eólica en velas o cometas.

$$TEEP = \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \; **$$

$f_{eff(i)}$ $(-)$ - Factor de corrección según la disponibilidad de las tecnologías de EE utilizadas (será igual a 1,0 si está disponible).

$P_{eff(i)}$ (kW) - El 75% de la potencia instalada de tecnologías que contribuyan a la propulsión.

C_{FME} $\left({}^{\mathrm{g}CO_2}/_{gfuel}\right)$ - Coeficiente de conversión a CO_2 del combustible utilizado en el motor principal.

SFC_{ME} $\left({}^{g}/_{kWh}\right)$ - Consumo específico de combustible de los motores principales, según los valores de certificación NO_x para una potencia $P_{ME(i)}$.

** En caso de $P_{PTI(i)} > 0$, el valor medio de las emisiones de CO_2 de los motores principales y los auxiliares, para el cálculo del P_{eff}.

2.2.2.6 Valor del trabajo realizado (VTR)

$$VTR = f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}$$

$f_i\ (-)$ - Factor de correción para elementos de diseño específicos del buque que le limiten la capacidad (se considera de valor 1.0 si no se estima necesario).

$f_c\ (-)$ - Factor de correción para la capacidad de los buques con tipos de carga alternativa que afecten la relación peso muerto-capacidad (Por ejemplo buques que usan GNL en el sector de los gaseros) .

$f_l\ (-)$ - Factor de correción debido a cualquiel limitación regulatoria técnica del búque que restrinja su capacidad. (se considera de valor 1,0 si no se estima necesario)

C$apacidad\ (toneladas)$ - Tonelaje de peso muerto (TPM) para buques graneleros, gaseros y petroleros. El 70% del TPM para buques portacontenedores.

$f_w\ (-)$ - Coeficiente indicativo de la disminución de velocidad debida a condiciones meteorológicas adversas.

$V_{ref}\ \left(^{millas}/_{h}\right)$ - Velocidad de referencia del buque obtenida con una potencia de propulsión P_{ME}, bajo condiciones de mar en calma y con el plano de flotación en la línea de calado de verano.

La fórmula del EEDI, queda como sigue a continuación (Figura 2-18) separada en bloques para su mejor comprensión:

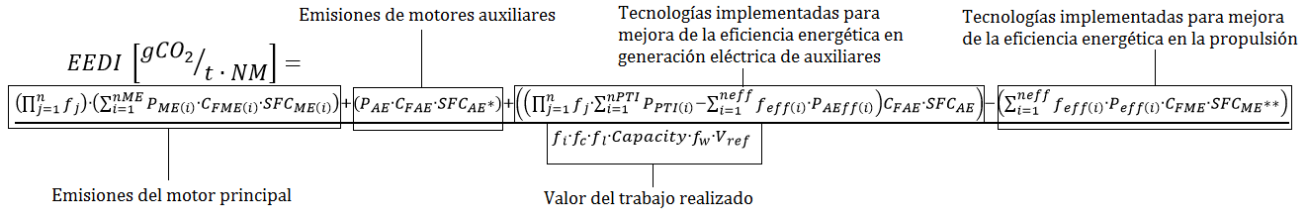

Figura 2-18 Fórmula EEDI en bloques. Fuente: OMI MEPC 245 2014. Elaboración propia.

2.2.3 Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP)

La Organización Marítima Internacional en su "Segundo Estudio de la OMI sobre los gases de efecto invernadero (2009)" reconoce la necesidad de un plan para llevar a cabo una vigilancia ambiental de los buques de las compañías navieras, así como una serie de ayudas para las navieras para permitirles mejorar la EE de sus buques. Este es el Plan de gestión de la eficiencia energética del buque, del inglés Ship Energy Efficiency Management Plan [20].

Dado las diferencias existentes entre los buques, se optó por realizar una guía para la realización de un plan de gestión de la EE específico de cada buque por parte del armador del buque. Para ello propone un ciclo de mejora (Figura 2-19) dividido en cuatro fases: planificación, implantación, supervisión y autoevaluación y mejora.

1. Planificación: Etapa en la que se establece el consumo de energía actual del buque, las medidas a tomar para mejorar la EE y la mejora prevista.
2. Implantación: Procedimientos para aplicar las medidas a tomar y personal responsable de las mismas.

3. Supervisión: Vigilancia cuantitativa de la EE mediante una herramienta establecida en el ámbito internacional. Se recomienda el uso del EEOI elaborado por la OMI como indicador cuantitativo para la vigilancia.
4. Autoevaluación y mejora: Evaluación de la eficacia de las medidas tomadas y su implantación, usando datos de la vigilancia realizada, para así aportar información al siguiente ciclo de mejora realizando así una mejor planificación.

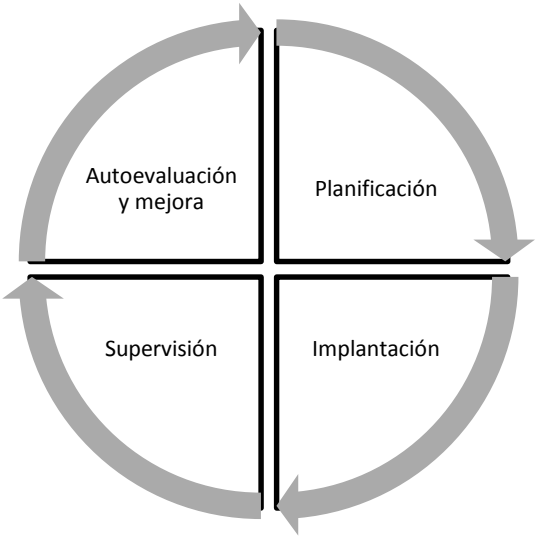

Figura 2-19 Ciclo de mejora del SEEMP. Elaboración propia.

Además del procedimiento a seguir, la OMI ofrece una orientación para las mejores prácticas a realizar para la reducción del consumo de combustible en los buques de aplicación en el SEEMP [37].Operaciones con consumo eficiente de combustible: mejora de la planificación de la travesía, navegación meteorológica, notificación a tiempo, optimización de la velocidad, optimización de la potencia del eje.

- Optimización del manejo del buque: asiento óptimo, lastre óptimo, aspectos relativos a la optimización de la hélice y al flujo de la hélice, uso óptimo del timón y de los sistemas de control del rumbo (pilotos automáticos), mantenimiento del casco.
- Sistema de propulsión: mantenimiento del sistema de propulsión; recuperación del calor residual.
- Mejoras de la gestión de la flota.
- Mejoras del manejo de la carga.
- Gestión de la energía.
- Tipos de combustible.
- Otras medidas.
- Compatibilidad de las medidas: edad y vida de servicio operacional del buque; tipo de travesía y zona de navegación.

La OMI establece la obligatoriedad para buques de tonelaje de registro bruto igual o superior a 400 toneladas de tener a bordo del buque un SEEMP aprobado por la Administración o una empresa verificadora [1]. El SEEMP se elaborará de acuerdo a las directrices indicadas por la Organización y contendrá como mínimo lo siguiente:

1. Información sobre el buque (Nombre del buque, tipo de buque, arqueo bruto y capacidad).
2. Información sobre el plan (Fecha de elaboración, periodo de implantación, responsable de su elaboración, responsable de su implantación y fecha prevista de la próxima evaluación.
3. Medidas de eficiencia energética adoptadas, fecha de inicio de su implantación y personal responsable.

4. Descripción de los instrumentos de vigilancia.
5. Objetivos cuantificables.
6. Procedimientos de evaluación.

2.2.4 Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI)

El Indicador operacional de la eficiencia energética, conocido como EEOI por su nombre en inglés, Energy Efficiency Operational Indicator, es una herramienta de carácter voluntario que pone a disposición la OMI para realizar el seguimiento del rendimiento de un buque. Sirve así de complemento al SEEMP, para la mejora de la EE del buque ya construido [38].

El EEOI permite medir el consumo eficiente de combustible de un buque y calibrar el efecto de cualquier cambio en el funcionamiento del buque. De esta forma, el armador podrá conocer de una forma cuantitativa (toneladas de CO_2/ (tonelada de carga por millas náutica)) si las medidas adoptadas para reducir el consumo de combustible están teniendo efecto.

El EEOI sigue la siguiente fórmula:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{cargo} \times D}$$

Puede ser calculado para un único viaje como el caso de la primera fórmula, pero para su aplicación se debe realizar en un periodo determinado, calculando así el indicador operacional medio, que sigue la fórmula siguiente:

$$Average\ EEOI = \frac{\sum_i \sum_j FC_{ij} \times C_{Fj}}{\sum_i \left(m_{cargo,i} \times D_i\right)}$$

Donde:

j	tipo de combustible utilizado
i	número de viaje
$FCij$	masa de combustible j consumida en el viaje i
CFj	factor de conversión de masa de combustible j a masa de CO_2
$m_{cargo,i}$	carga transportada, en toneladas, o trabajo realizado (número de TEU o pasajeros) en el viaje *i*
D_i	distancia en millas náuticas correspondientes al viaje *i*

El factor de conversión de masa de combustible a masa de CO_2 que se use será en función del tipo de combustible utilizado como sigue en la Tabla 2-5.

Tipo de combustible	Referencia	Contenido en carbono	$C_F \left(t - CO_2 / t - Fuel \right)$
Diésel	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0,875	3,206000
Gasolina (Light Fuel Oil)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0,86	3,151040
Gasolina (Heavy Fuel Oil)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0,85	3,114400
Gas licuado de petróleo	Propano	0,819	3,000000
	Butano	0,827	3,030000
Gas natural licuado		0,75	2,750000

Tabla 2-5 Coeficientes de conversión de combustibles a CO_2. Fuente: OMI CIRC. 684. Elaboración propia.

Las unidades del EEOI dependerán de la utilizada para cuantificar la masa de carga son, por tanto: toneladas de CO_2/ (tonelada de carga por millas náutica); toneladas de CO_2/ (TEU por milla náutica); toneladas de CO_2/ (pasajero por milla náutica). Siendo TEU o Twenty-foot Equivalent Unit la unidad que expresa la cantidad de contenedores normalizados de 20 pies.

El elemento que determina las unidades en las que se expresa el índice es el *mcargo*. La OMI define diferentes unidades para expresar esta medida de la capacidad empleada para transporte o trabajo realizado (Tabla 2-6). La relación es la siguiente:

Tipo de buque	Unidad utilizada, *mcargo*
Buques de carga a granel, buques cisterna, gaseros, buques ro-ro (roll-on/roll-off, de carga rodada)	Toneladas métricas de la carga transportada
Buques portacontenedores	Número de contenedores o toneladas métricas de la masa total del cargo de los contenedores.
Buques transportando una combinación de contenedores y otras cargas	Una masa TEU de 10 toneladas que combine la masa total del cargo y los contenedores.
Buques de transporte de personas, incluyendo buques ro-ro y buques de carga general	Número de pasajeros o las toneladas de registro bruto del buque.
Buques de transporte de vehículos	Número de coches o los metros de carriles ocupados.
Buques ro-ro especiales de transporte de camiones, locomotora o vagones de tren	Número de camiones o metros de raíles ocupados.

Tabla 2-6 Unidades de uso para cuantificar la masa de carga transportada. Fuente: OMI Circ. 684. Elaboración propia.

Para buques como por ejemplo ciertos buques ro-ro, que transportan una mezcla de pasajeros con o sin coche y carga, el operador puede considerar alguna forma de medir la masa transportada basada en la relativa importancia de estos tráficos para su servicio particular o el uso de otros parámetros o indicadores que sean apropiados.

Este último punto que enuncia la OMI es clave para el uso del EEOI para buques especiales, que tengan actividades diversas y más allá del mero transporte, aportando flexibilidad a la hora de decidir el parámetro a usar en este elemento *mcargo*.

2.2.5 Reglamento de eficiencia energética en transporte marítimo de la UE

El 5 de Febrero de 2014, la Unión Europea, dentro del marco para las políticas de clima y energía en 2030, establece un objetivo de reducción de emisiones de gases en un 40% en comparación con niveles de 1990. En Julio de 2011, la OMI había adoptado una serie de medidas consistentes en el EEDI y el SEEMP.

La Unión Europea las ve insuficientes para cumplir el objetivo global de limitar a 2ºC el aumento de la temperatura media del planeta. Para reducir las emisiones a nivel Unión, lleva a cabo una serie de medidas a mayores de las adoptadas por la OMI [2].

En 29 de Abril de 2015, la UE establece un sistema de seguimiento, notificación y verificación (sistema SNV, Figura 2-20) de las emisiones de CO_2 basado en el consumo de combustible de los buques, lo que supone la primera fase de las medidas que afectan al sector marítimo para la reducción de gases de efecto invernadero. Dicha información suplirá la falta de información fiable actual y con el conocimiento del combustible consumido y emisiones de CO_2 permitirá llevar a cabo medidas de mejora de la eficiencia e incluso de limitaciones en las emisiones de los buques.

Figura 2-20 Sistema de seguimiento y notificación. Elaboración propia.

Con el sistema SNV se esperan reducir las emisiones en un 2% en comparación con una situación sin el sistema, y conseguirá ahorros, de hasta 1200 millones de euros en el sector hasta 2030, al facilitar el flujo de información sobre consumos y EE de los buques. Además de suponer un paso imprescindible para poder llevar a cabo nuevas medidas de mejora de la EE al proporcionar datos fiables para fijar objetivos, buscando una economía hipocarbónica y una mayor rentabilidad económica.

El sistema SNV tendrá en cuenta todos los viajes en el interior de la Unión, desde un puerto exterior con destino a la Unión y los viajes con salida de un puerto de la Unión hacia otro puerto exterior a la Unión. Incluyendo la información de emisiones de CO_2 en el tránsito, desplazándose dentro de puerto y durante el atraque. Además se cubrirá otra información relevante para determinar la eficiencia de los buques y analizar los factores que favorecen las emisiones.

Su aplicación será obligatoria en buques con tonelaje de registro bruto (GT) superior a 5000 toneladas, con objeto de no limitar a pequeñas y medianas empresas siguiendo reduciendo la mayor parte de las emisiones. Los buques con GT superior a 5000 toneladas suponen el 55% de los buques con escala en puertos de la Unión y son responsables del 90% de las emisiones asociadas. Con este umbral se garantiza la reducción de emisiones y evita una mayor carga administrativa en propietarios de buques.

Estarán exentos los buques de guerra (objeto de este proyecto), las unidades navales auxiliares, los buques pesqueros, o buques factoría, los buques de madera de construcción de madera de construcción primitiva, los buques no propulsados por medios mecánicos y buques de propiedad estatal utilizados sin fines comerciales.

El plan de seguimiento se puede realizar de cuatro formas distintas especificadas en el reglamento.: el empleo de notas de entrega de combustible, el control a bordo de los depósitos de combustible, los indicadores de caudal para los procesos de combustión aplicables o las mediciones directas de las emisiones. Esta información la facilitará la naviera con carácter anual y por cada buque. Por confidencialidad y protección de estrategias económicas de la empresa sólo se publicarán las medias anuales de consumo de combustible, emisiones de dióxido de carbono y eficiencia de los buques.

Se llevará a cabo una verificación del plan de seguimiento y los informes por medio de verificadores acreditados y se expedirá un documento de conformidad que demuestre que el buque cumple las obligaciones de la Unión Europea. Los Estados miembros y la Agencia Europea de Seguridad Marítima (AESM) deben asistir a la Comisión e inspeccionar los buques que no dispongan de dicho documento. El incumplimiento de las normas puede llevar a sanciones y si se repite en dos o más años puede llevar a la expulsión del buque de puertos de la Unión Europea.

La Unión Europea propone como objetivo usar el modelo SNV de la Unión para su aplicación a nivel mundial, compartiendo información con la OMI sobre dicho reglamento.

El reglamento entra en vigor el 1 de julio de 2015 siendo la aplicación efectiva antes del 1 de enero de 2018, inicio del primer período de notificación.

2.2.6 Sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible de los buques

En octubre de 2016 se celebra el MEPC 70 y se decide la implantación de un sistema de registro y notificación del consumo de combustible [35]. Esta normativa incluye a los buques de arqueo bruto igual o superior a 5000 toneladas que, a partir del 1 de Enero de 2019 deberán incluir en su Plan de gestión de la eficiencia energética (SEEMP) una descripción del método para la recopilación de los datos de consumo y su notificación. Una normativa en la corriente de la propuesta por la UE anteriormente.

Los datos de consumos se notificarán al Estado de abanderamiento después del final de cada año civil, y el Estado de abanderamiento deberá expedir una declaración de cumplimiento del buque. Los datos de los Estados de abanderamiento serán recopilados en una base de datos de consumo de combustible de la OMI. Se elaborará un informe anual, dirigido por la OMI, con los datos recopilados.

Supone una normativa con aún directrices y circulares en proceso de elaboración [24]:

-Directrices para los procedimientos de verificación de datos de la Administración.

-Directrices para la elaboración y la gestión de la base de datos de la OMI sobre el consumo de fueloil de los buques.

-Circular MEPC para abordar el caso de los buques de Estados que no sean Partes y alimenten dicha base de datos.

2.3 Estado actual de la aplicación de las mejoras de eficiencia energética en buques

En el presente apartado se exponen las medidas que se están tomando en los distintos ámbitos del sector marítimo, desde mejoras en el transporte marítimo, avances en los buques de pesca y mejoras adoptadas por las principales marinas de guerra del mundo. De forma que sirvan de ayuda para el mejor conocimiento del desarrollo de la ingeniería que se está llevando a cabo en los navíos actuales.

2.3.1 Avances e investigaciones realizadas en la marina mercante

2.3.1.1 Mejoras en la hélice

Una de las medidas que propone Hyundai Heavy Industries es la instalación de una pieza adjunta al centro de la hélice que permite el ahorro de hasta un 2,5% de consumo de combustible. Este dispositivo llamado Hi-FIN (Figura 2-21) genera remolinos de sentido contrario a los generados por la hélice que aumentan la eficiencia de la propulsión. Esta mejora del diseño ya se ha instalado en numerosos cargueros y gaseros [39], [40].

Figura 2-21 Mejora Hi-FIN de la hélice. Fuente: Marine log [39]

2.3.1.2 Sistema de lubricación de aire del casco

La llamada tecnología de las burbujas es un método para reducir la resistencia al avance del casco del buque en el agua usando microburbujas de aire (Figura 2-22). Mediante el aporte de aire del buque bajo el casco se crean una capa de pequeñas burbujas que ayudan a la reducción del rozamiento entre el casco y el agua. Esto supone disminuciones del consumo y alrededor de un 10-15% de reducciones del CO_2 emitido [40].

Figura 2-22 Sistema de lubricación de aire del casco. Fuente: Fondear [41]

Esta tecnología está siendo instalada en buques de carga o en graneleros por diferentes empresas como Mitsubishi Heavy Industries o Silverstream Technologies.

2.3.1.3 Modificaciones en el bulbo

La modificación del bulbo en buques ya construidos, es una de las medidas que se están tomando a la hora de buscar mejoras en el diseño del buque. Diferentes empresas como Maersk o Clipper apuestan por esta opción [40].

Durante el avance del buque, la proa genera unas olas alrededor del casco, debido a las diferencias de presión. La inclusión de un bulbo en la proa, estas olas son generadas delante de la proa, mientras que, sin el bulbo, las olas se forman en la roda (prolongación de la quilla en dirección vertical por la proa) y el casco sufre un mayor rozamiento con las crestas de las olas generadas, que son mayores cuando mayor es la velocidad del buque. El bulbo suaviza las olas formadas, generando olas con diferente periodo que a una determinada velocidad pueden incluso a anularlas (Figura 2-23).

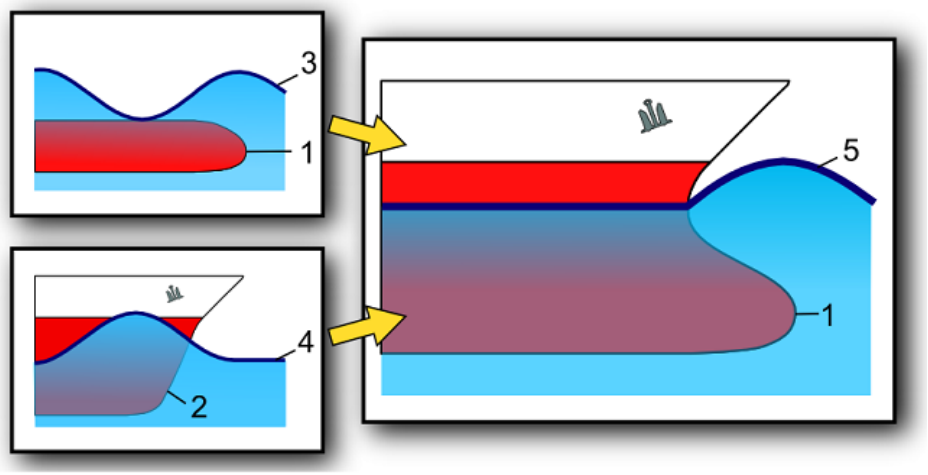

Figura 2-23 Función del bulbo. Fuente: AB surveyors [42]

2.3.1.4 Sistema de corriente continua a bordo del buque

La apuesta del grupo de tecnología ABB, consiste en la implementación de una red de corriente continua para todo el buque, incluyendo todos los sistemas de potencia, propulsión y automatización, eliminando la corriente alterna.

Entre las ventajas que supone está el ajuste de velocidad de los motores, con un control más exacto de la palanca, además de la disminución del peso del sistema eléctrico en un 30% al no necesitar transformadores y paneles de conmutación, lo que además aumenta el espacio disponible en la sala de máquinas [43]. Junto con la disminución del consumo de hasta un 27% obtenido en pruebas realizadas en el buque de construcción y apoyo a plataformas petrolíferas Dina Star, se consigue una reducción del ruido en la cámara de máquinas de un 30%, mejorando las condiciones de trabajo en el buque.

2.3.1.5 Sistemas de propulsión híbrida con instalación de un generador de cola

Una de las medidas destinadas a aprovechar la energía suministrada por el motor principal al eje, es la inclusión de un generador de cola.

El funcionamiento es simple, acoplado al eje, funciona como una dinamo aprovechando el movimiento del eje para producir energía eléctrica que transmite a la red eléctrica del buque. La frecuencia de red del barco está ligada a la velocidad de rotación de la hélice, con lo cual, la velocidad del motor diésel se tiene que mantener constante para mantener la frecuencia. De forma que la velocidad del buque se tiene que controlar únicamente variando el paso de la hélice.

En un buque con propulsión híbrida, el control del generador de cola es óptima, permitiendo que el motor diésel y la hélice operen a velocidad variable y manteniendo fija la tensión de la red. Además,

permite que la energía eléctrica obtenida con el generador de cola no solo sea utilizada para la red eléctrica del buque, sino empleada para la propulsión al permitir la entrega de potencia por parte de un motor diésel y un motor eléctrico. Se consigue así un retorno de la energía a la propulsión. En la siguiente imagen (Figura 2-24) se muestra la estructura del sistema [44].

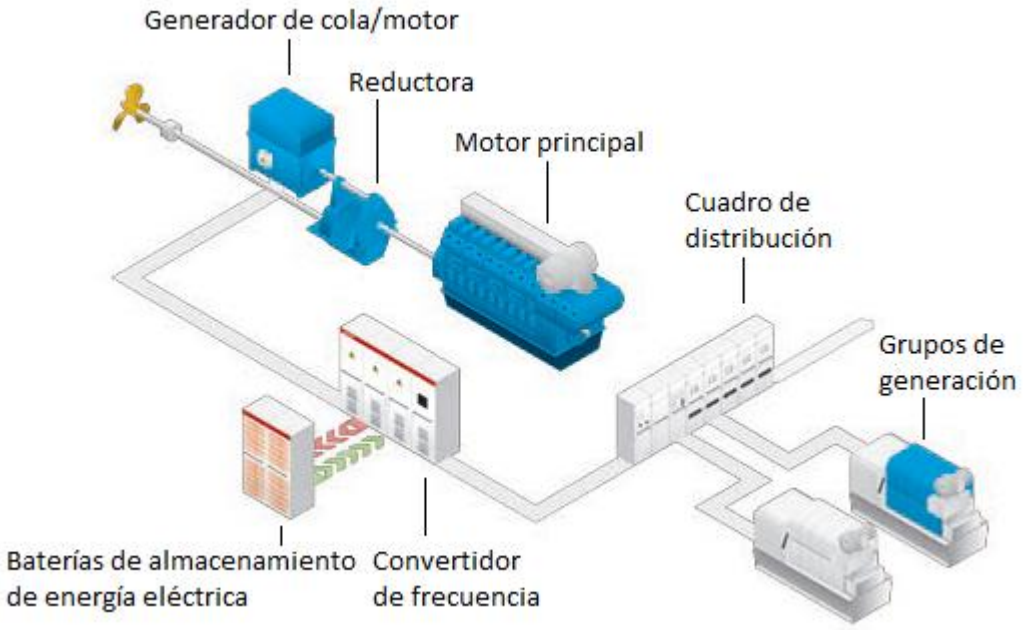

Figura 2-24 Inclusión del generador de cola en un sistema híbrido. Fuente: Ingeteam [44]

El sistema de propulsión híbrida permite diferentes modos de operación:

- Propulsión principal sólo diésel, modo convencional.
- Propulsión principal diésel-eléctrico, aumentando la potencia transmitida a la hélice.
- Propulsión eléctrica, trabajando únicamente el motor eléctrico para mover el eje.

Entre las mejoras conseguidas con un sistema híbrido con uso de un generador de cola en el buque cabe destacar las siguientes:

- Reducción de consumos.
- Mayor flexibilidad en el sistema, permitiendo diferentes modos de operación.
- Aumento de la vida útil de los grupos de generación al reducirse el número de horas de funcionamiento.
- Incremento de la potencia al trabajar de forma conjunta el motor eléctrico como motor de propulsión auxiliar al motor diésel.
- Posibilidad de trabajar únicamente en modo eléctrico, reduciendo el tiempo de trabajo de los motores diésel.
- Redundancia y fiabilidad, al poder accionarse el eje de la hélice con el motor eléctrico además del motor diésel.
- Reducción del ruido y vibraciones al funcionar en modo eléctrico sólo o la reducción de la palanca necesaria al trabajar en modo diésel-eléctrico.

2.3.1.6 Sistemas de cogeneración

La cogeneración es la producción simultánea de dos tipos de energía útil, normalmente electricidad y calor. En la generación de energía eléctrica en los motores generadores de un buque o energía motriz en el caso del motor principal, se aprovecha el calor de los gases de escape que generan los motores, para climatización o en la obtención de agua caliente [45].

Entre sus ventajas destacan las dos siguientes:

- Los calores residuales se aprovechan, obteniendo así un mayor rendimiento del combustible.
- Reducción en las emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Reducción de costes energéticos, consiguiendo un menor coste económico de la actividad del buque.

A continuación (Figura 2-25) se muestran los diagramas de Sankey para un motor de la empresa "MAN Diesel and Turbo" en la que se comparan los flujos de energía salientes para el mismo motor a derecha trabajando con un sistema de cogeneración y a izquierda sin la mejora. Su sistema puede funcionar a presión simple o a doble presión (porcentajes entre paréntesis). La instalación de este sistema permite que un 5,1%, o a doble presión 5,7% de la energía se pueda aprovechar para producción eléctrica y la reducción en un 2,3% de la energía consumida en refrigeración por aire y de un 2,6% a un 3,2% la reducción de la energía de salida en forma de calor en gases de exhaustación.

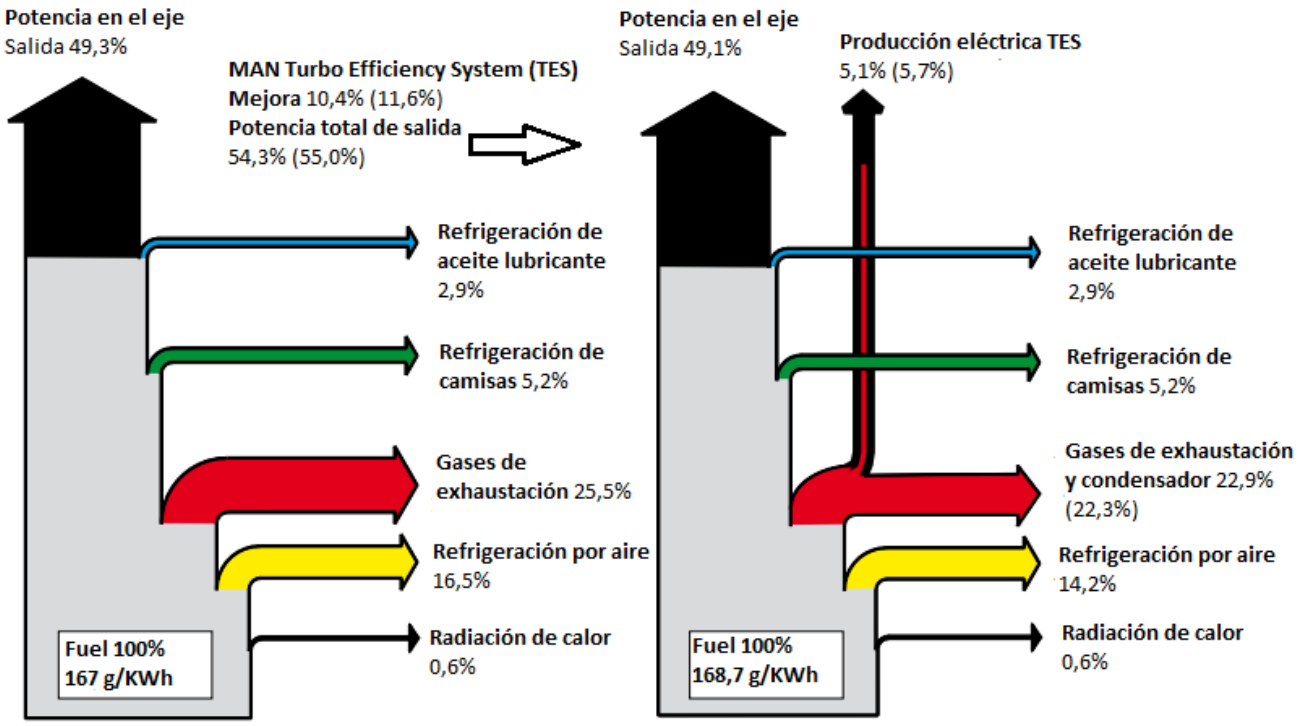

Figura 2-25 Mejora conseguida con el sistema de eficiencia de "MAN Diesel and Turbo". Fuente: Dimensionado de un sistema de recuperación de gases de escape para un portacontenedores de 2700 TEU [46]

Un ejemplo del aumento del rendimiento del combustible es el realizado en el dimensionamiento de una planta de cogeneración en un buque portacontenedores de 2.700 TEU [46]. En el que con la instalación de la planta de cogeneración consigue un aumento del 2,8% en el rendimiento del combustible empleado. Suponiendo para las dimensiones del buque y una estimación de 240 días de navegación al año, una reducción de 1.118 toneladas de combustible consumido al año que equivale a un ahorro económico de 380.000 €.

2.3.1.7 Aprovechamiento de la energía eólica

El uso de la energía del viento en los buques ha sido la principal desde la antigüedad. Reducida al uso en buques de recreo tras el desarrollo de las máquinas de vapor y posteriormente los motores diésel, actualmente se está volviendo a abordar el posible aprovechamiento de esta energía como fuente para la propulsión y consumo eléctrico del buque.

El aprovechamiento de la energía eólica a bordo de los barcos se puede dividir en tres tipos de sistemas (Figura 2-26):

Figura 2-26 Sistemas de la energía eólica en buques. Fuente: Elaboración propia con datos de Ingeniería marina [47].

Por un lado, la vela tradicional nunca ha dejado de utilizarse, siendo muy común en barcos de recreo, y, últimamente, algunas navieras de cruceros turísticos han comenzado a usarlo en sus buques, como es el caso del buque "Wind Surf Caribbean" (Figura 2-26, izquierda). El ejemplo más cercano en la Armada Española es el buque-escuela Juan Sebastián de Elcano, con navegación a vela y, en caso de necesidad, a motor.

El principio físico conocido como efecto Magnus, descubierto en 1853 por Heinrich Magnus, fue utilizado en 1920 por Anton Flettner para aprovechar el viento en un lado del rotor produciendo empuje hacia proa mediante la depresión generada por el giro del cilindro. El rotor Flettner ya ha sido probado desde esta fecha y aunque no ha sido utilizada a gran escala, algunas navieras ponen la vista en esta tecnología que permite la reducción de hasta un 50% del consumo y emisiones del buque dependiendo de las condiciones meteorológicas [48].

Una tecnología similar a la usada en el Kite-surf es la que propone la empresa "SkySails Gmbh", en la que se incorpora una cometa de grandes dimensiones en el buque del grupo marítimo Beluga Shipping Gmbh "Beluga SkySails", en el cual ha conseguido ahorros de 1.000 € diarios en combustible lo que supone un 20% de disminución del consumo y emisiones de CO_2. Según los estudios de la empresa, el 60% de la flota mundial puede ser equipada con este sistema lo que supondría la reducción de 800.000 toneladas al año de CO_2 [49].

La última versión del sistema (SKS C320) puede alcanzar una potencia propulsora de hasta 2 mega vatios (MW) [49]. Para hacerse una idea, un motor diésel de los dos que dispone una fragata clase "Álvaro de Bazán", tiene una potencia de 6.000 caballos de vapor (HP), equivalente a 4,5 MW [50].

El principal inconveniente del uso de estas tecnologías es la intermitencia de la fuente de energía, así que siempre deben ser instaladas como un sistema de propulsión secundario y auxiliar. Es una energía renovable y limpia, pero debida a la incertidumbre de disponer de la fuente no se puede depender de ella para buques mercantes limitados por los tiempos de entrega ni en buques de guerra en los cuales se limitan las capacidades militares durante su empleo.

De los tres sistemas, el más propicio de ser instalado en buques de guerra sería el último, ya que permite no tener que disponer de una estructura fija que modifique la estructura del buque no compatible con las necesidades de un buque militar. La instalación de estas cometas se podría usar durante los tránsitos permitiendo no sólo la reducción de consumo, sino el aumento de la autonomía. Tras sus correspondientes estudios de viabilidad en los buques militares, no sería tan extraña la imagen de la serie "The Last Ship" de un buque clase Arleigh Burke propulsado por unas cometas (Figura 2-27). Aun así, hay que tener en cuenta los inconvenientes de esta tecnología, que no aportando una solución completa a la propulsión y no resulte posible su empleo en operaciones. Se tiene que estudiar como una alternativa de uso en caso de pérdida de la planta propulsora.

Figura 2-27 Propulsión eólica en buques militares. Fotograma de la serie "The Last Ship".

2.3.1.8 Aprovechamiento de la energía solar

El uso de la energía solar en los buques es ya una realidad. El sistema de placas solares que alimente el buque únicamente con energía solar está desarrollado y se ha probado con éxito en numerosas ocasiones. La más impactante es la vuelta al mundo del Turanor del proyecto "Planet Solar" (Figura 2-28), un catamarán de 30 metros de eslora con capacidad para 4 tripulantes que dio la vuelta al mundo en 160 días a una velocidad media de 8 nudos, pudiendo alcanzar una velocidad máxima de 14 nudos usando únicamente electricidad proveniente de placas solares instaladas en su cubierta. Sus baterías capaces de almacenar hasta 1,3 MW suponen su reserva de energía para su uso por la noche o los días lluviosos. Su presupuesto, 12,5 millones de euros para su construcción [51].

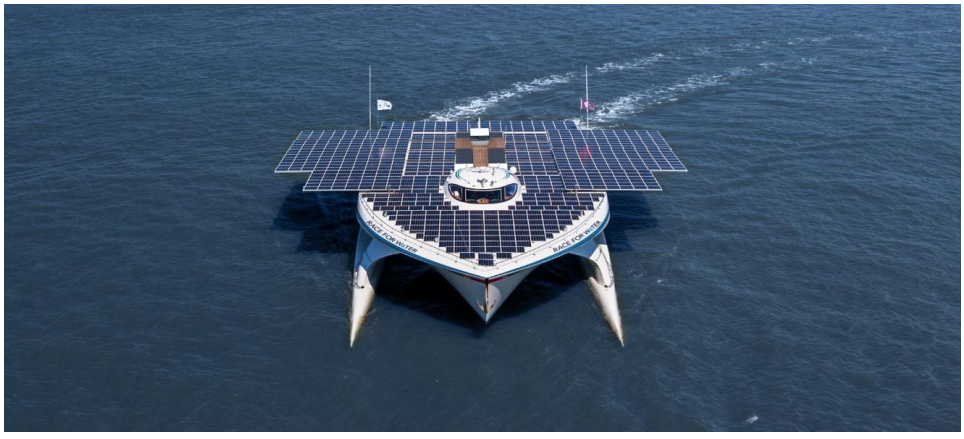

Figura 2-28 Buque Turanor "Planet Solar". Fuente: www.planetsolar.org

Otro de los ejemplos de buques con energía solar son los del proyecto Solemar (Figura 2-29), producidos en el astillero Seacleaner Trawler, con sede en Mallorca, son claro ejemplo del uso de esta tecnología en España. Un catamarán de 12 metros de eslora y 4,25 metros de manga, con capacidad para 60 pasajeros con velocidad de crucero de 4 nudos y velocidad máxima de 6. Sus baterías le permiten navegar hasta 150 horas sin sol. A lo largo de su vida útil de 25 años, comparando con un barco similar

con motores de gasóleo, dejará de emitir 7214 Tn de CO_2 a la atmósfera y dejará de consumir aproximadamente un millón de litros de combustible [52]. Estos buques se están usando actualmente en el Embalse del Tranco (Jaén), en el Parque del Retiro (Madrid) y en el puerto de Denia (Alicante), para transporte de pasajeros y paseos turísticos.

Figura 2-29 Buque Solemar. Fuente: www.seacleaner.com

Las ventajas de los buques solares son principalmente las siguientes:

- No emiten residuos de petróleo.
- No emiten CO_2.
- Usan exclusivamente energía solar gratuita.
- No producen contaminación acústica.

Sus desventajas:

- Mayor coste de construcción que un buque convencional.
- Velocidad reducida.
- Necesidad de mayor desarrollo para mejores baterías y potencia generada.
- Fuente de energía poco fiable, dependiente de meteorología y luz solar.

La energía solar constituye una fuente de energía de aplicación como auxiliar a otros usos de combustibles o como única fuente en el buque. Siendo actualmente una alternativa importante de estudio sobre todo para ciertos tipos de buques como transportes de poca distancia, turísticos o buques de recreo.

El uso en los buques de guerra tendría grandes desventajas y planteamientos a evaluar. Producirían poca energía para el total necesario, requerirían placas solares en la cubierta lo que puede disminuir las capacidades del buque y producir destellos. La principal aplicación de este tipo de energía sería en buques auxiliares de pequeño tamaño como pilotinas, como energía auxiliar para su uso en puerto, lo que requeriría un futuro estudio de viabilidad en estos tipos de buques.

2.3.1.9 Instalación de sistemas de caudalímetros

Un caudalímetro (Figura 2-30) es un elemento que permite medir la cantidad de fluido que circula a través del mismo, permitiendo conocer el caudal del líquido o gas y el volumen que pasa a través de la tubería o manguera a la que está conectado. Existen de distintos tipos según el principio que usen para medir el fluido que pase, así pueden ser principalmente ultrasónicos, eléctricos, magnéticos o mecánicos [53].

El uso de caudalímetros en los motores de los buques aumenta su efectividad si se utilizan junto con un sistema de monitorización y control de los caudalímetros. Permitiendo el conocimiento instantáneo del consumo de combustible desde la cámara de máquinas o desde el puente.

Mediante el empleo de este sistema se consigue:

- Conocimiento del consumo real de los motores del buque.
- Gestión objetiva de la actividad y gestión operativa del buque (o la flota) en función del gasto de combustible.
- Realización de prácticas de ahorro de combustible con resultados satisfactorios.
- Obtención de certificaciones de carácter ambiental.
- Realización de estudios de impacto ambiental.

Figura 2-30 Caudalímetro electromagnético tipo brida. Fuente: ACS Control System.

El empleo de un sistema de monitorización del consumo de combustible conlleva la posibilidad de alcanzar ahorros de entre un 5 y un 25% tras pruebas realizadas en buques de pesca por el centro tecnológico vasco AZTI [54]. La inclusión de esta medida se está implementando cada vez en más buques de pesca para controlar de forma objetiva y eficaz los consumos, así como en los buques de transporte como medida para poder llevas un análisis riguroso que permita la mejor decisión a la hora de elegir mejoras a adoptar en los buques para mejorar la eficiencia energética [11].

La inclusión de caudalímetros en los motores del buque es una medida a tomar de gran relevancia y que es estudiada en el apartado 3.1.5.1.

2.3.2 Combustibles alternativos

2.3.2.1 Uso de combustibles con menores niveles de azufre

Desde 2012, los combustibles marinos están obligados a tener niveles de azufre menores del 3,5% (Tabla 2-7). Medida en vigor actualmente excepto en sitios con mayores restricciones en las zonas de control de emisiones (ECA), establecidas en ciertas zonas del Mar Báltico, Mar del Norte, Costa norteamericana y zonas del Mar Caribe, donde se exige que este nivel sea de un 0,1% desde el 1 de Enero de 2015 [55]. En el MEPC 70 (octubre de 2016), la OMI decidió la reducción de estos niveles para el 1 de Enero de 2020 (prorrogable a 2025, aún por determinar).

Fuera de una ECA establecida para limitar las emisiones de SOx y de materia particulada	**En una ECA establecida para limitar las emisiones de SOx y de materia particulada**
4,50% masa/masa antes del 1 de enero de 2012	1,50% masa/masa antes del 1 de julio de 2010
3,50% masa/masa a partir del 1 de enero de 2012	1,00% masa/masa a partir del 1 de julio de 2010
0,50% masa/masa a partir del 1 de enero de 2020*	0,10% masa/masa a partir del 1 de enero de 2015

Tabla 2-7 Reducción de niveles de azufre en combustibles marinos. Fuente: Regla 14 Anexo VI Convenio Marpol de la OMI. Elaboración propia.

Por otro lado, la OMI, da una serie de recomendaciones, mediante dos métodos, el que evita la formación del contaminante, utilizando combustibles con menores niveles de azufre, y el de lavado de los gases de combustión antes de que sean emitidos.

La llegada de estas medidas supone la obligación para el sector marítimo de utilizar combustibles con un menor porcentaje de azufre, más caros, lo que pueda llevar al encarecimiento del transporte marítimo. Sin embargo, son medidas necesarias para la disminución de emisiones de dióxido de azufre, contaminante y principal causa de la lluvia ácida.

2.3.2.2 Tecnologías de emulsión de combustible

El uso de combustibles modificados permite una mejor combustión y menor uso de combustible, las emisiones son por tanto menores y los motores funcionan a menor temperatura, lo que conlleva un menor mantenimiento [56].

Una emulsión es una mezcla de dos líquidos no miscibles, como el agua y el diésel, uno de los cuales está en forma de pequeñas gotas (fase dispersa) dentro del otro líquido (fase continua). En el proceso de emulsión, la fase dispersa (agua) se introduce en la fase continua (diésel) y el producto resultante se puede utilizar como combustible.

Durante el proceso de combustión, las gotas de agua vaporizada junto a las de combustible, se evaporan y producen microexplosiones que permiten la mejor atomización del combustible (Figura 2-31). De esta forma, la superficie de contacto de las partículas de aire y combustible es mayor, mejorando la reacción y eficiencia de la combustión [56].

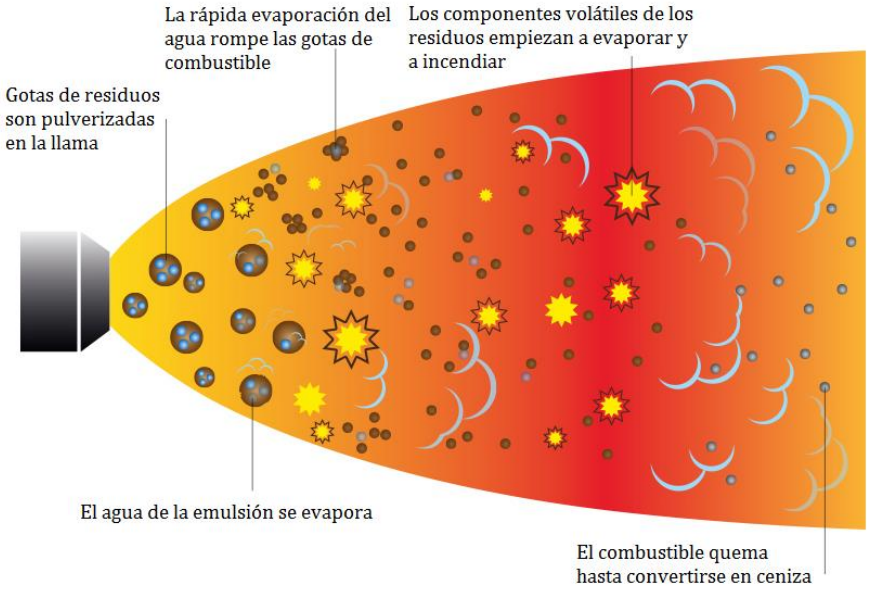

Figura 2-31 Combustión de una emulsión de combustible. Fuente: Incbio [56].

El uso de estos combustibles supone una reducción de costes en consumo de combustible, con ahorros netos de entre el 5 y 25%. Otras ventajas son la menor carga térmica y disminución de la temperatura del metal de la cámara de combustión, aumentando la vida de las piezas del motor y necesitando un sistema de refrigeración menos complejo. Reduce la corrosión y suciedad en la salida del gas y un menor tiempo de mantenimiento. En cuanto al medioambiente, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero e hidrocarburos no quemados [56].

2.3.2.3 El gas natural licuado como combustible marino

El gas natural licuado es gas natural sometido a un proceso de enfriamiento a -161 grados centígrados a presión atmosférica. De esta forma el gas natural se convierte en un líquido transparente, inodoro e incoloro, no corrosivo ni tóxico. Es la forma más eficiente para almacenar el gas natural, al ocupar 600 veces menos espacio en fase líquida que gaseosa. Tiene una menor densidad que el agua por lo que en caso de derrames sobre el agua, flotará sobre la superficie marina [57].

El GNL supone un combustible más limpio comparando con el diésel o gasolina. Su uso conlleva la reducción de emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes. A continuación (Figura 2-32), se muestran una comparación de las emisiones producidas en la combustión del GNL frente a las producidas en la combustión de otros combustibles con datos proporcionados por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España (MINETAD).

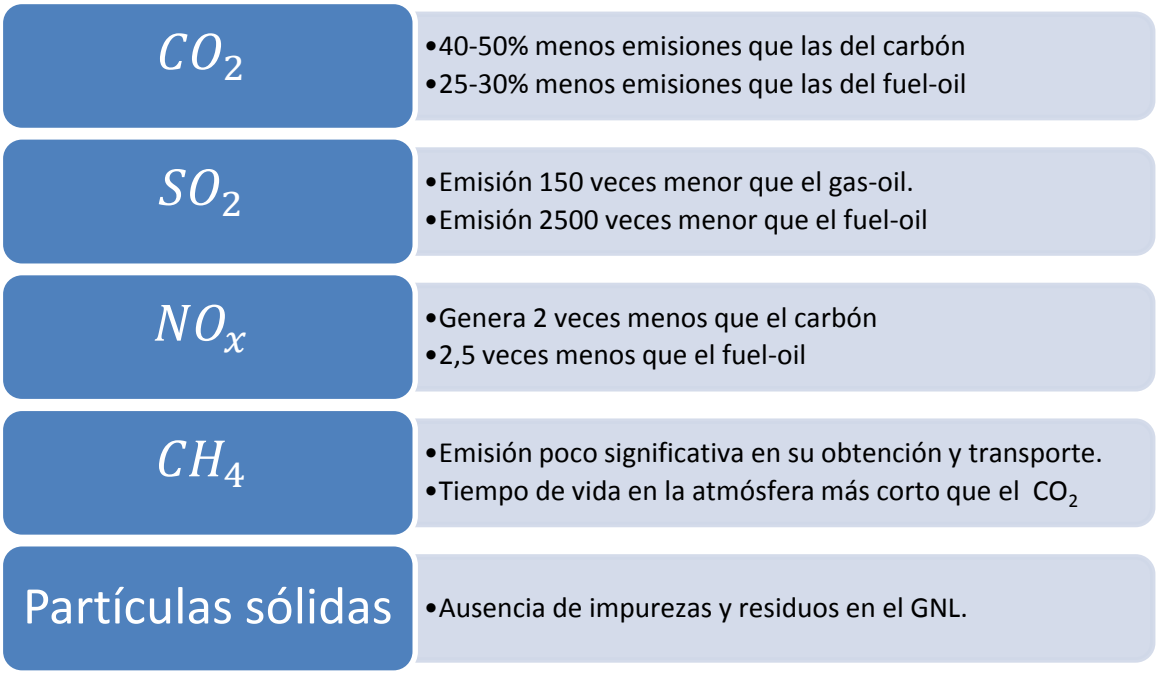

Figura 2-32 Comparativa de emisiones del GNL frente a otros combustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MINETAD [58].

Además de un combustible más limpio que otras energías no renovables, el GNL tiene un poder calorífico mayor que el diésel marino y la gasolina, pudiendo con la misma cantidad, proporcionar mayor energía al motor. En la siguiente figura (Figura 2-33) se muestra la comparación con el fuelóleo y la gasolina.

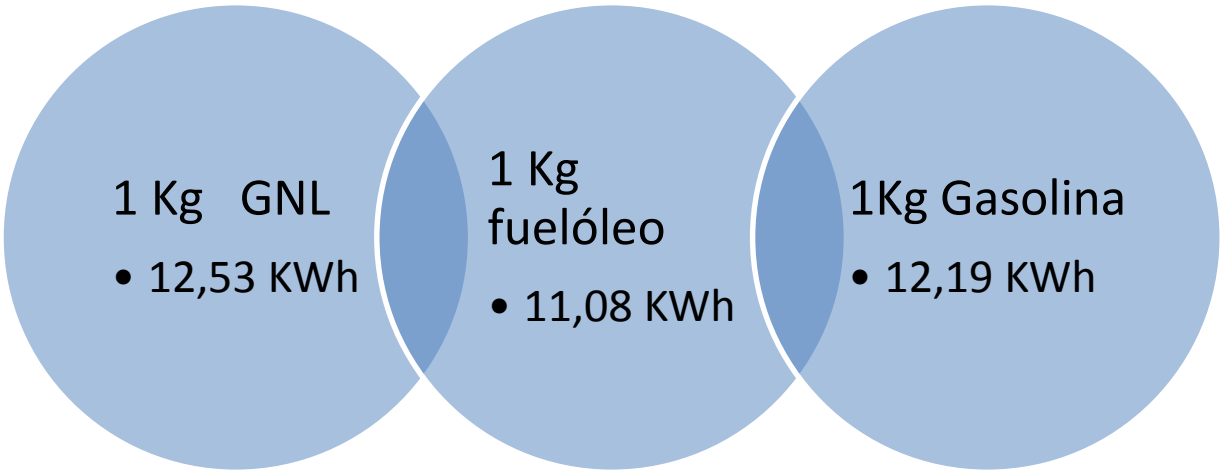

Figura 2-33 Comparación de equivalencias energéticas entre combustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDAE [11].

El coste de este combustible es menor que el del petróleo crudo, en las tablas siguientes (Figura 2-34 y Figura 2-35) se pueden ver los datos de los años 2011 a 2015, comparando datos extraídos del Estudio estadístico de la energía mundial de BP para los distintos referentes del precio del petróleo y el gas natural y de la Administración de Información para la Energía (EIA) de Estados Unidos. En 2015, el precio de un millón de unidades térmicas británicas (1 MBtu = 1054,35 MJ) de gas natural era de 2$ para los valores de referencia de US Henry Hub o para Canadá, 6,5$ en Alemania y Reino Unido y 10,3$ para el precio medio de importación de Japón. Mientras que la misma unidad de energía costaba en 2015 en torno a 8,5$ para el petróleo, a pesar de la fuerte bajada de precio de 2014 a 2015 [59].

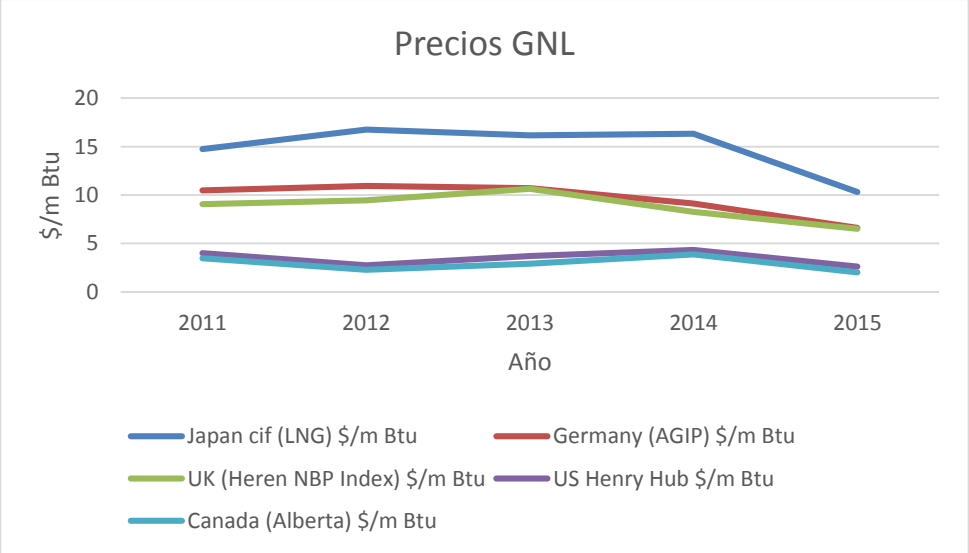

Figura 2-34 Precio del GNL. Fuente: Elaboración propia a partir del informe BP Statistical Review of World Energy 2014 [59].

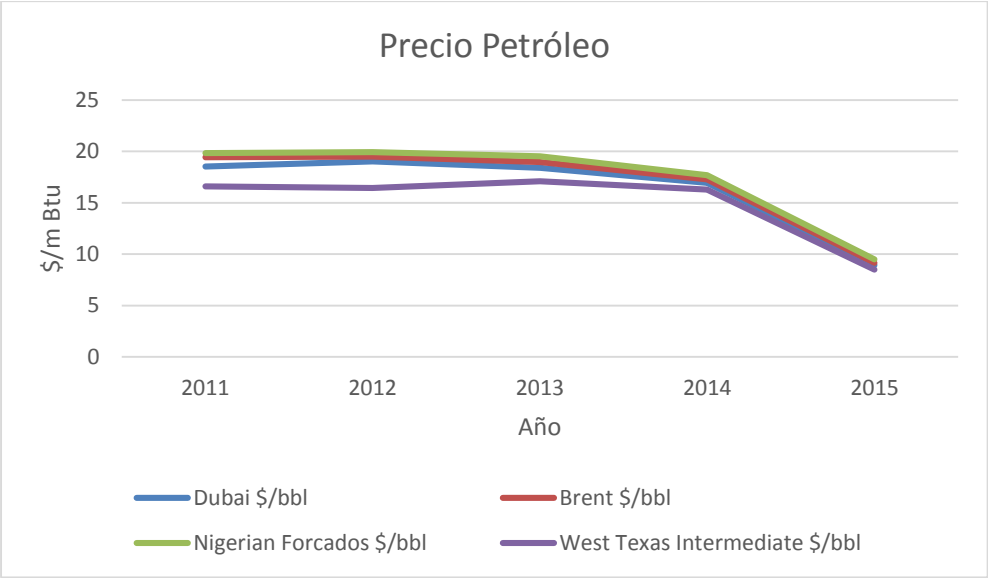

Figura 2-35 Precio del petróleo. Fuente: Elaboración propia a partir del informe BP Statistical Review of World Energy 2014 y US Energy Information Administration [59], [60].

El sector marítimo aboga cada vez más por el uso de este combustible a bordo de los buques, formándose en 2016 la coalición de empresas industriales Sea/LNG (Mar/GNL) de diferentes sectores, entre las que destacan las más importantes compañías del sector marítimo e industrial del mundo como Lloyd´s Register, Mitsubishi Corparation, Gas Natural Fenosa, Bureau Veritas. Con objetivo de reducir la contaminación de los buques para 2020 como fija la OMI y cumplir el contenido máximo de azufre en combustibles marinos del 0,5% fijado para 2020 [61]. Para ello, este grupo propone el uso del gas natural licuado como vía de solución. Entre sus prioridades destaca la creación de las infraestructuras necesarias para que el GNL pueda sustituir o complementar al diésel marino utilizado mayoritariamente en la actualidad.

La Asociación Ibérica de Gas Natural para la Movilidad (GASNAM) es una asociación compuesta por la Dirección General de la Marina Mercante del Ministerio de Fomento, diferentes institutos tecnológicos de las comunidades españolas y empresas como Gas Natural Fenosa, Enagás, Endesa o Cepsa entre otras.

La asociación expone lo siguiente: "El gas natural licuado se perfila como el combustible que liderará un nuevo tiempo en el transporte marítimo, aunque su implantación a gran escala pasa por supervisar varios retos como adaptar los barcos o fijar las normativas comunes. España, líder europeo en GNL, tiene capacidad para ser el gran referente en Europa" [62].

- A nivel mundial, se estima un número aproximado de 1.000 barcos de GNL para el año 2020.
- En la actualidad, en Europa hay 48 barcos de GNL en operación y 29 en fase de pedidos en firme.
- España, junto a Japón y Corea del Sur, ocupa las primeras posiciones mundiales en capacidad de regasificación por número de habitantes. Además, España mueve 45.000 cisternas de GNL al año.
- Las navieras ahorrarían un millón de euros en combustible al año utilizando motores de GNL en sus barcos.
- España es el destino del 37% del GNL que se descarga en la UE.
- Un gran buque de fueloil marino contamina en un año tanto como ocho millones de taxis.

El gas natural licuado supone el combustible del futuro a corto plazo, por lo que supone una fuente de energía clave a plantear en el empleo como combustible en los buques.

2.3.2.4 El agua de mar, combustible ilimitado a bordo

El Laboratorio de la Armada de Estados Unidos anunciaron en Abril de 2014, el vuelo con éxito de un avión a control remoto propulsado con agua de mar como combustible (Figura 2-36) [63]. Realizando la extracción del CO_2 e hidrógeno del agua marina, la convirtieron en un hidrocarburo líquido.

El CO_2 tiene una concentración 140 veces mayor en el agua de mar que en el aire, en forma de bicarbonato. Mediante un catalizador, tras la extracción de las partículas de carbono se procede a la polimerización para la producción de combustible. El producto final en sus inicios es el equivalente al combustible "JP-5" utilizado en las aeronaves de las Armadas de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN). A partir de Agosto de 2016, un nuevo estudio del Laboratorio de investigación de la Marina de Estados Unidos establece la posibilidad de conseguir otros combustibles como el F-76 utilizado en los buques OTAN o GNL, multiplicándose las posibilidades de aplicación.

Un combustible inagotable para la propulsión marina. Con este combustible se eliminaría la dependencia de los combustibles fósiles, operaciones de reabastecimiento en la mar y se obtendría una permanencia en la mar únicamente limitada por el reabastecimiento de víveres para la dotación de los buques, una tecnología clave para una marina de guerra.

Figura 2-36 Vuelo de avión radiocontrol con combustible de agua de mar por investigadores del laboratorio de la Armada de Estados Unidos. Fuente: U.S. Naval Research Laboratory.

En lo económico, el desarrollo de esta tecnología podría suponer la devaluación del petróleo y sus derivados, y el cambio general del uso de combustibles en la propulsión marina. De momento la predicción del coste del galón (3,79 litros) está entre 3 y 6 dólares, pudiendo ser económicamente viable tras el desarrollo de unos 7 a 10 años.

Entre los problemas a su puesta en marcha, la falta de interés de las grandes empresas en la inversión de dinero en una tecnología en sus primeros pasos. Además, esta fuente de energía no acabaría con la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. Pero el principal inconveniente es la tasa de generación de combustible con este método. La segunda generación de estos módulos, según el estudio del año del 2016, pese a que producen 40 veces más rápido que la anterior generación, son capaces de producir poco más de un galón (3,79 litros) de combustible al día. Una alternativa no viable de momento para las necesidades energéticas de un avión o un buque.

Las investigaciones de la Armada Estadounidense buscan la producción a mayor escala, pudiendo emplearse como aporte al F-76 y JP-5 usado en los motores navales, pero de momento la producción es insuficiente para grandes necesidades energéticas. En un futuro con el desarrollo de esta tecnología podría estudiarse la viabilidad en drones como el de la Armada Española, Scan-eagle, con un consumo menor que el de otras aeronaves.

2.3.2.5 El hidrógeno, tecnología limpia y silenciosa

El hidrógeno constituye una alternativa como fuente de energía en los motores. Entre sus ventajas, cero emisiones y bajo nivel de ruido. El hidrógeno se puede extraer del agua, recurso inagotable en el planeta, sus productos de combustión son vapores de agua no contaminantes, sólo produciendo niveles de óxidos de nitrógeno 200 veces menores que en los vehículos actuales con diésel [44].

El hidrógeno se produce por el paso de una corriente eléctrica a través del agua y se almacena en tanques a presión, su distribución es posible a través de tuberías o transportes de estos tanques, con múltiples aplicaciones en viviendas, fábricas o vehículos.

Ya existen numerosos buques de pasajeros que utilizan pilas de combustible a base de hidrógeno, un ejemplo es el buque FCS Alsterwasser (Figura 2-37), un buque de transporte de 25 metros de eslora con capacidad de hasta 100 pasajeros que funciona con esta tecnología [64]. Desde la botadura de este buque en 2008, el proyecto Zemships (buques cero emisiones) respaldado por la Unión Europea está trabajando en el desarrollo de esta tecnología en buques [65]. Las investigaciones e inversiones están siendo destinadas tanto para los buques como para instalaciones en tierra para el surtido del combustible.

Figura 2-37 Buque de funcionamiento de hidrógeno FCS Alsterwasser. Fuente: Proton-motor [64].

Entre sus desventajas cabe destacar que es necesario un elevado gasto energético para el proceso de obtención del hidrógeno y el alto peso de las pilas de combustible actuales. Las pilas de combustible tienen una corta vida útil y es preciso cuidar la seguridad en su manejo y almacenamiento al poder ser altamente explosivo. Su principal problema es su precio, incapaz de competir con el de tecnologías convencionales. La solución para ello es el desarrollo futuro, mejoras en su obtención y el aumento de la demanda e instalaciones que lo produzcan y distribuyan [66].

2.3.3 Avances e investigaciones realizadas por la flota pesquera

El problema que afronta el sector pesquero es el de la subida de los precios de combustible, que disminuye la rentabilidad de la actividad, ya que pese al aumento de la subida del precio del petróleo no ha sido así en la venta del pescado [67].

Las opciones para afrontar el problema por parte de las cofradías de pescadores son entonces el abandono de la actividad o la apuesta por tecnologías que reduzcan el consumo de los buques siendo más competitivos.

En el presente apartado se exponen algunos de los proyectos llevados a cabo por la flota pesquera española, difundidos por la revista informativa del Fondo Europeo de la Pesca en España, y publicados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de España [68]. Un ejemplo de búsqueda de la mejora continua en el sector pesquero para obtener el menor consumo y mayor rentabilidad a las actividades pesqueras españolas que bien pueden servir de muestra de las mejoras de la EE a bordo de los buques.

2.3.3.1 Proyecto ESB Cataluña, mejoras en la pesca de arrastre

El objetivo del proyecto es la mejora de la eficiencia, sostenibilidad y el beneficio de la flota pesquera de arrastre catalana. El aumento del precio de los combustibles llevó a la necesidad de aumentar la rentabilidad de la pesca catalana, la necesidad de mejora de la ecoeficiciencia de la flota y la incorporación de mejoras tecnológicas. El proyecto, desarrollado por la Dirección General de Pesca y Acción Marítima del Departamento de Agricultura, Alimentación y Acción rural de Cataluña, colaborando la Universidad Politécnica de Cataluña , Tragsatec (coordinador) y el Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos de Cataluña, realizado en cinco buques de la flota de arrastre de la comunidad. El proyecto consiguió conocer y mejorar la ecoeficiencia de la flota, establecer medidas a cada barco y concienciar a los profesionales del sector en la gestión de la energía [68].

El proyecto llevó a cabo un estudio del ahorro, dotando a los pesqueros de sensores de medición del consumo de combustible, temperatura del motor y salas de máquinas, posición del barco, rumbos del viento entre otros. Los datos obtenidos fueron analizados posteriormente. Además se ensayaron diferentes medidas destinadas a reducir la resistencia del avance de la embarcación como la mejora de los equipos de pesca, las medidas tomadas fueron expuestas en el proyecto tal y como sigue a continuación (Tabla 2-8):

Medida	Ahorro de combustible estimado	Inversión requerida
Puertas	5-20%	8000 - 15000 €
Redes de arrastre	5-20%	14000 - 22000 €
Adecuación de la velocidad e instalación de un caudalímetro	5-16%	4300 €
Acondicionamiento sala de máquinas	3-4%	7300 €
Instalación polarizador en el circuito de alimentación de combustible	2-4%	5200 - 9500 €
Instalación reductora múltiple reducción	5-12%	30000 - 35000 €
Instalación hélice de paso controlable	6-15%	20000 - 125000 €
Limpieza y disminución rugosidad casco y apéndices	4-5%	2000 €
Instalación flaps, quillas de balance y estabilizadores	1-3%	6000 - 8000 €
Bulbos	3-5%	30000 – 35000 €
Distribución eficiente pesos	5-10%	6000 – 8000 €

Tabla 2-8 Medidas adoptadas en el proyecto ESB. Fuente: Proyecto ESB Cataluña. Elaboración propia.

Entre las conclusiones que se pueden sacar sobre este proyecto es la importancia de la elección de las medidas a adoptar, ya que podemos conseguir porcentajes de ahorro similares con inversiones menores en función de la mejora. Entre las medidas con mejor relación ahorro-inversión destacan la adecuación de la velocidad e instalación de un caudalímetro, acondicionamiento de la sala de máquinas, la limpieza y disminución de la rugosidad del casco y apéndices y la distribución eficiente de pesos.

Así, una mejora concreta de uno de los buques estudiados, demostró que con una disminución de la velocidad en 0,9 nudos, pasando de 12,6 a 11,5 nudos, permitía ahorrar un 16% de combustible. Junto con esta medida incluyen la instalación de un caudalímetro para conocer de forma precisa el gasto de combustible, por un coste de 4300 €. Según el estudio, con inversiones de en torno a 40000 € por buque, los armadores podrían recuperarlas en menos de dos años.

2.3.3.2 Proyecto “PSE Peixe Verde”

Este proyecto está compuesto por diez subproyectos que tienen como objetivo el estudio de la mejora del rendimiento de las flotas de diferentes puertos gallegos. Su finalidad es la búsqueda de soluciones que permitan al sector pesquero afrontar las subidas del precio del petróleo durante el periodo de realización del proyecto (2007-2012). Apoyado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda digital, la Xunta de Galicia y la empresa Puerto de Celeiro S.A., agrupación de cerca de 100 armadores pesqueros.

Entre otras mejoras, destacan la instalación de sistemas de generación de agua caliente sanitaria aprovechando el calor del agua de refrigeración del motor propulsor. El uso de nuevos combustibles es

otra vía de mejoras, en la que apuestan por el uso del gas licuado de petróleo (GLP) como combustible en los buques. A fechas del estudio (2011) operaban 25 lanchas con GLP en los puertos gallegos, aumentando el rendimiento económico de la actividad y disminuyendo el impacto ambiental en las rías gallegas.

Entre los diferentes subproyectos se distinguen la realización de auditorías energéticas para el mejor conocimiento energético de la flota pesquera y los estudios de viabilidad técnica y económica, implementación de sistemas de gestión y control de la energía, y puesta en marcha de aplicaciones piloto en el anteriormente pesquero, ahora buque-laboratorio Santiago Apóstolo, y la difusión de los resultados hacia el sector pesquero español.

2.3.4 Avances e investigaciones realizadas por la Armada de Estados Unidos

2.3.4.1 Programa Energy Warrior-Green Fleet

La Armada de los Estados Unidos (US Navy) ha sido pionera en la introducción de medidas de mejora de la EE en sus buques. Su principal caballo de batalla, el programa de eficiencia energética "Great Green Fleet".

Entre los objetivos de la US Navy figuran los siguientes [69]:

- Incrementar el uso de energía alternativa.

La US Navy ha demostrado la efectividad de ciertos combustibles alternativos como biocombustibles para sustituir a los combustibles fósiles y cualificados para poder aportar el combustible a través de la agencia logística energética de defensa. Su objetivo para 2020 es que el 50% del consumo total de energía provendrá de fuentes alternativas.

- Aumentar la energía alternativa en tierra.

El programa de la US Navy tiene como objetivo generar 1 gigawatio de energía renovable, suficiente como para alimentar 250000 hogares o 14 destructores Arleigh Burke. Este objetivo ha sido puesto en marcha durante 2016 y prevén conseguir esta energía a un precio igual o menor que con energías no renovables. Su objetivo para 2020 de la US Navy es producir el 50% de la energía necesitada en las instalaciones en tierra mediante energías renovables.

- Hacer navegar la "Great Green Fleet".

La US Navy demostró en 2012 durante los ejercicios "Rim of the Pacific" la posibilidad de uso de combustibles alternativos en todos los buques y aeronaves que participaron

- Reducir el uso de petróleo en situaciones sin necesidades tácticas.

La flota estadounidense ha aumentado significativamente el número de vehículos capaces de usar biocombustibles y está desarrollando los vehículos cero emisiones.

- Adquisiciones eficientes energéticamente.

La evaluación de los factores energéticos será obligatorio para la concesión de contratos de construcción de edificios e instalación de sistemas por parte de empresas externas.

Entre las medidas de reducción del consumo energético que lleva a cabo la US Navy en los buques figuran las siguientes [70]:

- Gestión de los datos energéticos: Se realiza un control instantáneo de la demanda energética del buque. Esto permite reducir el consumo energético del buque e incrementar su eficiencia while meeting system performance and reliability requirements.
- Aletas de popa: La instalación de estas aletas modifica el flujo de agua bajo el casco del buque para reducir las turbulencias, de esta forma se reduce la resistencia de avance del casco ahorrando combustible.
- Iluminación de estado sólido: El uso de la tecnología de diodos emisores de luz (LED) para la iluminación de los buques permite ahorrar energía, además los LED tienen mayor durabilidad, reduciendo el mantenimiento.
- Sistema de control de la gestión de la temperatura: Un sistema automático con ayuda de termostatos provee la climatización apropiada para cada compartimento del buque, reduciendo el malgasto de energía.
- Gestión del combustible en aprovisionamiento en vuelo: Disminución del tiempo de relleno y suministro del combustible necesario para evitar tener que desechar el combustible para poder aterrizar.

2.3.5 Avances e investigaciones realizadas por otras marinas de guerra

2.3.5.1 Real Marina Británica

La Marina de Reino Unido sigue un plan de mantenimiento del medio ambiente en el que busca minimizar el efecto de sus operaciones en el ambiente marino [71]. Para ello, tienen unas reglas de actuación en función de la zona en la que se encuentren navegando o realizando ejercicios.

Las Zonas de Protección Marítimas (MPA, en sus siglas en inglés), diferencian las zonas de operaciones en las que los buques tienen una guía de acciones que tienen permitido realizar y cuales tienen prohibidas. Así se distinguen 5 tipos de zonas:

1. MPA designada para la protección de las aves.
2. MPA designada para la protección de las características de la costa.
3. MPA designada para la protección de fondos marinos de profundidades menores a 20 metros.
4. MPA designada para la protección de cetáceos.
5. MPA designada para la protección de fondos marinos de profundidades mayores a 20 metros.
6. Aguas abiertas en mar territorial de Reino Unido o alta mar a partir de más de media milla de una MPA.

Las operaciones prohibidas en estas zonas son las relativas a proteger lo vulnerable o de interés medioambiental de esa área. Así, en zonas de protección de aves están prohibidos los ejercicios antiaéreos, en zonas de protección del fondo marino está prohibido fondear o realizar ejercicios de minado o contraminado y en zonas de protección de cetáceos prohibido el uso de sónar.

2.3.5.2 Real Marina Australiana

Australia sigue el plan Estrategia Energética de la Defensa Estatal 2014-2019, documento en el que define sus políticas de mejoras de la gestión energética [72]. Entre sus objetivos destacan:

- Monitorización de la energía, uso de infraestructura y procesos que le permitan medir el consumo y producción energética.
- Reducir los requerimientos energéticos maximizando la eficiencia energética.
- Mejorar las conductas de ahorro de energía.
- Uso de energías limpias, fuentes más sostenibles y seguras sin comprometer la capacidad de defensa de Australia por las iniciativas energéticas.
- Proveer soluciones energéticas rentables y que originen beneficio económico.
- Colaboración entre los distintos cuerpos de seguridad para la implementación exitosa de la Estrategia.
- Aprender de la experiencia de otros, nombrando como ejemplo a los Ministerios de Defensa de Estados Unidos y Reino Unido.
- Proveer de mejora continua e innovación, usando los mejores sistemas de monitorización y gestión de la energía.

2.3.5.3 Real Marina Canadiense

El Ministerio de Defensa de Canadá lleva adelante un plan de Estrategia de Desarrollo Sostenible Federal, en el que recoge una serie de objetivos para que la actividad de sus fuerzas armadas respete lo mejor posible el medio ambiente [73]. Sus objetivos principales:

- Protección de las especies en riesgo de extinción.
- Gestión de los residuos químicos y zonas contaminadas.

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero: Reducción para 2020 en un 17% sobre valores de 2005 en edificios y flota de vehículos comerciales.
- Gestión de los activos contaminantes y basuras.
- Mejora de la gestión energética de edificios e instalaciones estatales.
- El 75% de los vehículos adquiridos para el 31 de Marzo de 2017 serán los más eficientes en su clase o funcionarán con combustibles alternativos, híbridos o eléctricos.
- Concienciación de los trabajadores del Ministerio de Defensa en materia de eficiencia energética y medio ambiente.

2.3.5.4 Marina militar Italiana

La marina de guerra de Italia tiene un concepto similar a la US Navy, la "Flotta Verde" (Flota Verde), un proyecto iniciado en 2012 para encontrar combustibles marinos alternativos al petróleo y sus derivados y con vista a mejorar la seguridad energética nacional y reducir las emisiones contaminantes [69].

El proyecto "Flotta Verde" incluye los siguientes objetivos:

- Adopción de combustible sintético renovable, en línea con la Directiva 2009/29/EC (Horizon 2020).
- Desarrollo y uso de tecnologías ecológicas para reducir el impacto de la actividad de sus buques como por ejemplo la instalación de iluminación LED en los buques.
- Reducción del consumo de energía de los buques, mediante procedimientos de mejora de la eficiencia energética (propulsión eléctrica o gestión de la energía a bordo).

La marina de guerra italiana es líder en el uso de biocombustibles en Europa, siendo la primera en lanzar el uso del biodiesel en el sector naval usando un combustible de mezcla de biodiesel en un porcentaje mayor del 50% en sus buques.

3 DESARROLLO

3.1 Posibilidades de aplicación de la normativa sobre eficiencia energética de la marina mercante a la Armada Española

3.1.1 Estudio de la posibilidad de aplicación de la normativa

Tras el estudio realizado acerca de las distintas normativas para la mejora de la eficiencia energética por parte de los diferentes gobiernos, la OMI y la Unión Europea, se prosigue con los siguientes objetivos de este trabajo: Determinar las condiciones de aplicación de la normativa a los buques de guerra y establecer las posibilidades de aplicación.

En el presente apartado se estudiará la aplicabilidad de las normativas de eficiencia energética a una marina de guerra, en concreto, a la Armada Española. Las normativas de aplicación son las reflejadas en el Marco Regulador sobre la eficiencia energética en buques (Figura 3-1), correspondiendo al EEDI, el EEOI, el plan SEEMP y el sistema SNV de las emisiones de CO_2 de la Unión Europea, descartando el sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible de los buques de la OMI, por considerarlo similar al propuesto por la UE y aún en desarrollo.

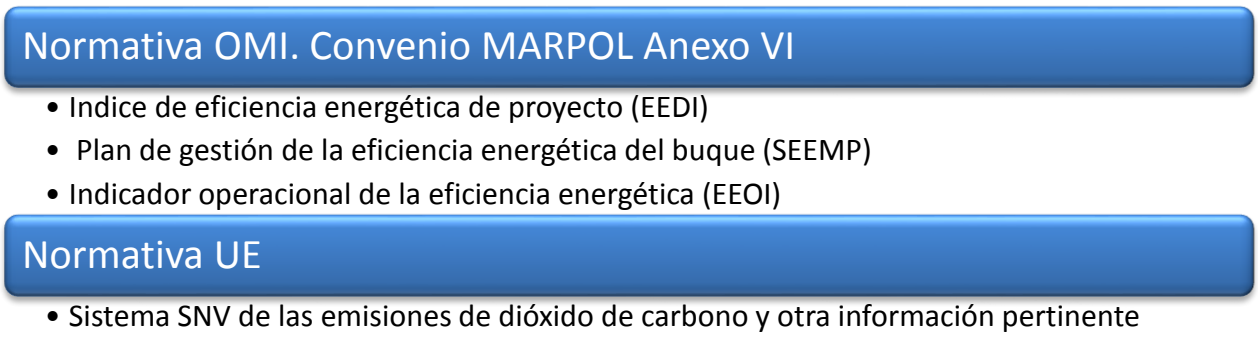

Figura 3-1 Relación de normativas a estudio de aplicación. Elaboración propia.

Primeramente se va a realizar una comparativa entre un buque de guerra y un barco mercante en aspectos de navegación y consumos, estableciendo sus relaciones y los criterios a tener en cuenta a la hora de aplicar las diferentes normativas, debido a las características especiales de un buque de guerra.

3.1.1.1 Comparativa de un buque de guerra con un barco mercante

La definición de buque según la OMI es la siguiente; "Por *buque* se entiende una embarcación, de cualquier tipo, que opere en el medio marino, incluidos los hidroaviones, los aerodeslizadores, los sumergibles, los artefactos flotantes y las plataformas fijas o flotantes."

Según el libro "Fundamentos de Maniobra" de la Armada Española, "se designa en general con el nombre de buque o barco a todo vaso flotante, de suficiente entidad o tamaño para poder navegar".

Por otro lado, se define buque mercante como la embarcación destinada a cualquier actividad con fin lucrativo como el transporte de mercancías o pasajeros o la actividad pesquera.

Un buque de guerra es todo buque perteneciente a las Fuerzas Armadas de un Estado que lleve los signos exteriores distintivos de los buques de guerra de su nacionalidad, que se encuentre bajo el mando de un oficial de la Marina al servicio de aquel Estado e inscrito en el escalafón de oficiales o su equivalente, y cuya dotación esté sometida a las normas de la disciplina militar [74].

Un buque debe cumplir las condiciones de flotabilidad, resistencia, estanqueidad, navegabilidad, estabilidad, y velocidad para ser considerado como tal [75]. Estas son las características principales que ha de tener un buque independientemente de su función específica. Siendo definidas a continuación, basándose en la cita:

- Flotabilidad: Cualidad que permite al buque mantenerse a flote a pesar de que algunas de sus partes se encuentren inundadas. Una buena división estanca de su interior favorece esta cualidad, así como una obra muerta elevada.
- Resistencia o solidez: Se exige una estructura del casco robusta para resistir los esfuerzos a que el buque se ve sometido durante su vida por la acción de los diferentes estados de la mar y de los pesos que transporta. Esta cualidad incide notablemente en el peso total del buque, razón suficiente para el desarrollo y avance de las técnicas y materiales de la construcción naval.
- Estanqueidad: La propiedad de no permitir la entrada ni salida de líquidos dentro del barco.
- Navegabilidad o facilidad de gobierno: Característica que se requiere en razón de la necesidad de movimiento del buque en todas las direcciones. La facilidad de gobierno es función de las formas y del reparto de los pesos en el sentido longitudinal en lo referente a su estructura.
- Estabilidad: Característica que da lugar a que vuelva a su posición de equilibrio por sí mismo, cuando ha sido desplazado de ella por un agente externo. Influyen en la estabilidad los pesos y las formas del buque.
- Velocidad: Cualidad dependiente de las formas del buque y de la potencia del propulsor que posee.

La actividad para la cual es concebido un buque de guerra rige las características especiales que debe cumplir. Desde el primer momento de su diseño se han de tener en cuenta las necesidades concretas de este tipo de buque, para proyectar el poder naval de una nación con medios de detección, artillería, misiles, transporte de fuerzas anfibias, capacidad de aterrizaje y despegue de aeronaves, etc. Además de las características comunes de los buques de guerra, existen distintas clases de buque, cada una de las mismas con una actividad distinta a la de los demás, lo que supone una mayor especialización en cada subgrupo de los buques militares.

Estas necesidades conllevan un gasto especial y único en los buques militares que se refleja en todo el ciclo de vida del buque, desde el diseño hasta su desguace. Si bien los buques militares requieren de unas exigencias distintas a las de los barcos dedicados al transporte marítimo, gran parte de los costes de los equipos militares se pueden comparar con otros necesarios en la marina mercante. Por ejemplo, la necesidad de un buque tipo escolta de disponer de un cañón frente a la necesidad de un portacontenedores de disponer de grúas que le permitan la carga y descarga de los contenedores en puertos que no dispongan de éstas.

Las acciones que un buque de guerra va a tener que cumplir, conllevan unas necesidades energéticas especiales debido al sistema de combate. En el análisis de la fragata F-105 se muestra la distribución del consumo energético a bordo (Tabla 3-1).

Propulsión	483 kW
Planta eléctrica	174 kW
Mando y control	1623 kW
Sistemas auxiliares	5322 kW
Equipamiento y mobiliario	983 kW
Armamento	430 kW

Tabla 3-1 Distribución del consumo energético F-105. Fuente: Elaboración propia a partir de [76].

El porcentaje que corresponde al consumo energético del armamento en el buque es del 5% (Figura 3-2), siendo los sistemas auxiliares, tales como sistemas de refrigeración y climatización o luminaria, los que requieren las mayores necesidades energéticas.

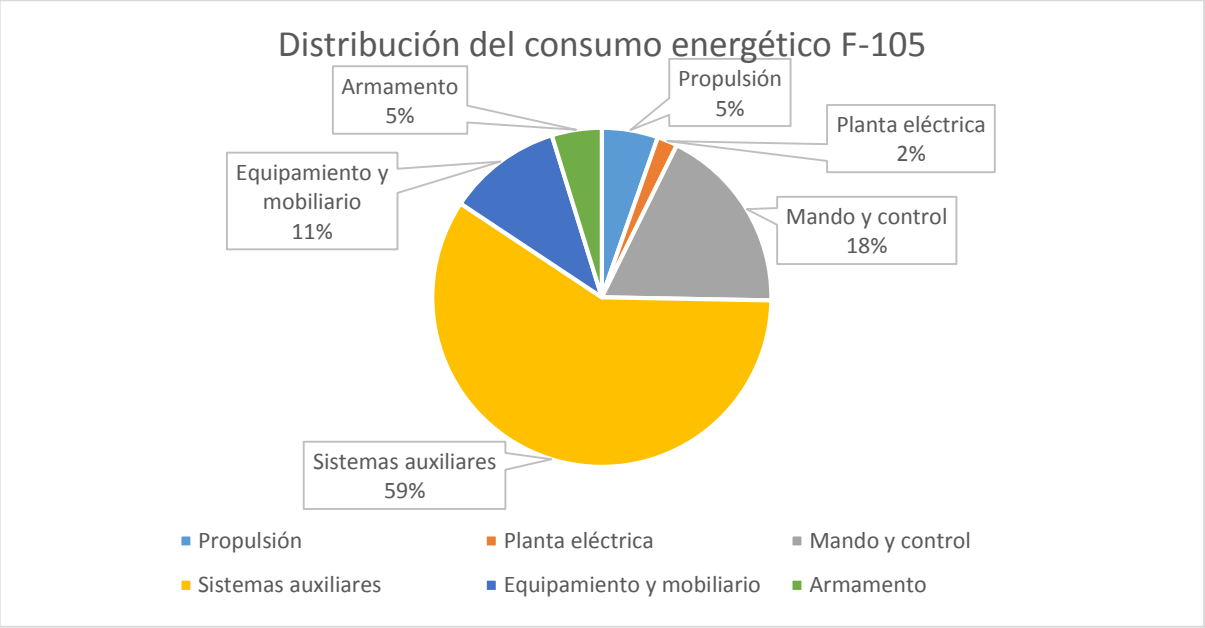

Figura 3-2 Distribución del consumo energético F-105. Fuente: Elaboración propia a partir de [76].

En la siguiente tabla (Tabla 3-2) se muestra la distribución de consumo energético de un buque de pesca [77].

El balance energético del buque de pesca se realiza para distintas situaciones de carga, entre las que se encuentran las siguientes:

-Navegando sin carga: Consumo de energía eléctrica necesario para los servicios normales del buque (propulsión, luminaria o habitabilidad), sin ser necesaria la alimentación de equipos de labores de pesca.

- Faenando: Consumo de los servicios normales del buque además de toda la maquinaria empleada para la labor de pesca, elaboración y conservación del pescado.

- Navegación con carga: Consumo de los servicios normales del buque y conservación del pescado hasta la llegada a puerto, sin necesidad de los equipos para labores de pesca.

- Puerto con carga: Consumo de los equipos de conservación y descarga de la pesca.

-Emergencia: Consumo únicamente por parte de equipos vitales como luces de navegación, radio o bombas contraincendios.

Grupo (Kw)	Navegación sin carga	Puerto con carga	Navegación con carga	Faenando	Emergencia
Propulsión	23,115	12,67	17,59	17,4	5,48
Planta eléctrica	24,65	26,35	31,68	32,93	16,85
Mando y vigilancia	3,97	1,42	4,57	6,78	3,52
Sistemas auxiliares	134,76	162,26	160,96	194,79	41,02
Habilitación	7,32	7,22	9,52	7,5	0
Total Kw	**193,8**	**209,9**	**224,3**	**259,4**	**66,9**

Tabla 3-2 Balance energético de un buque palangrero. Fuente: Elaboración propia a partir de [77].

La situación más similar a la de un buque de guerra en navegación es la de navegación con carga, en la que el buque cumple labores de navegación con carga frigorífica, al requerir mayor potencia eléctrica para mantener refrigerada la pesca. Así, también se pueden relacionar los sistemas y artes de pesca usados en la faena del buque pesquero el equivalente al uso de los equipos y monitores específicos de un buque de guerra. La distribución de un buque pesquero en navegación con carga sería la siguiente (Figura 3-3).

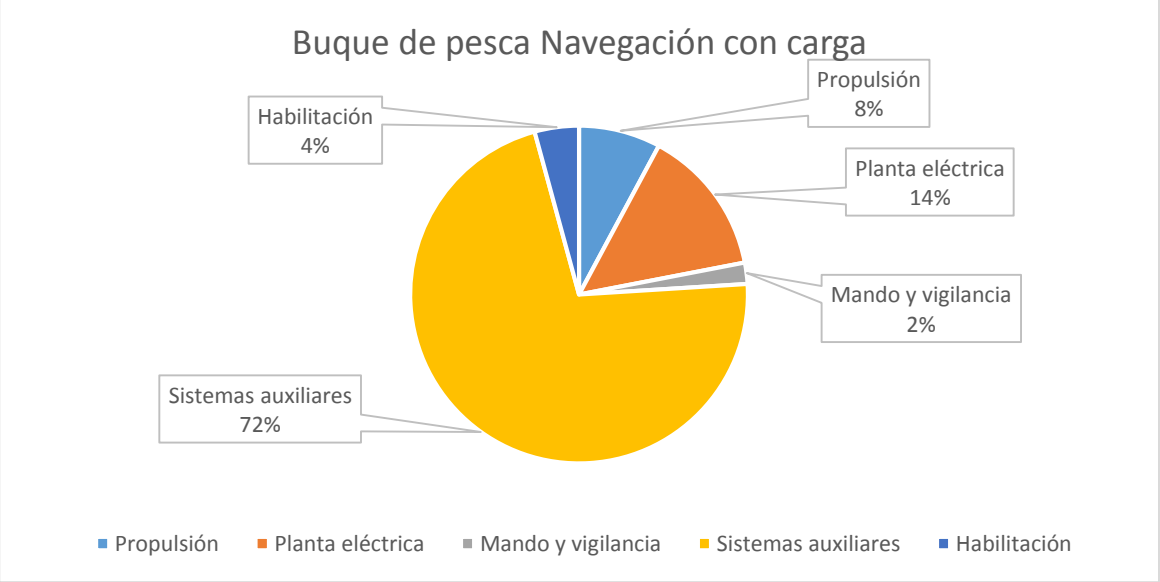

Figura 3-3 Distribución del consumo energético de un buque de pesca para navegación con carga. Fuente: Elaboración propia a partir de [77].

La comparación de la distribución energética de la F-105 y el buque pesquero queda como sigue en la tabla siguiente (Tabla 3-3):

Grupo	F-105 (%)	Buque pesquero (%)
Propulsión	5	8
Planta eléctrica	2	14
Mando y vigilancia	18	2
Sistemas auxiliares	59	72
Habilitación	11	4
Armamento	5	0

Tabla 3-3 Comparativa distribución de consumos entre buque de pesca tipo palangrero y buque escolta F-105. Fuente: Elaboración propia a partir de [76], [77].

Un buque puede estar en diferentes situaciones de carga a lo largo de su ciclo de vida que influyen en el consumo energético, de forma genérica se relacionan las distintas situaciones a continuación (Figura 3-4):

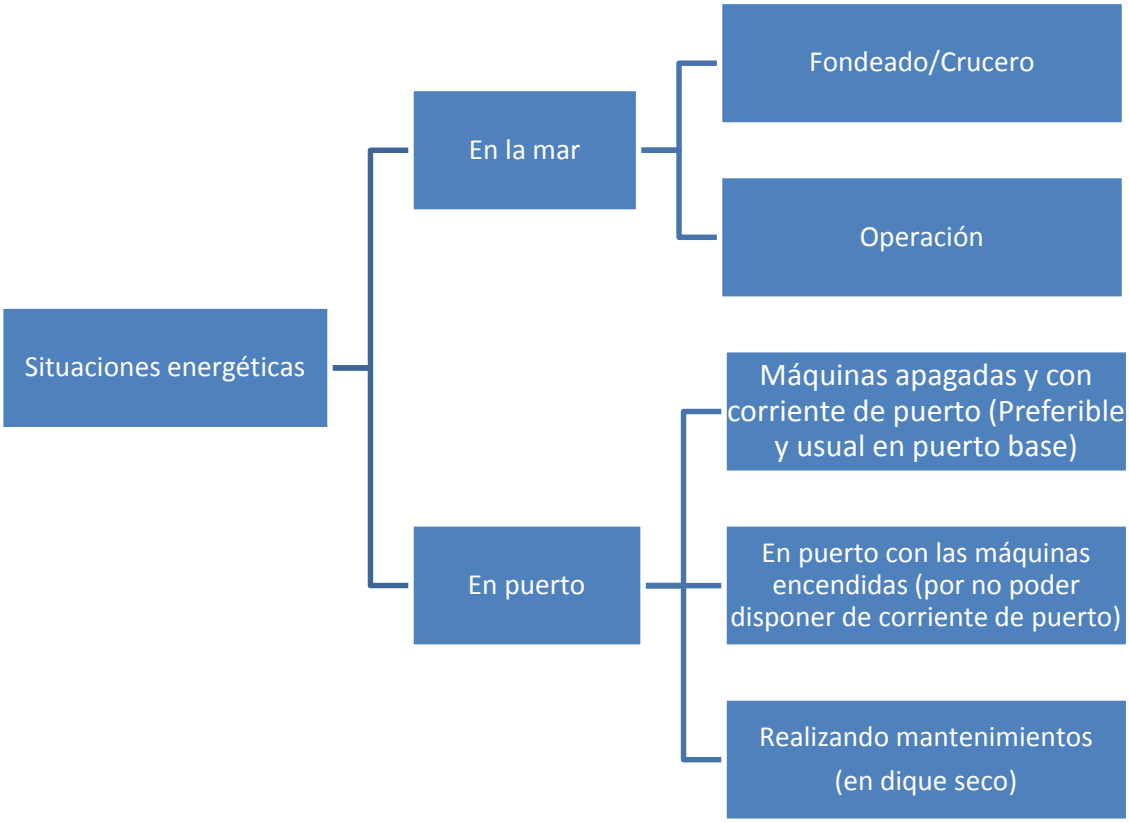

Figura 3-4 Situaciones energéticas de un buque en puerto. Fuente: Elaboración propia a partir de [76].

La distribución temporal de las distintas situaciones del buque es muy variada según el tipo de buque, la empresa a la que pertenece, su actividad o la situación económica. Así, un buque de pesca de bajura tendrá normalmente salidas a la mar de pocos días y estancias en puerto y mantenimientos cortas. Un buque de pesca de altura realizará navegaciones más largas durante las temporadas de pesca y estancias en puerto más largas durante las temporadas de pesca y estancias en puerto que pueden ser

duraderas. Por otro lado un buque portacontenedores navega el mayor tiempo posible para la mayor productividad de la empresa, pudiendo rotar las dotaciones en periodos de seis meses.

Es de destacar que los tiempos en la mar y puerto dependen de los factores nombrados anteriormente. Dependiendo principalmente del tipo de buque. A continuación (Tabla 3-4) se expone el ejemplo de la distribución del tiempo de cada una de las situaciones del buque en el ciclo de vida de un buque militar.

Periodo	Condición	% del tiempo del ciclo de vida
En la mar	Fondeado/crucero	27-30
	Operación	3-5
En puerto	Puerto apagado	45-50
	Puerto encendido	10-15
	Mantenimiento	10

Tabla 3-4 Distribución temporal de las distintas situaciones de un buque de guerra. Fuente: Elaboración propia a partir de [76].

3.1.1.2 Criterios a tener en cuenta en la aplicación de la normativa en una marina de guerra

Las normativas de eficiencia energética implementadas por la OMI y la UE suponen unas iniciativas a tener en cuenta para su aplicación en cualquier empresa del sector marítimo. Incluso aunque no se esté obligado a ello, como es el caso de los buques pertenecientes a un Estado, son medidas que ayudan a la mejora continua y al desarrollo tecnológico [2]. Siempre teniendo en mente que la mejora de la EE no es consumir menos a base de navegar eliminando o disminuyendo capacidades, sino obteniendo el mismo o mejor resultado previo a las tecnologías y medidas implementadas.

Por la situación especial de una marina de guerra, los buques de la Armada Española necesitan una disponibilidad y requerimientos mayores que los de un buque de transporte. Algunas actividades puede que precisen estas necesidades extra, como pueden ser el uso de todo el potencial de los motores en caso de emergencias o empleo de equipos eléctricos que precisen de un elevado suministro de energía eléctrica. Estos equipos son característicos y únicos de estos tipos de barcos, como por ejemplo el cañón, radares militares o equipos de guerra electrónica. Pero exceptuando estos momentos puntuales, los buques de guerra tienen los mismos empleos de la energía que los barcos mercantes.

La mejora de la EE pasiva, (aquella que no requiere de cambios en el control de la energía, por ejemplo luces led que consuman menos que incandescentes) está presente en todas las situaciones del buque independientemente de la operación llevada a cabo. Mientras tanto, la mejora de la EE operacional (aquella que requieren una acción, como por ejemplo apagar la iluminación automáticamente cuando no sea necesaria) puede ser realizada durante las navegaciones comunes que no exijan una necesidad especial de energía. Tales como los tránsitos realizados entre puertos, las patrullas de ayuda a la inspección pesquera o contra el tráfico ilegal de personas como es la "Operación Sophia".

Siguiendo el criterio de necesidades especiales en su diseño y de priorizar la operatividad frente a la eficiencia cuando la ocasión lo requiera, las mejoras en la EE pasiva y operativa son aplicables a los buques de la Armada Española.

En los siguientes apartados (3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5) se exponen los inconvenientes o modificaciones necesarias para adaptarlos a la Armada Española.

3.1.2 Implementación del Índice de Eficiencia Energética de Diseño en la Armada Española

El uso de este índice como se explica en el apartado 2.2.2, permite llevar a cabo un mejor análisis del consumo y emisiones de CO_2 del buque antes de su construcción, lo que conlleva la búsqueda de mejoras del diseño para reducir el uso de combustible. Permitiendo el establecimiento de requerimientos a cumplir por los astilleros, bien exigidos por las empresas navieras o bien por los diferentes gobiernos, que conseguirían la reducción de consumo de combustible de los buques que realicen mejoras de la EE.

La aplicación de este índice es totalmente viable en un buque militar. De forma que permitiría tener unas estimaciones del consumo del buque previas a su construcción y la mejora del diseño para conseguir la máxima eficiencia, el menor consumo y menores emisiones, cumpliendo los requerimientos de velocidad y navegabilidad de los futuros buques de la Armada.

El uso del EEDI en la construcción de los buques de la Armada en los astilleros de Navantia y compañías auxiliares externas, junto con la mejora del diseño de los buques para disminuir este ratio de emisiones de dióxido de carbono por trabajo realizado, podría conseguir un aumento de la autonomía de los buques, una reducción del consumo de combustible y por tanto una disminución del coste de las operaciones y los tránsitos realizados por la Armada.

La implementación del uso de este índice podría iniciarse en el proyecto de las F-110 y comenzar con el actual proyecto de los nuevos escoltas en fase de diseño de la Armada.

3.1.3 Implementación del Indicador Operacional de la Eficiencia Energética en la Armada

Este índice puede aplicarse como herramienta de apoyo al plan SEEMP, permitiendo el análisis de la eficiencia de los buques de la Armada y la mejora de ésta con las medidas adoptadas en cada buque.

La fórmula mediante la que se calcula el nivel de emisiones de CO_2 por el valor de trabajo realizado es la estudiada en el apartado 2.2.4:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{cargo} \times D}$$

Los elementos de la ecuación se emplearían de la misma forma, pero hace falta definir una nueva unidad para el m_{cargo}, debido a la naturaleza de la actividad realizada por un buque de guerra, cuya principal finalidad no es el transporte de mercancía entre puertos. Así quedaría un nuevo índice mejor definido para este tipo de buque especial. En este sentido la OMI da cierta libertad a la hora de elegir la forma de medir la unidad m_{cargo}, tal y como se indica en el apartado 2.2.4.

La elección de esta nueva cuantificación del trabajo realizado, sería distinta en los diferentes buques de la Armada según su función. Ya que por ejemplo, un buque de transporte, más similar al trabajo de un mercante podría cuantificarse según la cantidad de materiales transportada. Sin embargo un escolta no está destinado a transporte de tropas como su fin último, y por lo tanto no se le podría evaluar de la misma forma que a un buque de transporte. Para ello, se lleva a cabo en el presente apartado la subdivisión de los mismos aplicando un cuantificador distinto a cada tipo.

Esto nos permitirá el análisis de la eficiencia de cada buque independientemente del diferente parámetro que se use para medir la productividad que puedan tener según su misión. Esto puede llevar a un problema, la incapacidad de realizar comparaciones del índice entre buques de distinta clase.

Para dar solución a este problema, se propone el uso de dos índices a calcular, uno genérico para todos los buques militares y otro específico de la categoría del buque que ayude a concretar mejor en la carga de trabajo realizada por el buque.

La subdivisión en categorías de los buques de la Armada sobre la cual se realizará el estudio de aplicación del indicador de la eficiencia energética de operación es la expuesta en la Figura 3-5:

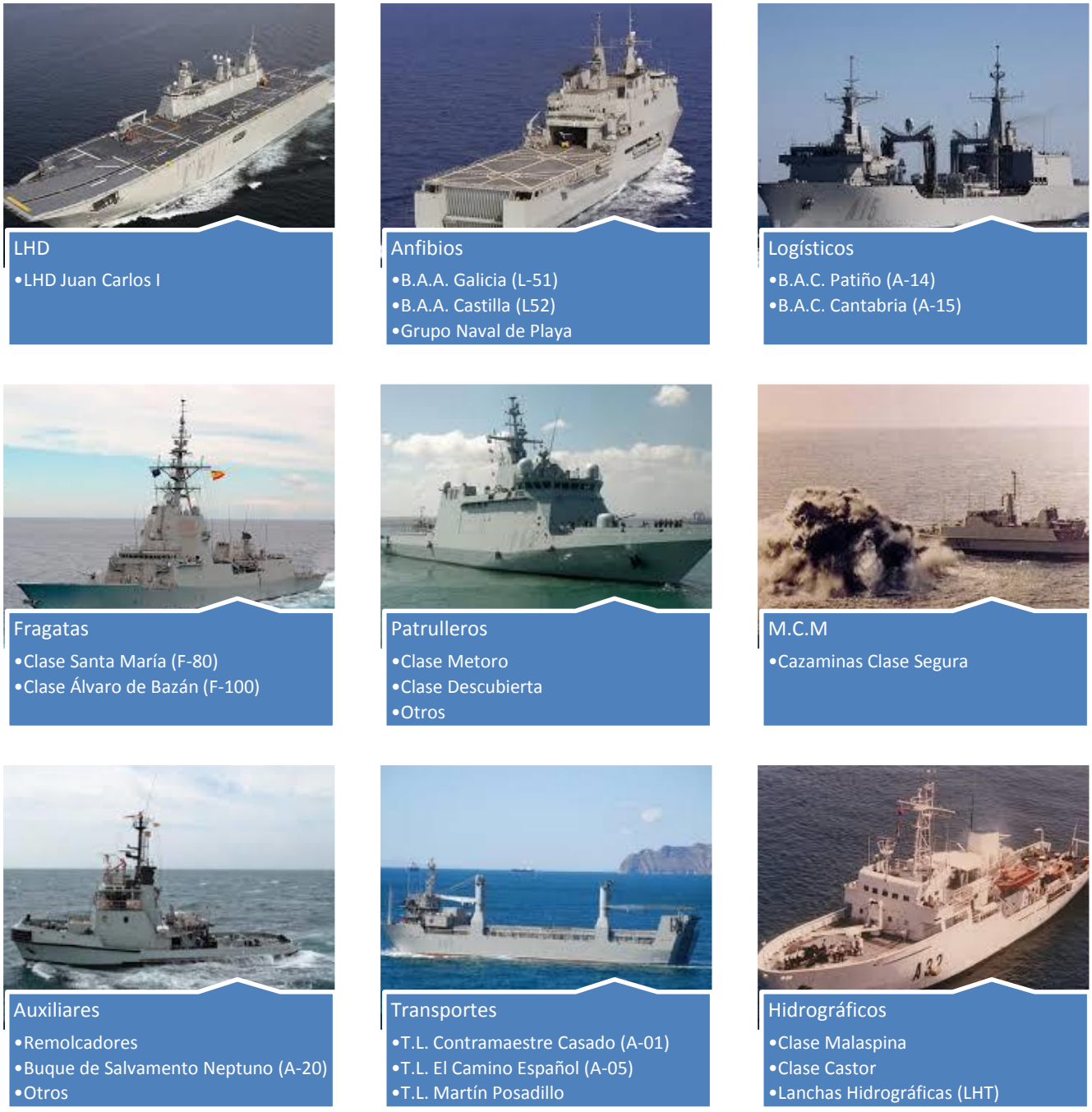

Figura 3-5 Clasificación de los buques de la Armada Española. Fuente: www.armada.mde.es. Elaboración propia

En el apartado "otros" dentro de patrulleros, se incluyen las clases Serviola, Anaga, Toralla, Chilreu, patrulleros de vigilancia costera y patrulleros de vigilancia interior. El apartado "otros" de los buques auxiliares, incluye los buques auxiliares Las Palmas (A-52), Mar Caribe (A-101) y Alerta (A-111), además de las distintas gabarras, pilotinas o petroleras usadas en los arsenales de la Armada. Además del buque de investigación oceanográfica Hespérides, que compone otra categoría especial.

Una vez clasificados, se procede con la elección del criterio a elegir. Para el cálculo de un EEOI genérico que sirva para todos los buques militares, se utilizarán dos variables. Esto se ha hecho en base al criterio de que todos los buques militares, independientemente de su función principal, realizan la labor de vigilancia y presencia naval.

La presencia naval, es una función pasiva de un buque militar que realiza siempre que está en navegación o fuera de puerto base. La presencia del buque, supone la vigilancia del tráfico marítimo en navegación y la acción diplomática y representativa cuando está en un puerto que no sea arsenal de la Armada, al representar a la nación y la institución.

Al ser ejercida por todos los buques militares por igual, la presencia naval, se cuantifica según el coste que supone los movimientos de los buques. Por un lado el desplazamiento del buque, que permite hacerse una idea del tamaño del buque y sus necesidades de propulsión. Por otra parte, se utilizará el número de personas que componen la dotación (Figura 3-6), ya que una de los factores clave a bordo de un buque de guerra es el personal que opera el buque y da servicio a las actividades generales y específicas del mismo.

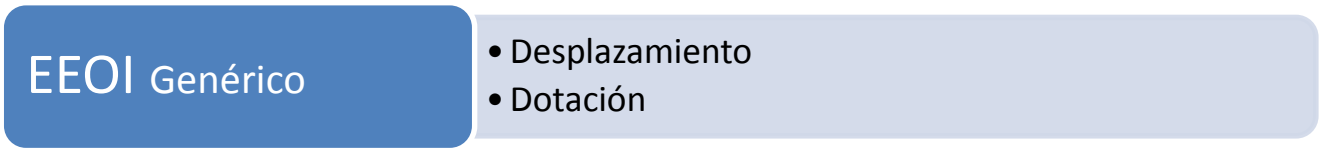

Figura 3-6 Factores de estudio para el EEOI genérico. Elaboración propia.

Así, el cálculo genérico del indicador de la eficiencia energética para cualquier buque militar sería el siguiente:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{(d \times D) + (p \times D)}$$

Siendo los nuevos elementos de la ecuación:

d (Toneladas) – Desplazamiento del buque.

p (Personal de la dotación) – Dotación del buque.

El cálculo del indicador operacional medio para un número de viaje (i) sigue la fórmula siguiente:

$$EEOI\ medio = \frac{\sum_i \sum_j FC_j \times C_{Fj}}{\sum_i \left((d_i \times D_i) + (p_i \times D_i)\right)}$$

Las variables utilizadas para el cálculo de un EEOI específico de cada tipo de buque son las correspondientes a la tabla siguiente (Tabla 3-5). Las categorías de buques no reflejadas en la tabla no tendrán un criterio específico y se usará únicamente el genérico de dotación y desplazamiento por ser el que mejor les caracteriza.

Categoría	Factor
Landing Helicopter Dock (LHD)	Número de vehículos y/o aeronaves
Anfibios	Número de tropas embarcadas
Transportes	Cargo transportado (toneladas)
Logísticos	Cargo transportado (toneladas)
Remolcadores	Tracción sobre bolardo máximo (toneladas)

Tabla 3-5 Factores para el cálculo del EEOI específico. Elaboración propia

Para el cálculo del EEOI específico, debido a la versatilidad de muchos de estos tipos de buques, se regirá por el factor más característico de la misión que estén llevando a cabo. Así, el trabajo del LHD, los transportes y los anfibios, podrán cuantificarse en función del número de vehículos y aeronaves que transporte, el número de tropas embarcadas (excluyendo la dotación) o el cargo en toneladas que transporte o en caso de considerarse necesario, una combinación de estos. En los buques logísticos se hará en función de las toneladas de cargo líquido y sólido que lleven a bordo y para los remolcadores en función de la tracción sobre bolardo máxima que disponga el buque.

Otro parámetro a considerar de posible aplicación en la fórmula para el cálculo del EEOI es un factor que considere el caso de que el buque se encuentre en una misión que por sus características requiera una mayor operatividad primando sobre la eficiencia energética. De forma que estando el buque en esta misión este factor compense el indicador operacional por las necesidades de una navegación con mayor consumo de combustible.

3.1.4 Plan de gestión de la eficiencia energética del buque

Para llevar a cabo una mejor vigilancia ambiental y ayudar en la mejora de la EE a bordo de los buques, la OMI implantó el plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP). Tal y como se explica en el apartado 2.2.3, la OMI realiza una guía y propone la ejecución de un ciclo de mejora (Figura 3-7), estando obligados los buques con arqueo bruto igual o superior a 400 toneladas, quedando exentos de realizarlo ciertos tipos de buques entre los cuales están los buques militares.

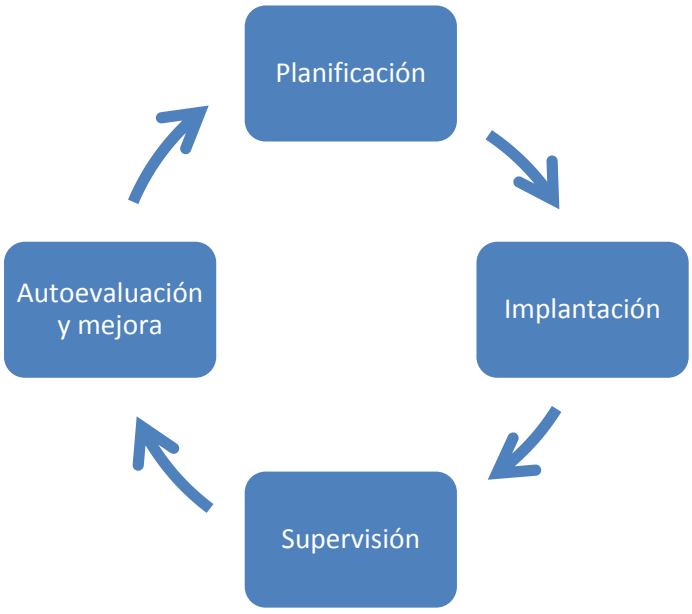

Figura 3-7 Ciclo de mejora del SEEMP. Elaboración propia.

Pese a estar exentos del cumplimiento de esta normativa, la realización de este plan de eficiencia en los buques de la Armada Española implicaría mejoras en el ámbito energético, económico y de proyección de la fuerza. Obteniendo para el mismo trabajo realizado por la flota de la Armada, una reducción de la energía consumida, lo que conlleva una menor necesidad de combustible, disminuyendo los costes del movimiento de los buques y proporcionando una mayor autonomía a los buques de la Armada Española.

Para hacerse una idea de la flota de la Armada, en la siguiente figura (Figura 3-8) se expone la relación del número de buques de la Armada con arqueo mayor o menor del límite establecido por la OMI de 400 toneladas.

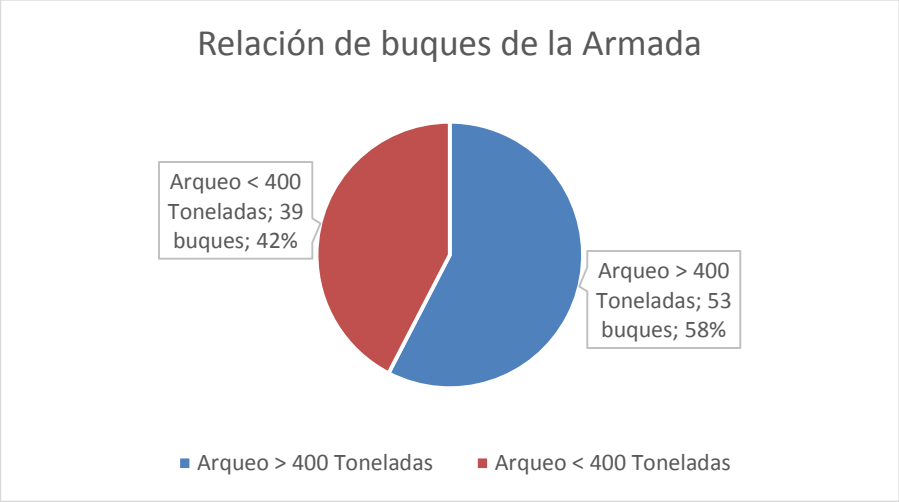

Figura 3-8 Relación de buques de la Armada según su arqueo bruto. Fuente: Lista Oficial de Buques de la Armada 2015. Elaboración propia.

Si bien implicaría una inversión económica y de labores de investigación, las mejoras podrían conseguir rentabilidad a largo plazo. Además, muchas de las mejoras de posible implantación no tendrían un coste económico y se pueden conseguir con el hábito de ahorro y mejor empleo de la energía en los buques por parte de las dotaciones y el seguimiento desde los arsenales.

Para una mejor gestión de las inversiones, la investigación de medidas a tomar para mejorar la eficiencia energética en los buques podría realizarse a un nivel más general. Siendo la Secretaría de Estado de Investigación Desarrollo e Innovación (I+D+I) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la que dirija las investigaciones y mejoras. Pudiendo así compartir gastos e implementar las mejoras no solo en los buques de la Armada, sino en todos los buques del Estado (Salvamento Marítimo, Guardia Civil o Aduanas).

Para la implantación del SEEMP, se seguiría el ciclo de mejora continua propuesto por la OMI (Figura 3-7). Así la realización en la Armada correspondería con los siguientes pasos:

1. Planificación: Estudio del consumo energético del buque a partir de datos de navegaciones del último año. Propuesta de las medidas a tomar en el buque y la mejora prevista de los consumos.
2. Implantación: Adoptar las medidas a seguir en el buque, el personal responsable de las mismas podría ser el jefe de máquinas del buque, delegando en los oficiales/suboficiales de la guardia de máquinas en puerto y en la mar.
3. Supervisión: Uso del EEOI con ayuda de una calculadora (apartado 3.2) y el seguimiento de los consumos. Permitiendo así una vigilancia cuantitativa de la eficiencia energética.
4. Autoevaluación y mejora: Correspondiendo al arsenal donde tenga base el buque, la evaluación de la eficacia de las medidas tomadas, cumplimiento de los objetivos y propuesta de mejora de las medidas, optimizando así el ciclo de mejora. La autoevaluación se podría

realizar coincidiendo con los periodos de Periodo de Inmovilización Programada (PIP). Realizándose antes de estos periodos la autoevaluación y durante el PIP la implementación de las medidas necesarias en caso de que requieran la instalación de algún sistema nuevo que mejore la EE a bordo o cambio de los existentes.

La realización de este ciclo de mejora de la EE podría llevarse a cabo por personal del cuerpo de Ingenieros de la Armada y del Cuerpo General destinados en los arsenales de la Armada. Llevando la labor de los estudios de consumos, propuesta de mejoras, supervisión y autoevaluación de las medidas adoptadas. Permitiendo la reducción de carga de trabajo en esta materia al personal de máquinas embarcado, siendo sus cometidos la correcta ejecución de las medidas implementadas en el buque, el seguimiento de los consumos de combustible y el envío de dichos datos al ramo correspondiente del arsenal.

Entre las medidas para mejorar la EE, se encuentran las explicadas en el apartado 2.1.4 (Eficiencia energética en el transporte marítimo) y 2.3 (Estado actual de la aplicación de las mejoras de eficiencia energética en buques).

Para un mejor seguimiento cuantitativo de los consumos y de la mejora de la EE, se propone en el presente trabajo el uso de una calculadora del Indicador Operacional de la Eficiencia Energética con los criterios de valor de trabajo realizado propuestos en el apartado 3.1.3 y explicado el uso de la misma en el apartado 3.2.

3.1.5 Plan de Seguimiento, Notificación y Verificación para la Armada Española

La nueva normativa propuesta por la UE expuesta en el apartado 2.2.5, es obligatoria para los buques de un arqueo bruto mayor de 5.000 toneladas y excluye a diferentes tipos de barcos entre ellos los buques militares. Sin embargo, sí que anima al cumplimiento de la normativa de forma voluntaria por parte de los propietarios que deseen aplicar estas medidas en sus buques para mejorar la eficiencia energética [2].

La implementación de esta normativa en la Armada Española supone una mejora sobre el plan de gestión de los consumos a bordo de los buques. Una propuesta a tomar para llevar un control riguroso y análisis posterior para la ayuda a la elección de qué medidas seguir para mejorar la EE en los buques. Así mismo, el análisis permite el conocimiento de los buques con mejores indicadores de la EE en la Armada y cuáles requerirían mejoras, así como la posibilidad de fijar objetivos de eficiencia a alcanzar.

La forma óptima de aplicar este plan a la Armada Española, es la realización combinada con el plan de gestión de la eficiencia energética del buque. Siguiendo una misma estructura de suministro de datos para su estudio. Con el uso de la calculadora del EEOI, se puede llevar a cabo el seguimiento de los consumos y de las emisiones de CO_2 del buque. El seguimiento se realizaría mediante una de las formas propuestas por la OMI, el control a bordo de los depósitos de combustible, en el que la guardia de máquinas llevaría a cabo el registro del consumo de combustible.

Para un mejor seguimiento, se propone la inclusión de un sistema de caudalímetros en los motores principales y auxiliares del buque. Consiguiendo un mejor registro de los consumos de combustible, más preciso, más cómodo y permitiendo el conocimiento real del consumo instantáneo y el realizado durante las últimas horas o singladuras. Una implantación que cada vez está siendo más usual entre los buques de nueva construcción y también entre los ya existentes.

El proceso de toma de datos y registro de los mismos sería el siguiente (Figura 3-9), de esta forma, la toma de datos se realizaría de forma automática por el caudalímetro y la medición de los tanques de combustible una vez al día. El registro sería realizado por el personal de la guardia de máquinas y supervisado por el oficial de máquinas del buque, responsable del envío al arsenal de los datos de los consumos realizados por el buque una vez al año.

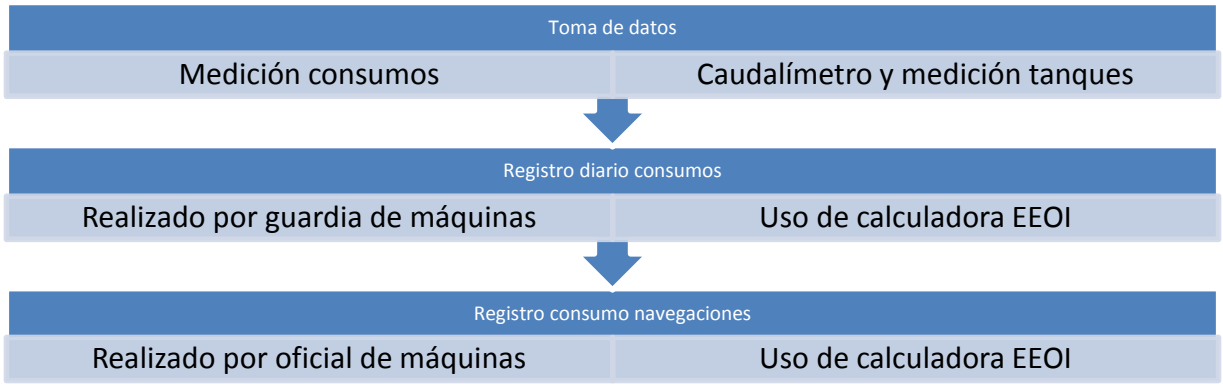

Figura 3-9 Proceso de toma de datos y registro del consumo de combustible. Elaboración propia.

El envío de datos por parte de los buques a las secciones de eficiencia energética de su arsenal, se realizaría al acabar las navegaciones y atracar en puerto base. En estos departamentos se realizaría el estudio de los datos, exposición de conclusiones y propuesta de mejoras y se enviarían a un departamento centralizado en Madrid que recoja los datos de todas los arsenales y en función de las mejoras propuestas, el presupuesto disponible y las prioridades, decidiría las medidas a implementar, bien en el momento si se pudiera o en el próximo PIP del buque.

El proceso de notificación se realizaría como sigue en la Figura 3-10:

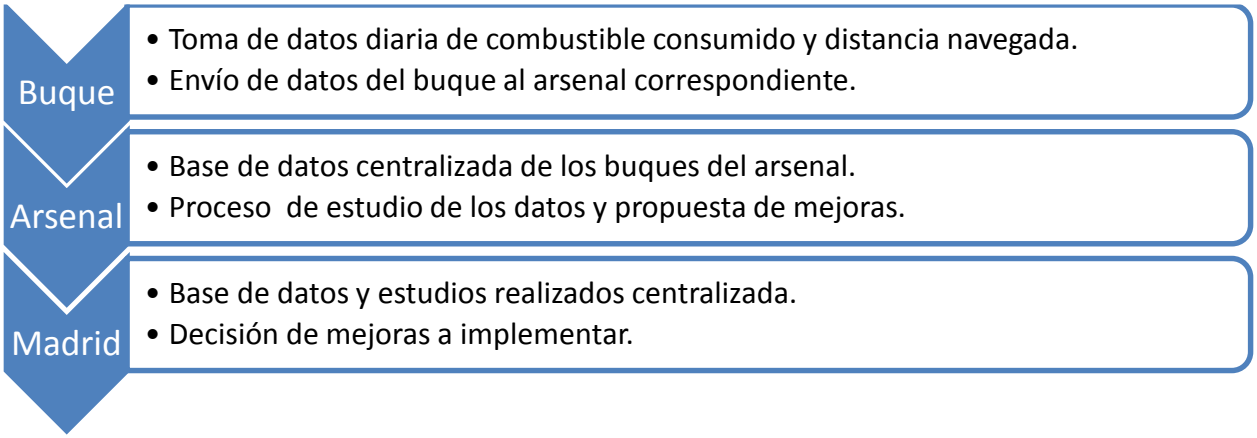

Figura 3-10 Estructura del sistema de notificación de consumos de combustible propuesta para la Armada Española. Elaboración propia.

Un estudio de los datos de los buques del arsenal por un departamento destinado a ello disminuiría la carga de trabajo del buque, mejoraría la propuesta de mejoras a adoptar y gracias a la cercanía de realizar el estudio en la misma base, permitiría la realización de pruebas periódicas para comprobar el funcionamiento de los motores en caso de una variación importante en sus consumos.

La verificación de los datos no requeriría de una agencia verificadora externa, pero sí que se podría llevar un control de las tomas de datos y los consumos en los periodos previos al PIP, siendo una más de las optimizaciones para la realización satisfactoria de las reparaciones y mejoras en el buque.

3.1.5.1 Estudio de los costes de instalación de caudalímetros en los buques de la Armada Española

La instalación de un sistema de medida del combustible consumido mediante el uso de caudalímetros que transmitan datos al Sistema Integrado del Control de la Plataforma (SICP) es una medida de bajo coste que permite un seguimiento más preciso y eficaz del consumo de combustible a bordo. Su instalación permite llevar el registro de forma autónoma y con la posibilidad de mostrarse en pantalla del puente y la cámara de máquinas, permitiendo el conocimiento del consumo instantáneo y medio del buque. El seguimiento preciso de los consumos permite así estudiar las medidas implementadas en el buque de una forma más eficaz con objeto de la mejora de la EE.

La normativa de la Unión Europea establece los siguientes métodos de seguimiento del CO_2 emitido por los buques:

- Nota de entrega de combustible y comprobaciones periódicas de los tanques de combustible.
- Seguimiento del tanque de combustible líquido a bordo.
- Indicadores de caudal para los procesos de combustión aplicables.
- mediciones directas de las emisiones de CO_2.

Para la mejor comprensión del coste que supone esta medida, se lleva a cabo una comparativa entre el coste necesario de implantación de la medida frente al coste del combustible necesario para realizar una navegación entre Ferrol y Rota de un buque tipo escolta.

Se realiza este ejemplo de aplicación de la medida a los buques de Acción Naval por ser los de mayor desplazamiento, consumo y son los de mayor representación de la Armada a nivel internacional. En los buques se pueden distinguir motores principales, que suministran energía motriz al eje para la propulsión del buque y auxiliares o generadores, los encargados de suministrar energía eléctrica al buque. En la figura siguiente (Figura 3-11) se enumera la cantidad de motores y turbinas en los que haría falta la instalación de un caudálimetro.

LHD Juan Carlos I	•Turbina de gas. •2 Diésel generadores.
Fragatas Clase "Santa María"	•2 Turbinas de gas. •4 Diésel generadores.
Fragatas Clase "Álvaro de Bazán"	•2 Turbinas de gas + 2 motores diésel •4 Diésel generadores
Buques de Asalto Anfibio Clase "Galicia"	•4 Motores diésel (propulsión) + 1 motor eléctrico. •4 Diésel generadores.
Buques de Aprovisionamiento para el Combate Patiño	•2 Motores diésel (propulsión) •4 Diésel generadores
Buques de Aprovisionamiento para el Combate Cantabria	•2 Motores diésel (propulsión) •4 Diésel generadores

Figura 3-11 Equipos a monitorizar por caudalímetro. Fuente: www.armada.mde.es Elaboración propia.

Para el coste de instalación del sistema de caudalímetros se tomará como referencia el indicado en el Proyecto ESB Cataluña, de mejora de la flota pesquera de Cataluña que entre otras mejoras realiza la instalación de un caudalímetro en un motor de sus buques [78]. En la siguiente tabla (Tabla 3-6) se muestra una simulación del posible coste de instalación del sistema de caudalímetros en los buques designados anteriormente.

Total caudalímetros	Coste unitario	Coste instalación caudalímetros
35	4.300 €	150.500 €

Tabla 3-6 Análisis del coste de instalación de caudalímetros en buques designados de la Armada Española. Elaboración propia.

A continuación se calcula el coste del combustible consumido para la navegación. Los datos del combustible consumido han sido tomados de la misma navegación utilizada para el ejemplo de uso de la calculadora EEOI (apartado 4.1). El precio del litro de F-76 es el proporcionado por personal de la Armada, para la equivalencia dólar-euro de 22 de Febrero de 2017 de 0,948 euros el dólar [79], y relación galón estadounidense a litros de 3,78541 litros el galón [80]. El cálculo del coste del combustible necesario para realizar una navegación Ferrol-Rota por un buque tipo escolta queda como sigue (Figura 3-12):

Figura 3-12 Coste combustible navegación Ferrol-Rota por buque escolta. Fuente: Servicio de Combustibles del Arsenal Militar de Ferrol. Ratios de 2016. Elaboración propia.

La comparación del coste de la medida de instalar el sistema de caudalímetros en los buques designados (Figura 3-11) queda comparada con el coste de una navegación Ferrol-Rota (Figura 3-12) en la siguiente figura (Figura 3-13). Siendo la cantidad necesaria a invertir menor que el coste del combustible necesario para una navegación de cinco días.

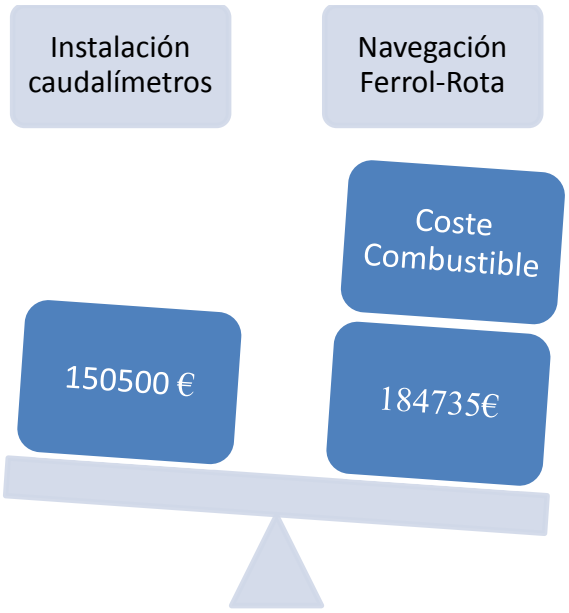

Figura 3-13 Comparativa de coste navegación frente a coste de instalación de caudalímetros. Elaboración propia.

3.2 Propuesta de aplicación práctica de la normativa. Calculadora del EEOI

Para llevar a cabo un plan de mejora de la eficiencia energética en los buques de la Armada es necesario un método que nos permita calcular el índice de eficiencia del buque, y para ello la herramienta propuesta por la OMI es el indicador operacional de la eficiencia energética, aunque, si bien indica que se puede utilizar otras alternativas, la alternativa óptima es el EEOI, ya que con los datos de consumos de combustible, tipo de combustible utilizado, distancia navegada, y carga transportada, calcula una relación de cantidad de CO_2 emitido por unidad de trabajo realizada. Siendo unos datos objetivos a la hora de analizar el consumo de un buque y permite relacionar las diferencias en el índice entre las distintas navegaciones.

La calculadora del EEOI propuesta permite el cálculo del índice de una forma sencilla, su mayor ventaja es que el usuario solo necesitará un programa tipo hoja de cálculo, con lo que se evita la necesidad de instalación de un programa nuevo en los ordenadores de a bordo. Además al trabajar en una hoja de cálculo resulta sencilla al ser una herramienta básica muy utilizada por el personal.

La calculadora está dividida en varias hojas de cálculo en las que se distinguen los siguientes apartados:

1. Instrucciones.
2. Datos del buque.
3. Navegación en curso.
4. Eficiencia navegación.
5. Resumen navegaciones.
6. Consumos en puerto.
7. Informe EEOI
8. Informe total consumido.
9. Informe consumido propulsión.

A continuación se detallan las distintas hojas de cálculo:

1. Instrucciones.

Una hoja que incluye las instrucciones a seguir para facilitar al usuario el correcto uso de la calculadora, indicando los campos a rellenar y el modo de uso de la calculadora.

Código de colores en las casillas:

- Color azul: Casillas a rellenar por el usuario.

- Color verde: Casillas resultado de índices de eficiencia calculadas de forma automática.

- Color blanco: Casillas calculadas de forma automática, sumas, promedios.

- Color blanco, letra negrita: Títulos y apartados de las tablas.

Relleno y borrado de datos:

- La calculadora se rellenará con datos diarios de los consumos del buque, una vez al finalizar cada singladura, reflejando en la hoja "Navegación en curso" los datos requeridos.

- Durante estancias en puerto se rellenará la hoja registro "Consumos en puerto".

- La forma de incluir un nuevo día en la tabla será clicando sobre la fila "Total", insertar, desplazar filas hacia abajo. Las casillas que lo requieren tienen comentarios de ayuda, con indicaciones como la unidad utilizada.

- Una vez finalizada la navegación se volcarán los datos de la hoja "Navegación en curso" en las hojas "Resumen navegaciones", "Consumos navegaciones" e "informes EEOI", siguiendo el esquema de uso siguiente (Figura 3-14).

Figura 3-14 Procedimiento relleno de datos. Elaboración propia.

Importación e impresión de los datos:

- Se rendirá un informe semestral al departamento del arsenal encargado de la recopilación de los datos de consumos. En el que se adjuntará el archivo Excel y una copia a PDF de las distintas hojas de la calculadora.

- Se incluirá en el informe el registro de las condiciones meteorológicas de las navegaciones realizadas en el semestre.

- En caso de necesidad o a petición del propio buque por encontrar anomalías en el consumo de los motores, el departamento de eficiencia energética podrá solicitar el informe cuando se requiera.

- Se recomienda la impresión de los datos en formato de hoja horizontal, ajustando la hoja en una página.

2. Datos generales del buque.

En este apartado, se muestran datos del buque necesarios para el cálculo del índice. Se deberá rellanar las casillas siguientes:

- Tipo de buque. Ejemplo: Escolta
- Clase. Ejemplo: Santa María
- Serie. Ejemplo: 1ªSerie
- Unidad: Ejemplo: F-82 Victoria
- Desplazamiento, en toneladas.
- Dotación, en número de personas embarcadas, pertenecientes a la dotación del buque, no el de unidades embarcadas (equipos operativos de infantería de marina o dotaciones de aeronaves).
- Combustible de uso, queda preestablecido el utilizado por los buques OTAN, siendo el diésel F-76 y el JP-5.

El cálculo del factor de conversión de combustible a CO_2 emitido por los combustibles OTAN, se realiza en base a los requerimientos de cantidad de carbono en los combustibles F-76 y JP-5 y la normativa de la OMI sobre el cálculo del EEOI, en la que explica el factor de CO_2 de los combustibles. El factor a usar es de 3,21 g de CO_2 generados por cada mililitro de combustible quemado, tanto para F-76 como para JP-5 [38].

3. Navegación en curso

Este apartado será el actualizado al finalizar cada singladura (jornada en la mar que comienza a las 0000 horas y finaliza a las 2359 del mismo día) o en el último día de navegación al finalizar la misma quedando el buque atracado y funcionando con corriente de puerto. Una navegación comprenderá desde la salida de puerto hasta el atraque en otro. Se deberán rellenar las siguientes casillas:

- Nombre de la navegación, con puerto de salida-puerto de llegada.
- Puerto de salida.
- Puerto de llegada.
- Fecha y hora de salida.
- Fecha y hora de llegada.
- Consumo de combustible, en correspondiente a cada singladura y debida a motores principales y auxiliares en navegación y el usado por las aeronaves.
- Distancia navegada, en millas en cada singladura.

4. Eficiencia navegación

En el presente apartado se realizan los cálculos de los índices necesarios para cuantificar la eficiencia energética del buque. A partir de los datos de la hoja Navegación en curso se obtiene el Indicador Operacional de la Eficiencia Energética. Es de destacar, que frente a los que propone la OMI, que usa para el cálculo de este índice toneladas de CO_2 emitido, en la calculadora propuesta se ha realizado en base a gramos de CO_2 emitido. De esta manera se pueden manejar indicadores con números de mejor comprensión para el ser humano.

Además del cálculo del EEOI, se proponen dos nuevos índices: La cantidad de combustible consumido total por el buque por milla navegada y la cantidad de combustible consumido para la generación de energía para propulsión por milla navegada.

Estos dos nuevos índices suponen una forma sencilla de cuantificar el consumo medio de cada singladura y de la navegación. De una forma similar al EEOI, conseguimos un índice que cuantifica el combustible consumido, ya sea por propulsión y generación eléctrica o sólo para propulsión, en la que el valor del trabajo realizado, es únicamente la distancia navegada, sin tener en cuenta el desplazamiento y dotación del buque o la carga transportada como propone la OMI. Este índice no permite cuantificar el consumo usado para un trabajo determinado de transporte de carga que puede ser variable, pero para los criterios usados para buques militares, el EEOI general, que depende de la dotación y desplazamiento del buque, que se considerará fijo, no nos son de utilidad si no es para comparar con otros buques, así en función únicamente de la distancia se tiene un índice más similar al que utiliza cualquier conductor en su coche como es el litros consumidos por cada cien kilómetros.

5. Resumen navegaciones

En este apartado se presenta la relación de información detallada sobre las navegaciones ya realizadas, incluyendo puertos de salida y llegada de las navegaciones, fechas, distancias navegadas, combustible consumido, dióxido de carbono emitido por navegación e índices de EE de cada navegación.

6. Consumos en puerto

En esta hoja de la calculadora se recogerán los datos de los consumos de combustible en puerto, ya que los datos recogidos en las otras hojas son únicamente del periodo de navegación. De esta forma se podrá tener en el mismo documento el registro del uso de combustible en puerto.

7. Informe EEOI

Esta hoja resume los indicadores operacionales de la eficiencia energética de todas las navegaciones, la media de los mismos y una gráfica que representa los indicadores de cada navegación. Siendo de ayuda para el estudio y comparación del indicador entre las distintas navegaciones. El EEOI, será mejor cuanto más bajo sea su número, es decir, menores emisiones de dióxido de carbono por valor del trabajo realizado o a iguales emisiones con mayor valor del trabajo realizado.

8. Informe total consumido

Esta hoja presenta los valores medios de los consumos totales de combustible por milla navegada de cada navegación, incluyendo una gráfica para su mejor estudio y posterior análisis.

9. Informe consumido propulsión

La última hoja de la calculadora es similar a la anterior, incluyendo los datos de combustible consumido por los motores principales para proporcionar energía a las hélices por cada milla navegada.

La siguiente tabla (Tabla 3-7) expone un glosario de unidades de uso en la calculadora:

Parámetro	**Unidad**
Desplazamiento	$Toneladas$
Dotación	$Nº\ de\ personas$
Factor Combustible	$Gramos\ de\ CO_2/mililitro\ de\ combustible$
Combustible	$Litros$
Distancia navegada	$Millas\ náuticas$
Emisiones de CO_2	$Gramos\ de\ CO_2$
Valor del trabajo realizado	$Millas \times Nºpersonas + Millas \times Toneladas$ (EEOI general)
EEOI	$Toneladas\ de\ CO_2/Millas \times Nºpersonas + Millas \times Toneladas$ (EEOI general)
Combustible total consumido por milla navegada	$Litros/Milla$
Combustible consumido para propulsión por milla navegada	$Litros/Milla$

Tabla 3-7 Glosario de unidades de uso en la calculadora. Elaboración propia.

4 RESULTADOS

4.1 Ejercicio práctico del uso de la calculadora del EEOI

En el presente apartado se expone el uso práctico de la calculadora del EEOI propuesta para la implementación del sistema SNV y el plan SEEMP. Para ello se utilizan los datos de consumos de 11 días de navegación y puerto de un buque tipo escolta. Por motivos de confidencialidad no se hace referencia al nombre ni clase del buque y las fechas y horas de la ejecución de las navegaciones no son las reales. De esta forma este apartado sirve como ejemplo de uso y análisis de los resultados obtenidos con los datos suministrados.

- Hoja "Datos del Buque" (Figura 4-1).
- Hoja "Navegación en curso" (Figura 4-2). En un uso normal, se mostrarían sólo los datos de la navegación no finalizada, aquí como muestra se presentan todas las navegaciones comprendidas en los 11 días de los datos.
- Hoja "Eficiencia navegación" (Figura 4-3) , en la que se muestran los cálculos realizados por la calculadora, obteniendo los resultados de Emisiones de CO_2, Valor del trabajo realizado, EEOI, combustible total consumido por milla navegada y combustible consumido para propulsión por milla navegada.
- Hoja "Resumen navegaciones" (Figura 4-4), muestra el resumen de las navegaciones en la que el usuario ha de volcar los datos de los cálculos realizados para cada navegación.
- Hoja "Consumos navegaciones" (Figura 4-5), empleada para llevar el registro detallado de los consumos durante las navegaciones.
- Hoja "Consumos en puerto" (Figura 4-6), empleada para llevar el registro detallado de los consumos durante las estancias en puerto.
- Hoja "Informe EEOI" (Figura 4-7), con los EEOI medios de las navegaciones.
- Hoja "Informe Total Consumido" (Figura 4-8), el informe de combustible total consumido por cada milla navegada en las distintas navegaciones.
- Hoja "Informe Consumido Propulsión" (Figura 4-9), el informe del combustible consumido en propulsión por cada milla navegada en las navegaciones.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Datos del buque**

Tipo de buque	Escolta	**Factor F76**	**Factor JP5**
Clase	Clase	3,21	3,21
Serie	Serie		
Unidad	Fragata		
Desplazamiento	5800		
Dotación	202		
Combustibles de uso	F76-JP5		

Figura 4-1 Calculadora EEOI, hoja "Datos del buque". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Navegación en curso**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Ferrol-Ferrol 1 de Agosto	Ferrol	Ferrol	01/08/2016	9:00	01/08/2016	13:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
01/08/2016	5500	1400	6900	0	42	6900
Total	**5500**	**1400**	**6900**	**0**	**42**	**6900**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Ferrol-Rota 4 Agosto	Ferrol	Rota	04/08/2016	00:00	11/08/2016	15:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
04/08/2016	19400	7500	26900	0	154	26900
05/08/2016	40400	7900	48300	0	343	48300
06/08/2016	87400	7200	94600	0	412	94600
07/08/2016	43000	7200	50200	0	334	50200
08/08/2016	23500	4800	28300	0	138	28300
Total	**213700**	**34600**	**248300**	**0**	**1381**	**248300**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Rota-Rota 9 Agosto	Rota	Rota	09/08/2016	9:00	09/08/2016	19:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
09/08/2016	6200	3300	9500	0	73	9500
Total	**6200**	**3300**	**9500**	**0**	**73**	**9500**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Rota-Rota 10 Agosto	Rota	Rota	10/08/2016	7:00	10/08/2016	22:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
10/08/2016	16000	4600	20600	0	99	20600
Total	**16000**	**4600**	**20600**	**0**	**99**	**20600**

Figura 4-2 Calculadora EEOI, hoja "Navegación en curso". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Eficiencia Navegación**

Ferrol-Ferrol 1 Agosto

Día	Emisiones de CO2	Valor del trabajo realizado	EEOI	Total consumido/Distancia navegada	Consumido propulsión/Distancia navegada
01/08/2016	22149000	252084	87,9	164,3	131,0
Total	**22149000**	**252084**	**87,9**	**164,3**	**131,0**

Ferrol-Rota 4 Agosto

Día	Emisiones de CO2	Valor del trabajo realizado	EEOI	Total consumido/Distancia navegada	Consumido propulsión/Distancia navegada
04/08/2016	86349000	924308	93,4	174,7	126,0
05/08/2016	155043000	2058686	75,3	140,8	117,8
06/08/2016	303666000	2472824	122,8	229,6	212,1
07/08/2016	161142000	2004668	80,4	150,3	128,7
08/08/2016	90843000	828276	109,7	205,1	170,3
Total	**797043000**	**8288762**	**96,2**	**180,1**	**151,0**

Rota-Rota 9 Agosto

Día	Emisiones de CO2	Valor del trabajo realizado	EEOI	Total consumido/Distancia navegada	Consumido propulsión/Distancia navegada
09/08/2016	30495000	438146	69,6	130,1	84,9
Total	**30495000**	**438146**	**69,6**	**130,1**	**84,9**

Rota-Rota 10 Agosto

Día	Emisiones de CO2	Valor del trabajo realizado	EEOI	Total consumido/Distancia navegada	Consumido propulsión/Distancia navegada
10/08/2016	66126000	594198	111,3	208,1	161,6
Total	**66126000**	**594198**	**111,3**	**208,1**	**161,6**

Figura 4-3 Calculadora EEOI, hoja "Eficiencia navegación". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Resumen Navegaciones**

Navegación	Distancia navegada	Combustible consumido total	Emisiones de CO2	EEOI	Total consumido/Distancia navegada	Consumido propulsión/Distancia navegada
Ferrol-Ferrol 1 Agosto	42	6900	22149000	87,9	164,3	131,0
Ferrol-Rota 4 Agosto	1381	248300	797043000	96,2	180,1	151,0
Rota-Rota 9 Agosto	73	9500	30495000	69,6	130,1	84,9
Rota-Rota 10 Agosto	99	20600	66126000	111,3	208,1	161,6
Total/media	**1595**	**285300**	**915813000**	**95,7**	**170,6**	**132,1**

Figura 4-4 Calculadora EEOI, hoja "Resumen Navegaciones". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Consumos navegaciones**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Ferrol-Ferrol 1 de Agosto	Ferrol	Ferrol	01/08/2016	9:00	01/08/2016	13:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
01/08/2016	5500	1400	6900	0	42	6900
Total	**5500**	**1400**	**6900**	**0**	**42**	**6900**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Ferrol-Rota 4 Agosto	Ferrol	Rota	04/08/2016	00:00	11/08/2016	15:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
04/08/2016	19400	7500	26900	0	154	26900
05/08/2016	40400	7900	48300	0	343	48300
06/08/2016	87400	7200	94600	0	412	94600
07/08/2016	43000	7200	50200	0	334	50200
08/08/2016	23500	4800	28300	0	138	28300
Total	**213700**	**34600**	**248300**	**0**	**1381**	**248300**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Rota-Rota 9 Agosto	Rota	Rota	09/08/2016	9:00	09/08/2016	19:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
09/08/2016	6200	3300	9500	0	73	9500
Total	**6200**	**3300**	**9500**	**0**	**73**	**9500**

Nombre de la navegación	Puerto de salida	Puerto de llegada	Fecha de salida	Hora de salida	Fecha de llegada	Hora de llegada
Rota-Rota 10 Agosto	Rota	Rota	10/08/2016	7:00	10/08/2016	22:00
Día	**F-76 Motor Principal**	**F-76 Motores Auxiliares**	**F-76 Total**	**JP5**	**Distancia navegada**	**Consumo total de combustible**
10/08/2016	16000	4600	20600	0	99	20600
Total	**16000**	**4600**	**20600**	**0**	**99**	**20600**

Figura 4-5 Calculadora EEOI, hoja "Consumos navegaciones". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Consumos en puerto**

	Consumo de combustible F-76	
Día	**Auxiliares**	**Principales**
01/08/2016		
02/08/2016		
03/08/2016	500	
04/08/2016		
05/08/2016		
06/08/2016		
07/08/2016		
08/08/2016	1700	
09/08/2016	1500	
10/08/2016	200	
11/08/2016	2000	
Total	**5900**	**0**

Figura 4-6 Calculadora EEOI, hoja "Consumos en puerto". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Informe EEOI**

Navegaciones	EEOI
Ferrol-Ferrol 1 Agosto	87,9
Ferrol-Rota 4 Agosto	96,2
Rota-Rota 9 Agosto	69,6
Rota-Rota 10 Agosto	111,3
EEOI medio	**95,7**

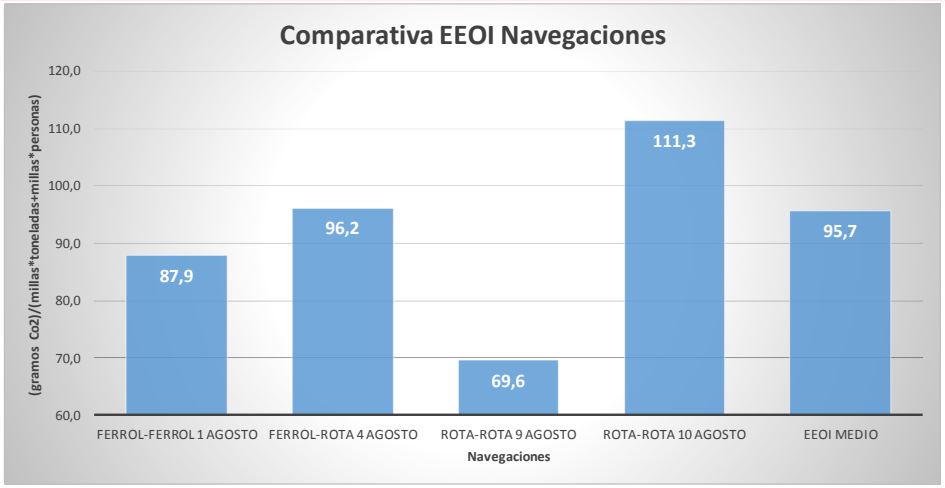

Figura 4-7 Calculadora EEOI, hoja "Informe EEOI". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Informe Total consumido/Distancia navegada**

Navegaciones	Total consumido/Distancia navegada
Ferrol-Ferrol 1 Agosto	164,3
Ferrol-Rota 4 Agosto	180,1
Rota-Rota 9 Agosto	130,1
Rota-Rota 10 Agosto	208,1
Media	**170,6**

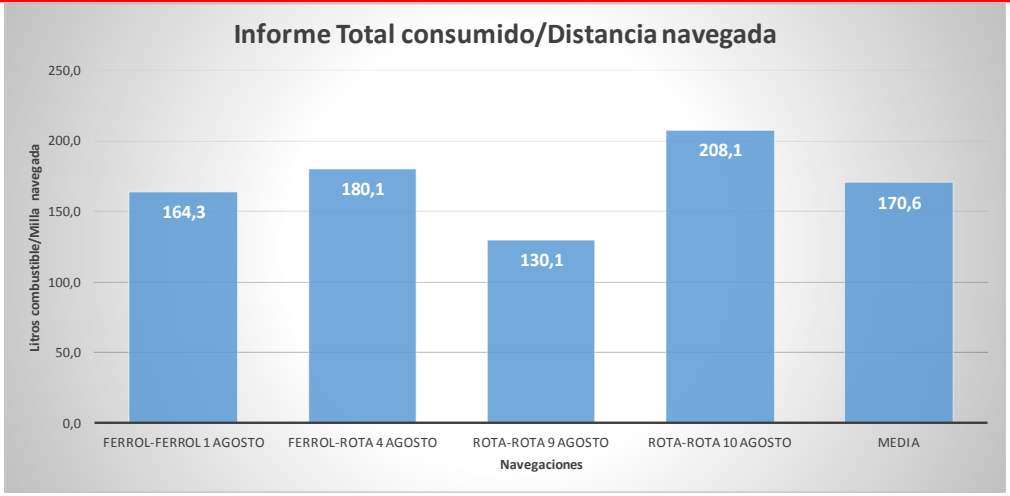

Figura 4-8 Calculadora EEOI, hoja "Informe Total consumido/Distancia navegada". Elaboración propia.

Calculadora EEOI - Indicador Operacional de la Eficiencia Energética **Informe Consumido propulsión/Distancia navegada**

Navegaciones	Consumido propulsión/Distancia navegada
Ferrol-Ferrol 1 Agosto	131,0
Ferrol-Rota 4 Agosto	151,0
Rota-Rota 9 Agosto	84,9
Rota-Rota 10 Agosto	161,6
Media	**132,1**

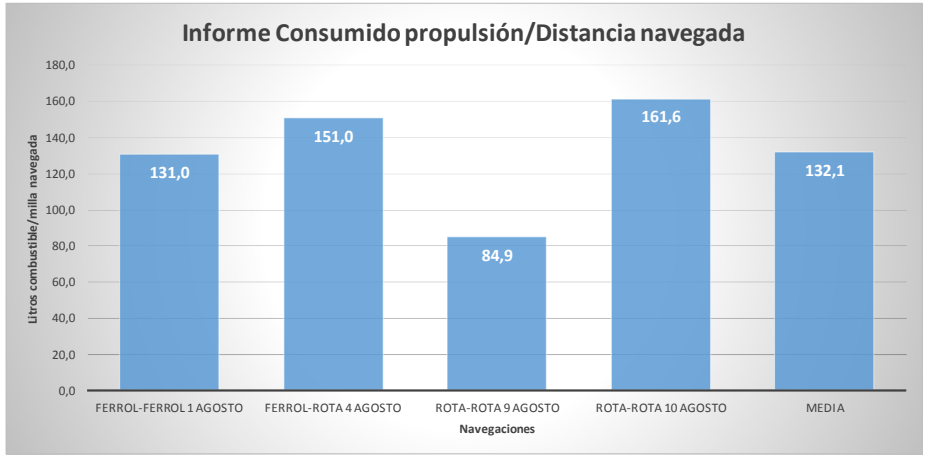

Figura 4-9 Calculadora EEOI, hoja "Informe Consumido propulsión/Distancia navegada". Elaboración propia.

4.2 Análisis de sensibilidad de los parámetros de estudio en la calculadora EEOI

Para la mejor comprensión de cuales parámetros influyen más en la fórmula y de qué forma, se realiza un estudio de la sensibilidad a las variables requeridas para el cálculo de los índices. Las variables estudiadas de la calculadora son combustible consumido total (CCT), y distancia navegada (D). Los índices en que influyen son las emisiones de CO_2, el valor del trabajo realizado, el indicador operacional de la eficiencia energética, el combustible consumido total por milla navegada y el combustible consumido para propulsión (CCP) por milla navegada.

A continuación (Tabla 4-1) se exponen las fórmulas de los índices analizados:

Cantidad de emisiones de CO_2	$Emisiones\ CO_2 = \sum_j FC_j \times C_{Fj}$
Valor del Trabajo Realizado	$VTR = (d \times D) + (p \times D)$
EEOI	$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{(d \times D) + (p \times D)}$
Combustible Consumido Total (CCT) por milla navegada	$CCT = {\sum_j FC_j}/{D}$
Combustible Consumido para Propulsión (CCP) por milla navegada	$CCP = {\sum_j FC_{Pj}}/{D}$

Tabla 4-1 Parámetros e índices analizados en el estudio de sensibilidad de la calculadora EEOI. Elaboración propia.

El estudio de sensibilidad se ha realizado para un desplazamiento y dotación fija de un buque. Realizando aumentos y disminución del valor de las variables se ha podido analizar el cambio consecuente en los índices. En los dos siguientes esquemas se presenta el cambio proporcional para el aumento de las variables, el cambio debido al decremento es de similar respuesta.

Para la variable combustible consumido (Figura 4-10), un aumento del consumo conlleva un aumento proporcional de las emisiones producidas por el buque, del índice EEOI, del combustible total consumido por milla navegada, del combustible consumido para propulsión por milla navegada y el valor del trabajo realizado no cambiaría al no depender del consumo de combustible.

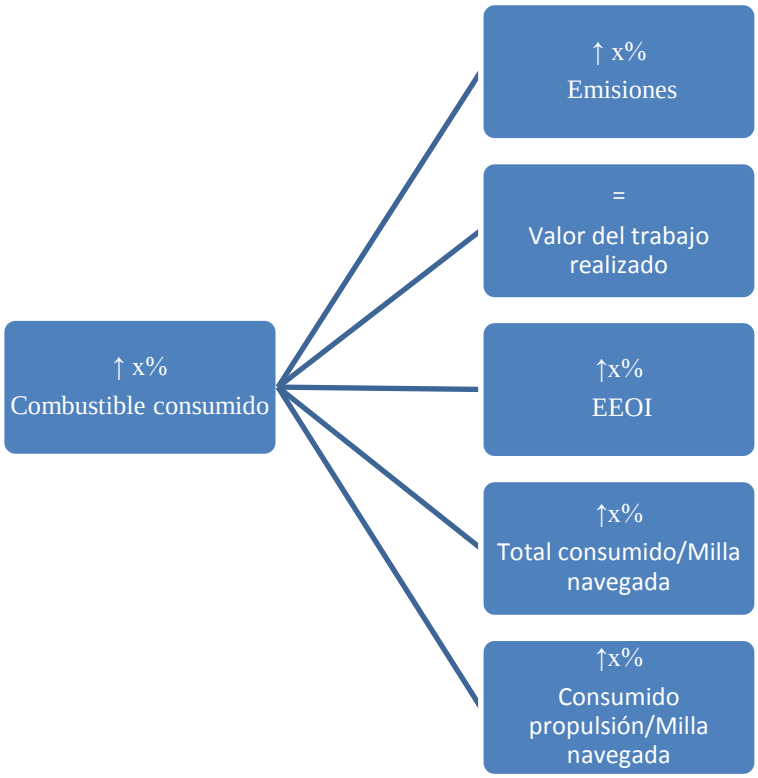

Figura 4-10 Análisis combustible consumido. Elaboración propia.

Para la variable distancia navegada (Figura 4-11), un aumento de la distancia navegada implica un aumento proporcional del valor del trabajo realizado, se mantiene igual las emisiones de CO_2 e inversamente proporcional para el EEOI, combustible consumido total y combustible consumido para propulsión.

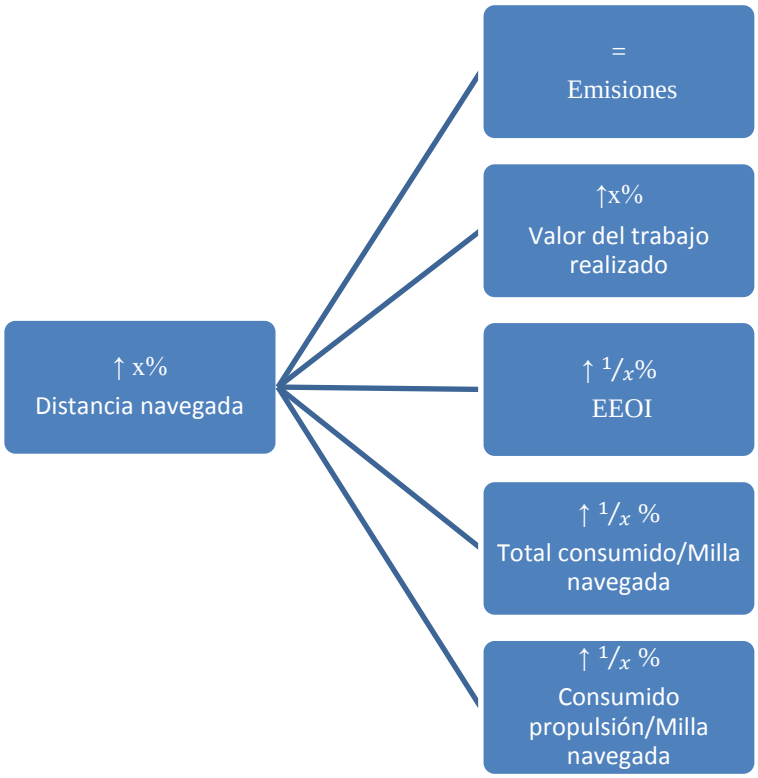

Figura 4-11 Análisis variable distancia navegada. Elaboración propia.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La inversión en investigación es una labor que bien planificada y aplicada revierte un gran beneficio a la hora de introducir procedimientos orientados a la mejora de la EE en buques. El desarrollo científico y técnico aplicado de la energía es de importancia para conseguir la mejor eficiencia. Por ello, el estudio de normativas, análisis y avances tecnológicos llevados a cabo en el ámbito civil, debe ser una parte importante de la labor de investigación de la Armada Española. La labor científica ha de ser de investigación conjunta y más ligada entre los diferentes centros de desarrollo tanto civiles como militares. De esta forma, el trabajo conjunto puede ser aprovechado por distintos organismos del Estado, aunando esfuerzos y reduciendo los costes para la investigación. Esto consigue una mayor relevancia de las investigaciones de ingeniería realizadas por la Armada en la mejora de sistemas y desarrollos tecnológicos de aplicación en el sector naval civil, logrando la iniciativa por parte de la Armada que le permita ser punto de referencia de innovación y desarrollo para el sector marítimo.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se ha realizado un estudio de las normativas civiles actuales de EE en el sector marítimo, demostrando su aplicabilidad en los buques de guerra. Las normativas de eficiencia energética implementadas por la OMI y la UE son unas pautas de importancia para la Armada Española. Pese a no encontrarse obligada a cumplirlas, la aplicación de las normativas, ayudan a la mejora continua y al desarrollo tecnológico. Considerando la definición de eficiencia energética, que no significa dejar de realizar las navegaciones y acciones requeridas o con menores capacidades, sino consiguiendo los mismos resultados con menor consumo, mejores resultados con el mismo consumo o lo óptimo, mejorar los resultados y reducir el consumo.

La mejora de la EE pasiva es de posible aplicación en los buques de la Armada y no repercute en las capacidades del buque, por lo tanto es un beneficio aprovechable independientemente de la operación que se esté realizando. Mientras tanto, la mejora de la EE operacional puede ser realizada durante aquellas navegaciones que no exijan una necesidad especial de energía. Teniendo en cuenta las necesidades especiales en el diseño de un buque de guerra y de la priorización de la operatividad frente a la eficiencia cuando la ocasión lo requiera, las mejoras en la EE pasiva y operativa son aplicables a los buques de la Armada Española.

La mejora de la eficiencia energética a bordo de los buques de la Armada supone una inversión que llevará a la disminución de los costes de las actividades marítimas, la consecución de una mayor autonomía para los buques y un ejemplo de respeto al medio ambiente.

Se ha expuesto la utilidad del EEDI como índice a tener en cuenta en la construcción de buques futuros para un mejor estudio de la eficiencia energética del buque y sus posibilidades de mejora. Pudiendo ponerse en marcha su uso en el nuevo proyecto de las fragatas F-110.

La ejecución de un plan de gestión de la eficiencia energética en los buques de la Armada supone mejoras en el ámbito energético, económico y de proyección de la fuerza. Así como la búsqueda de la mejora continua en eficiencia energética en los buques.

Para la mayor efectividad del seguimiento del plan, es necesaria una herramienta que permita cuantificar la mejora de la EE en los buques para conocer si las medidas e inversiones llevadas a cabo son las correctas y cumplen sus objetivos. En el presente trabajo se ha realizado una propuesta de uso de la calculadora de EEOI con parámetros adecuados para buques de guerra.

Se ha propuesto la mejora del seguimiento, notificación y verificación en los buques de la Armada, guiándose con la propuesta por la UE. Un control preciso y análisis posterior de los datos ofrece la mejor ayuda para la elección de las medidas a seguir para mejorar la EE así como la efectividad de las implementadas.

Tras el estudio realizado se han mostrado la multitud de alternativas energéticas, sistemas de producción energética auxiliar y desarrollos puestos en marcha para el mejor aprovechamiento de la energía a bordo de los buques.

Las investigaciones y vías de desarrollo a realizar en el presente Trabajo de Fin de Grado quedan limitadas por el tiempo de desarrollo del mismo. La labor de la investigación de la eficiencia energética requiere de una continuidad en el tiempo de la línea de investigación abierta y del desarrollo de sus ramas asociadas.

Por consiguiente, las líneas de investigación y mejora abiertas por este trabajo y el desarrollo de las ramas son numerosas. Es de destacar que de forma general para los buques ya construidos, el estudio y la modificación de los sistemas de iluminación en base a lámparas incadescentes o tubos fluorescentes, debe ser orientada a la utilización de elementos tipo LED que permitirán una reducción aún mayor del consumo. Pudiendo realizarse a corto plazo en buques de menor porte como lanchas de instrucción o pequeños buques auxiliares y a medio o largo plazo por su inclusión en el resto de la flota.

Por otro lado se hace patente que la necesidad del empleo de caudalímetros a bordo en los buques de mayor porte es fundamental y por tanto es una vía abierta al estudio de su implantación en buques de menor porte tipo auxiliar, como remolcadores, lanchas de instrucción o buques tipo goleta.

De igual forma, una vía importante que no se ha implementado en ningún buque de la Armada es la utilización de energía solar como fuente fundamental entre otras, para el alumbrado y sistemas de navegación de emergencia. Este tipo de sistemas está siendo profusamente utilizado en remolcadores civiles, por lo que se plantea la posibilidad de incorporarlos en buques auxiliares tipo pilotinas, con menores necesidades energéticas que un buque de mayor porte, permitiéndole incluso el uso de la energía solar para su total funcionamiento.

Todo ello nos permitirá en un futuro alcanzar la mejor eficiencia energética, necesaria para la mejor labor y aprovechamiento de los recursos en la Armada Española.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] International Maritime Organization (IMO), "Report of the marine environment protection committee (MEPC) on its sixty-second session, 203 (62), ANNEX 19." *MEPC*, vol. 62, pp. 24-26 2011.

[2] Diario Oficial de la Unión Europea. 2015/757, Reglamento (UE) 2015/757 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2015 relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo. (19/05/2015).

[3] N.H. Doerry, T.J. McCoy and T.W. Martin, "Energy and the affordable future fleet," *United States Navy* 2010.

[4] Armada Española. (2007). *Líneas Generales de la Armada 2007* [Online]. Available: http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/mardigital_docinstituc/prefLang_es/00_docu-institucional-armada+--02_lineas-generales-armada.

[5] Naciones Unidas, "Convención marco sobre el Cambio climático. Aprobación del acuerdo de parís", 2015. http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/items/6196.php.

[6] U. Europea, "Directiva 2012/27/UE del parlamento europeo y del consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE texto pertinente a efectos del EEE" *Diario Oficial de la Unión Europea*, no. 315, pp. 1-56 2012.

[7] Comisión Europea, *EUROPA 2020. Una Estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador*. Bruselas, 2010.

[8] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2014). *Plan nacional de acción de eficiencia energética 2011-2020* [Online]. Available: http://www.idae.es/index.php/id.663/mod.pags/mem.detalle.

[9] Consejo de la Unión Europea. (2014). *Conclusiones sobre el marco de actuación en materia de clima y energía hasta el año 2030* [Online]. Available: http://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/.

[10] European Commission. (2011). *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050.* [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es#tab-0-0.

[11] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2016). *Publicaciones* [Online]. Available: http://www.idae.es/index.php/relcategoria.101/id.937/relmenu.392/mod.pags/mem.detalle.

[12] European Commission. (2016). *Reference Scenario 2016* [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/en/news/reference-scenario-energy.

[13] European Union Law. (2014). *Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo sobre la exploración y producción de hidrocarburos (como el gas de esquisto) utilizando la fracturación hidráulica de alto volumen en la UE* [Online]. Available: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52014DC0023.

[14] United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD). (2015). *Review of Maritime Transport 2015.* [Online]. Available: http://unctad.org/en/pages/PublicationWebflyer.aspx?publicationid=1374.

[15] United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD). (2016). *Review of Maritime Transport 2016* [Online]. Available: http://unctad.org/en/pages/PublicationWebflyer.aspx?publicationid=1650.

[16] International Maritime Organization (IMO), Convenio internacional sobre arqueo de buques, 1969.

[17] ANAVE Asociación de Navieros Españoles. (2016). *Estudios Marina Mercante 2015/2016* [Online]. Available: http://www.anave.es/marina-mercante/81-marina-mercante.

[18] Clarkson Research Services Limited (CRSL). (2015). *The Tramp Shipping Market. An Update of a Report Prepared for the European Community Shipowners' Association (ECSA)* [Online]. Available: http://www.ecsa.eu/images/Studies/ECSA%20-%20The%20Tramp%20Shipping%20Market%20Mar%202015.pdf.

[19] G. Cipoletta Tomassian and R. Sánchez, *La industria del transporte marítimo y las crisis económicas*, CEPAL, 2010.

[20] International Maritime Organization (IMO). (2009). *Second IMO GHG Study 2009* [Online]. Available: http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/second-imo-ghg-study-2009.aspx.

[21] British Petrol (BP). (2016). *Statistical Review of World Energy 2016* [Online]. Available: https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf.

[22] International Maritime Organization (IMO). (2014). *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014* [Online]. Available:

http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf.

[23] International Maritime Organization (IMO). (1983). *Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)* [Online]. Available: http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx.

[24] International Maritime Organization (IMO). (2017). [Online]. Available: http://www.imo.org.

[25] Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). (28/02/2017). [Online]. Available: http://cdiac.ornl.gov/.

[26] European Commission. (2017). *Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)* [Online]. Available: http://edgar.jrc.ec.europa.eu/.

[27] Maersk. (2017). [Online]. Available: www.maersk.com.

[28] A.G. Álvarez and Cañizares, María del Pilar Martín, *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril*, Grupo Gestor del Proyecto EnerTrans, 2009.

[29] M. Viana, P. Hammingh, A. Colette, X. Querol, B. Degraeuwe, I. de Vlieger and J. van Aardenne, "Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in europe," *Atmos.Environ.*, vol. 90, pp. 96-105 2014.

[30] J. van Aardenne, A. Colette, B. Degraeuwe, P. Hammingh and I. De Vlieger, *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing*, 2013.

[31] H. Wang and N. Lutsey, "Long-term potential for increased shipping efficiency through the adoption of industry-leading practices," *The International Council on Clean Transportation, Retrieved July* 2013.

[32] L. Vacas Forns, "Análisis de la nueva normativa OMI sobre eficiencia energética (EEDI/SEEMP)," *Universidad Politécnica de Cataluña* 2012. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/16382.

[33] International Maritime Organization (IMO). *MEPC 63. Guidance on best practices for fuel-efficient operation for ships* [Online]. Available: http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/213(63).pdf.

[34] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Instituto Energético de Galicia (INEGA). (2010). *Resumen sobre el desarrollo de la Medida del plan de acción 2008-2012 "mejora del ahorro y la eficiencia energética en el sector pesquero"* [Online]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Resumen_barcos_pesca_2008_78e8b7dc.pdf.

[35] International Maritime Organization (IMO). (2011). *MEPC 70/18. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the International convention for the prevention of pollution from Ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI)* [Online]. Available: http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/278(70).pdf.

[36] International Maritime Organization (IMO). (2014). *MEPC.245(66). Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships* [Online]. Available: http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/245(66).pdf.

[37] International Maritime Organization (IMO). (2009). *Orientaciones para la elaboración de un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP)* [Online]. Available: http://www.prefecturanaval.gov.ar/web/es/doc/dpsn_circulares_mepc/MEPC.1-Circ.683.pdf.

[38] Marine Environment Protection Committee, "Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)," *International Maritime Organization, Report* 2009.

[39] Marinelog. (30/01/2017). [Online]. Available: http://www.marinelog.com/.

[40] Marine in Sight. (30/01/2017). [Online]. Available: www.marineinsight.com.

[41] Fondear. [Online]. Available: www.fondear.org.

[42] AB surveyors. [Online]. Available: http://absurveyors.es/.

[43] ABB España. (30/01/2017). [Online]. Available: http://new.abb.com/es.

[44] Universidad de Antioquía. (28/02/2017). [Online]. Available: http://portal.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/institucional/unidades-academicas/facultades/ingenieria.

[45] Ente Vasco de la Energía (EVE). (2017). *La Cogeneración* [Online]. Available: http://www.eve.eus/La-energia/Infografias/La-cogeneracion.aspx?lang=es-ES.

[46] M. García Gutiérrez, "Dimensionado de un sistema de recuperación de gases de escape para un portacontenedores de 2700 TEU," *Universidad Politécnica de Cataluña* 2015.

[47] Ingeniería Marina. [Online]. Available: https://ingenieriamarina.wordpress.com/.

[48] Ingeniería Marina. (2009). *Propulsión de buques asistida por energía solar* [Online]. Available: www.ingenieriamarina.wordpress.com/2008/09/12/propulsion-de-buques-asistida-por-energia-eolica/.

[49] Sky sails. (05/02/2017). [Online]. Available: www.skysails.info.

[50] Armada Española. (05/02/0217). [Online]. Available: http://www.armada.mde.es/.

[51] Planet solar. (28/02/2017). *Towards energy independence* [Online]. Available: www.planetsolar.org.

[52] Sea cleaner. (28/02/2017). *Embarcaciones de limpieza* [Online]. Available: www.seacleaner.com.

[53] Omega. (28/02/2017). *Productos de medición de proceso y control* [Online]. Available: es.omega.com /prodinfo/caudalimetros.html.

[54] AZTI Tecnalia. (28/02/2017). *Centro tecnológico vasco AZTI. Innovación marina.* [Online]. Available: http://www.azti.es/es/.

[55] International Maritime Organization (IMO). (2015). *MARPOL Anexo vi y código NOx 2008 y directrices para la implantación* [Online]. Available: http://www.imo.org/es/Publications/Documents/Supplements%20and%20CDs/Spanish/QB664S_092015.pdf.

[56] IncBio. (28/02/2017). *Combustible emulsionado* [Online]. Available: http://incbio.com/fwe/es/.

[57] LNG-GNL. (28/02/2017). *Gas Natural Licuado* [Online]. Available: www.gnl.es.

[58] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España (MINETAD). [Online]. Available: http://www.minetad.gob.es/es-ES/Paginas/index.aspx.

[59] BP, Statistical Review of World Energy.

[60] U.S. Energy Information Administration (EIA), "Annual energy outlook 2013 with projections to 2040", Rep. DOE/EIA-0383(2013) 2013.

[61] Sea LNG. (28/02/2017). [Online]. Available: http://sea-lng.org/.

[62] Gasnam. (28/02/2017). *Ascociación ibérica del gas natural para la movilidad* [Online]. Available: www.gasnam.es.

[63] U.S. Naval research laboratory. (28/02/2017). [Online]. Available: www.nrl.navy.mil.

[64] Proton Motor. (28/02/2017). *Fuel cells. Power systems* [Online]. Available: http://www.proton-motor.com/zemships/.

[65] European Commission. (2017). *One hundred passengers and zero emissions. The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells* [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships_Brochure_EN.pdf.

[66] Energías Renovables. (28/02/2017). [Online]. Available: http://www.energiasrenovablesinfo.com/.

[67] M.M. González, V.D. Casás, F.L. Peña and R.J. Duro, "Mejoras energéticas para barcos de pesca: Proyecto peixe verde actividad del grupo integrado de ingeniería," 2008.

[68] Fondo Europeo de la Pesca. (2012). *Informe de ejecución 2011* [Online]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/pesca/temas/fondos-europeos/Informe_de_Ejecuci%C3%B3n_2011_del_FEP_tcm7-327582.pdf.

[69] Marina Militare. (28/02/2017). ***Green Fleet. Flotta verde.*** [Online]. Available: www.marina.difesa.it/EN/facts/greenfleet/Pagine/default.aspx.

[70] U.S. Navy. (2017). ***Energy Conservation Measures (ECMs)*** [Online]. Available: http://greenfleet.dodlive.mil/energy-conservation-measures-ecms/.

[71] Royal Navy. (2017). [Online]. Available: http://www.royalnavy.mod.uk/environmental-protection.

[72] T. Keenan, K. Puri, T. Hirst, T. Pugh, B. Evans, M. Dix, A. Pitman, P. Craig, R. Law and O. Alves, "Next generation australian community climate and earth-system simulator (NG-ACCESS) a roadmap 2014–2019," *Technical, Centre for Australian Weather and Climate Research, CAWCR* 2014.

[73] National Defence Canada, Defence Environmental Strategy 2013-2016, 2012.

[74] Naciones Unidas. (28/02/2017). *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar* [Online]. Available: http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/convemar_es.pdf.

[75] I. Barbudo, *Tratado de Maniobra. Tomo I. Fundamentos de Maniobra.* Madrid, Fragata Libros Náuticos, 1995.

[76] Carrasco, P.J., Arce, M.E., Martínez-Torres, J., González-Fernández, R., "Eficiencia energética en buques de guerra: un caso práctico," in *DESEI+D*, San Javier, Murcia, España, 2016.

[77] M. Paredes García, "Diseño planta eléctrica en pesquero palangrero," *Universidad Politécnica de Cartagena* 2013. [Online]. Available: http://repositorio.upct.es/handle/10317/3601.

[78] Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. (28/02/2017). *Fondo Europeo Marítimo y de Pesca* [Online]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/pesca/temas/fondos-europeos/femp/.

[79] Anonymous (28/02/2017). *Infobolsa* [Online]. Available: www.infobolsa.es.

[80] Anonymous (28/02/2017). *Metric conversion charts and calculators for metric conversions* [Online]. Available: http://www.metric-conversions.org/.

7 ANEXOS

La siguiente tabla (Tabla 7-1) es perteneciente al apartado 2.1.2, en la cual se expone el histórico de consumos de petróleo en el sector marítimo (que incluye todas las actividades realizadas por los buques), transporte marítimo (incluyendo sólo las actividades de los buques relacionadas con el transporte de bienes y materias) y el consumo mundial de petróleo (todos los sectores de la actividad humana). Con estos datos se realizan las siguientes figuras explicadas en el mismo apartado (Figura 2-8, Figura 2-9).

Año	Sector marítimo (estimaciones)			Transporte marítimo (estimaciones)			Consumo mundial de petróleo
	Escenario pesimista	Escenario neutro	Escenario optimista	Escenario pesimista	Escenario neutro	Escenario optimista	
1990	150	179	215	120	149	185	3158
1991	157	187	224	125	155	193	3160
1992	160	191	229	128	159	197	3214
1993	166	199	239	133	165	205	3185
1994	172	205	246	137	170	212	3254
1995	177	211	254	141	176	218	3295
1996	181	216	260	145	180	223	3369
1997	191	228	274	153	190	236	3453
1998	189	226	271	151	188	233	3481
1999	193	230	276	154	191	238	3552
2000	208	248	298	166	206	256	3588
2001	209	250	300	167	208	258	3621
2002	212	253	304	169	210	261	3651
2003	226	270	325	181	225	279	3740
2004	242	289	347	193	240	298	3881
2005	255	304	365	204	253	314	3934
2006	269	321	385	215	267	331	3977
2007	279	333	400	223	277	344	4032
2008	243	303	363	200	247	294	4018
2009	236	275	313	191	233	275	3949
2010	253	273	293	207	227	248	4080
2011	253	290	327	207	240	274	4122

Tabla 7-1 Consumos de combustible debidos al sector marítimo y al transporte marítimo en Mtep. Fuente: OMI 2014, 2009 y BP Statistical Review. Elaboración propia.