



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Propulsión naval sostenible: Estudio de viabilidad
tecno-económica para su implantación en el sector naval nacional
y en particular en la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: José Gómez-Vizcaíno Escudero

DIRECTORES: Carlos Pérez Collazo

André Boehman

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Propulsión naval sostenible: Estudio de viabilidad tecn-
económica para su implantación en el sector naval nacional y en
particular en la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El actual panorama de cambio climático ha provocado una creciente conciencia social respecto a la necesidad de adaptar el funcionamiento de nuestra sociedad a un modelo más sostenible. En esta línea, la Unión Europea establece un objetivo de cero emisiones para el año 2050. Para ello, resulta indispensable la transición progresiva hacia el uso de combustibles renovables que sustituyan a los combustibles fósiles que se usan mayoritariamente a día de hoy. Así mismo, el ámbito de la defensa se encuentra involucrado en este proceso de cambio con el objetivo de minimizar la huella de carbono producida por las operaciones militares. Este estudio pretende realizar un estudio tecno-económico de los combustibles alternativos más prometedores para su implementación tanto en el sector marítimo nacional como en los buques de la Armada, así como identificar las plataformas navales más aptas para su transición a corto plazo hacia estas nuevas formas de obtención de la energía necesaria para sus operaciones. Para ello, se empleará un análisis del Coste Total de Propiedad, de la mano de un análisis de las debilidades y fortalezas (DAFO) de diferentes combustibles renovables. Ambos, serán aplicados tanto al ámbito civil como al militar.

PALABRAS CLAVE

Reducción de emisiones, TCO, DAFO, Armada, Combustibles renovables.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los profesores del Centro Universitario de la Defensa, en especial a mi tutor, Carlos, por haber sido una inenarrable fuente de motivación para el desarrollo de mi curiosidad por lo que nos rodea. También quiero agradecer a todos los profesores militares y brigadieres que, en algún momento a lo largo de los últimos seis años, han dedicado una valiosa parte de su tiempo en inculcarme los valores que han de regir la vida un militar.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
Glosario	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Objetivos	8
1.2 Estructura del documento.....	8
2 Estado del arte	11
2.1 Métodos de propulsión naval	11
2.1.1 El motor de combustión interna.....	12
2.1.2 Turbina de gas.....	13
2.1.3 Propulsión eléctrica	13
2.1.4 Propulsión nuclear	15
2.2 Combustibles fósiles	16
2.2.1 Carbón.....	16
2.2.2 Petróleo y sus derivados	17
2.3 Combustibles sostenibles	19
2.3.1 Biodiesel o e-diésel.....	19
2.3.2 Hidrógeno	19
2.3.3 Gas natural licuado (GNL)	20
2.3.4 Biometano y e-metano	22
2.3.5 Metanol	22
2.3.6 Biocombustibles	23
2.3.7 Amoníaco.....	24
2.3.8 Resumen de características de diferentes combustibles renovables	26
2.4 HyMethShip	26
2.5 Bunkering.....	27
2.6 Normativa: Convenio MARPOL	28
2.6.1 Anexo VI	28
2.7 Proyectos en España.....	30
2.7.1 Maersk-Cepsa: Metanol verde	30
2.7.2 Hidrógeno verde	31
3 Metodología.....	33
3.1 Estructura de la flota marítima española	33
3.2 Costo total de propiedad (TCO)	35
3.3 Análisis DAFO.....	36
3.4 Producción de combustibles.....	36

3.4.1 Combustibles sintéticos	38
3.4.2 Diésel	39
3.5 Coste asociado al consumo de combustible	39
3.6 Coste por pérdidas de espacio de almacenamiento a bordo	40
3.7 CAPEX. Coste de adaptación de las plantas propulsoras	41
4 Resultados	43
4.1 Cálculo TCO	43
4.1.1 TCO en ferris	43
4.1.2 TCO en portacontenedores	44
4.1.3 TCO en buques de carga general	45
4.1.4 TCO en graneleros	46
4.1.1 Análisis de sensibilidad del TCO	46
4.2 Resultados del análisis DAFO	47
4.2.1 DAFO: Metanol	47
4.2.3 DAFO: Hidrógeno	49
4.2.4 DAFO: Amoníaco.....	51
5 Alternativas para La Armada	53
5.1 Una Armada heterogénea.....	53
5.2 Análisis DAFO desde el punto de vista militar.....	54
5.2.1 DAFO desde la perspectiva militar: Metanol	54
5.2.2 DAFO desde la perspectiva militar: Hidrógeno	55
5.2.3 DAFO desde la perspectiva militar: Amoníaco.....	56
5.3 Alternativas para diferentes plataformas.....	56
5.3.1 Motor diésel-metano en el buque de transporte “Ysabel A-06”	57
5.3.2 Celdas de hidrógeno en los Buques de Acción Marítima.....	59
6 Discusión.....	63
7 Conclusiones y líneas futuras	65
7.1 Conclusiones	65
7.2 Líneas futuras	66
Bibliografía.....	67
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	75
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Propulsión de un barco de vapor [5].	11
Figura 2-2 Ciclo de Carnot (autoría propia).	12
Figura 2-3 Detalle cámara de combustión MCIA [10].	13
Figura 2-4 Turbina de gas utilizada para la propulsión marítima [5].	13
Figura 2-5 Propulsión eléctrica (autoría propia).	14
Figura 2-6 Pila de combustible de H ₂ [14].	14
Figura 2-7 Sistema AIP Submarinos S-80 [16].	15
Figura 2-8 Esquema propulsión CODOE Buque de Acción Marítima (autoría propia basado en [17] y [18]).	15
Figura 2-9 Esquema reactor de agua a presión [21].	16
Figura 2-10 Consumo de combustibles por tipo en la UE [22].	17
Figura 2-11 GEI emitidos por tipo de combustible (autoría propia basado en [24]).	17
Figura 2-12 Consumo de energía según tipo de combustible [30].	18
Figura 2-13 Combustión del hidrógeno [36].	19
Figura 2-14 Esquema de obtención del hidrógeno verde [39].	20
Figura 2-15 Buques con diseño MOSS (arriba) y de membrana (abajo) [41].	21
Figura 2-16 % de emisiones GNL frente a diésel (autoría propia basado en [41] y [42]).	22
Figura 2-17 Proceso de obtención de metanol (autoría propia basado en [3]).	23
Figura 2-18 Diagrama de producción de una biorrefinería [46].	24
Figura 2-19 Diagrama esquemático producción de amoníaco [48].	25
Figura 2-20 Potencial diseño de buque propulsado por amoníaco [50].	25
Figura 2-21 Diagrama esquemático ciclo cerrado (autoría propia basado en [51]).	26
Figura 2-22 Esquema HyMethShip [52].	27
Figura 2-23 Tipos de <i>bunkering</i> [56].	27
Figura 2-24 Zonas de Control de emisiones [61].	29
Figura 2-25 Límite de NO _x emitido frente a revoluciones del motor [65].	30
Figura 2-26 Logos corporativos de: Cepsa, Maersk y C2X [67]–[69].	30
Figura 2-27 Instalaciones de Repsol en el Valle de Escombreras (Cartagena) [73].	31
Figura 3-6 Distribución de la flota española (autoría propia, datos fechados en 2020 [78]).	34
Figura 3-1 Logo MarineTraffic [77].	34
Figura 3-2 Evolución de los costes de combustibles sintéticos en el periodo 2030-2040 [79].	35
Figura 3-3 Diagrama esquemático TCO (autoría propia).	35
Figura 3-4 Diagrama esquemático del estudio mediante análisis DAFO (autoría propia).	37

Figura 3-5 Diagrama esquemático de proceso de obtención de combustibles (autoría propia basado en [80]).....	38
Figura 3-7 Coste anual por consumo de combustible (autoría propia).	40
Figura 3-8 Pérdidas anuales asociadas a la reducción del espacio de carga (autoría propia).	41
Figura 3-9 Coste de inversión inicial para la adaptación del buque a cada combustible (autoría propia).	42
Figura 4-1 Evolución TCO en ferris para el año 2040 (autoría propia).....	43
Figura 4-2 Evolución TCO en portacontenedores para el año 2040 (autoría propia).....	44
Figura 4-3 Evolución TCO en buques de carga general para el año 2040 (autoría propia).....	45
Figura 4-4 Evolución TCO en buques graneleros para el año 2040 (autoría propia).	46
Figura 4-5 Análisis DAFO del metanol como combustible (autoría propia).....	47
Figura 4-6 Análisis DAFO del hidrógeno como combustible (autoría propia).	49
Figura 4-7 Análisis DAFO del amoniaco como combustible (autoría propia).....	51
Figura 5-1 Análisis DAFO del metanol como combustible para buques militares (autoría propia).	54
Figura 5-2 Análisis DAFO del hidrógeno como combustible para buques militares (autoría propia). ..	55
Figura 5-3 Análisis DAFO del amoniaco como combustible para buques militares (autoría propia)....	56
Figura 5-4 Distribución de sensores y armamento de una fragata F-100 ([98]).	57
Figura 5-5 Coste anual por consumo según velocidad (autoría propia basado en [100]).....	59
Figura 5-6 Reducción de emisiones al utilizar configuración dual-fuel (autoría propia basado en[100]).	59
Figura 5-7 Submarino alemán U-31 con sistema AIP de hidrógeno [101].....	60
Figura 5-8 Diagrama esquemático planta de propulsión de los BAM [103].	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Generaciones de biocombustibles (autoría propia basada en [45]).	24
Tabla 2-2 Resumen características de diferentes combustibles (autoría propia basado en).	26
Tabla 2-3 Tipos de <i>bunkering</i> (autoría propia).	27
Tabla 2-4 Anexos Convenio MARPOL (autoría propia basada en [58]).	28
Tabla 2-5 Reglas más características sobre el control de emisiones en el Convenio MARPOL (autoría propia).	28
Tabla 2-6 Niveles “Tiers” de regulación de emisiones de NOx [64].	30
Tabla 3-1 Datos de referencia para los buques [77] (autoría propia).	34
Tabla 3-2 Costos de procesos de obtención de combustible (autoría propia basado en [82], [82]–[88]).	38
Tabla 3-3 Tipo de navegación según buque (autoría propia basado en [74], [78]).	39
Tabla 3-4 Coste de operación según tipo de planta propulsora (autoría propia basado en [80], [87], [92]).	39
Tabla 3-5 Perdidas por reducción de espacio de carga (autoría propia basado en [79], [80], [93]).	40
Tabla 3-6 % de volumen de carga perdido según combustible (autoría propia basado en [94]).	41
Tabla 3-7 Costes de inversión según combustible (autoría propia basado en [95], [96]).	41
Tabla 4-1 Resultados TCO para buques de tipo ferry (autoría propia).	43
Tabla 4-2 Resultados TCO para buques de tipo portacontenedores (autoría propia).	44
Tabla 4-3 Resultados TCO para buques de carga general (autoría propia).	45
Tabla 4-4 Resultados TCO para buques graneleros (autoría propia).	46
Tabla 5-1 Características de las principales plataformas de la Armada [97] (autoría propia).	53
Tabla 5-2 Coste por consumo de combustible anual del buque “Ysabel” (autoría propia basado en [100]).	58
Tabla 5-3 Cálculo coste total del proyecto dual-fuel del buque “Ysabel” (autoría propia basado en [100]).	58
Tabla 5-4 Modificaciones y propuestas para buques tipo BAM (autoría propia basado en [104]).	62

GLOSARIO

AOR	Buque de apoyo logístico
BAM	Buque de Acción Marítima
BPE	Buque de proyección estratégica
CAPEX	Costes de inversión
CO ₂	Dióxido de Carbono
CODOE	Propulsión combinada diésel o eléctrica
CODOG	Propulsión combinada diésel o turbina de gas
DAFO	Análisis de debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades
DFM	Diésel Fuel Marine
ECA	Zona de control de emisiones
EIA	Administración de Información Energética
GEI	Gases de efecto invernadero
GNL	Gas Natural Licuado
MCIA	Motor alternativo de combustión interna
NO _x	Óxido de Nitrógeno
OMI	Organización Marítima Internacional
OPEX	Costes de operación
SO _x	Óxido de Azufre
TCO	Coste total de propiedad

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante los últimos dos siglos se han llevado a cabo numerosos desarrollos tecnológicos que han permitido que hoy en día sea posible disfrutar de un mundo completamente interconectado. Desde la Segunda Revolución Industrial, dichos avances fueron potenciados y materializados por la explotación de combustibles fósiles. El carbón y la máquina de vapor dejaron paso a mitad del siglo XIX al motor de combustión interna que utilizaba derivados del petróleo como combustible, convirtiéndose este en el principal medio de propulsión de toda suerte de vehículos y, en concreto, de los grandes buques [1].

Como consecuencia, las emisiones derivadas de estas combustiones tienen un impacto directo en el medio ambiente, siendo el transporte el sector de mayor consumo energético tanto en Europa como en España, con unos porcentajes del 30,8% y 40,4% de la energía final consumida respectivamente. Lo mismo ocurre con las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) frente a otros sectores, donde en España el transporte llega a alcanzar el 29,6% de los gases emitidos [2]. Dentro del sector transportes, el vector marítimo es el segundo más contaminante, solamente por detrás del aéreo. Por todo ello y dentro de los objetivos marcados por la Organización Marítima Internacional (OMI), resulta fundamental el desarrollo de combustibles alternativos menos contaminantes.

El escenario previsto por la OMI para el año 2050 indica que aproximadamente el 50% de los combustibles empleados entonces seguirán siendo combustibles fósiles (GNL y fueloil). Mientras que la otra estará formada por electricidad para baterías en sistemas de propulsión eléctrica y biocombustibles y, principalmente por combustibles renovables con mínimas emisiones netas de CO₂ [3]. A través de diferentes procesos no contaminantes, resulta posible obtener combustibles *verdes* como son el electrometano, electrometanol, el hidrógeno o el amoníaco. Si bien estos combustibles son de preferencia desde el punto de vista medio ambiental, sus propiedades energéticas son francamente menores que las del actual diésel. Por ello es necesario analizar la viabilidad técnica y económica de las modificaciones necesarias en todo el entramado marítimo y naval, tanto en la mecánica de los propios motores como en el almacenamiento de los mencionados combustibles, así como la obtención de estos de una manera ecológicamente coherente.

La legislación vigente en materia de medio ambiente, cada vez más exigente, hace evidente la necesidad no solamente de minimizar la contaminación sino también de garantizar la explotación responsable de los recursos naturales. De esta manera, se pretende concienciar a la sociedad sobre la importancia de construir un modelo de vida sostenible.

Por todo lo anteriormente expuesto, es motivación para este proyecto realizar un estudio de viabilidad tecnológica y económica para la implantación de dichos combustibles renovables, no solamente en el sector marítimo nacional, sino también, en la Armada.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto fin de grado es el de llevar a cabo un estudio de viabilidad en base a un análisis tecno-económico de lo que supondría implantar el uso de combustibles renovables en el sector marítimo español, así como también en determinados buques de la armada. Para la consecución de este objetivo principal, se establecen los objetivos secundarios que a continuación se relacionan:

- Identificar los combustibles renovables más prometedores entre los existentes, en base a diversos factores, tales como: económicos, capacidad de reducción de emisiones contaminantes, facilidad de transporte y almacenaje, capacidad energética y seguridad.
- Realizar un estudio económico que analice diferentes variables, tales como el capital necesario para la modificación de los buques en los que eventualmente se considere implantar combustibles renovables y el coste anual que supone la operación con estos combustibles.
- Discernir de entre todos los barcos que componen la flota marítima española, que tipos de buque son los más representativos, así como cuáles de ellos son más adecuados para su transformación orientada al uso de combustibles renovables.
- Analizar los puntos fuertes y débiles de cada combustible para cada tipo de buque estudiado, con la finalidad de asociar, en caso de ser necesario, un potencial combustible alternativo para cada clase de barco.
- Identificar plataformas militares cuyas características de operación sean compatibles con la implantación de combustibles renovables.
- Proponer modificaciones, caso de ser necesarias, en las unidades de la Armada susceptibles de llevar a cabo la progresiva transformación hacia el uso de combustibles renovables.

1.2 Estructura del documento

Para desarrollar los objetivos descritos en el apartado anterior, el resto del presente documento se ha organizado de la siguiente manera:

- Introducción y objetivos:

En esta sección se pretende exponer la motivación del presente estudio, así como los objetivos que se pretenden alcanzar. Por otro lado, se hace una breve introducción a la estructura utilizada durante el estudio para facilitar al lector su comprensión.

- Estado del arte:

En este apartado se contextualiza el estudio haciendo una breve reseña histórica acerca de los combustibles, así como la evolución de los métodos de propulsión marina y los combustibles renovables que actualmente se encuentran en desarrollo, junto con la normativa que llevan asociada.

- Metodología:

En el presente punto se realiza la descripción de la metodología utilizada para realizar el estudio tecno-económico, así como la presentación de los datos que se van a utilizar para los cálculos pertinentes durante el mismo. De esta manera se realiza la descripción de la herramienta del Coste Total de Propiedad (TCO), de los parámetros que utiliza, así como del proceso de análisis DAFO.

- Resultados:

Es este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la metodología del punto anterior. En primer lugar se detalla el cálculo del TCO empleado para el análisis económico relativo a la implementación de los diferentes combustibles renovables objeto de estudio. Así mismo, se analizan sus fortalezas y debilidades desde una perspectiva más global mediante un análisis DAFO.

- Alternativas para la Armada:

Es este punto se presentan los resultados obtenidos con la metodología del punto anterior. En primer lugar se detalla el cálculo del TCO empleado para el análisis económico relativo a la implementación de los diferentes combustibles renovables objeto de estudio. Así mismo, se analizan sus fortalezas y debilidades desde una perspectiva más global mediante un análisis DAFO.

- **Discusión:**

En el presente apartado se realiza una evaluación de los resultados obtenidos en los apartados anteriores, presentándolos de una manera más agradable para el lector.

- **Conclusiones y líneas futuras**

En este capítulo, se presentan las conclusiones obtenidas a raíz del análisis realizado. En la misma línea, se plantean potenciales posibles líneas de investigación para futuros trabajos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Métodos de propulsión naval

Desde el remo hasta la propulsión nuclear, pasando por la máquina de vapor, el hombre ha ido desarrollando progresivamente diferentes métodos de propulsión para sus naves, desarrollo que ha ido de la mano de las tecnologías y las necesidades de las sociedades de cada momento. En los últimos años este desarrollo ha ido ligado a una creciente conciencia social sobre el medio ambiente. La máquina de vapor.

Los barcos de vapor supusieron una gran revolución en el ámbito de la navegación a nivel mundial. El primero que se comercializó con éxito fue el “*Clermont*”, construido en Estados Unidos a principios del siglo XIX. La fuerza motriz que impulsaba estos barcos era producida por la máquina de vapor, que convertía, gracias a la combustión del carbón, la energía térmica del vapor de agua en energía mecánica que hacía mover las hélices o ruedas de paletas de las embarcaciones (Figura 2-1). Para ello, tras calentar el agua en una caldera, el vapor se enviaría a un cilindro con un pistón. Tras entrar en el cilindro, el vapor se expande empujando al pistón hacia su posición más retraída, haciendo rotar al eje unido al este [4].

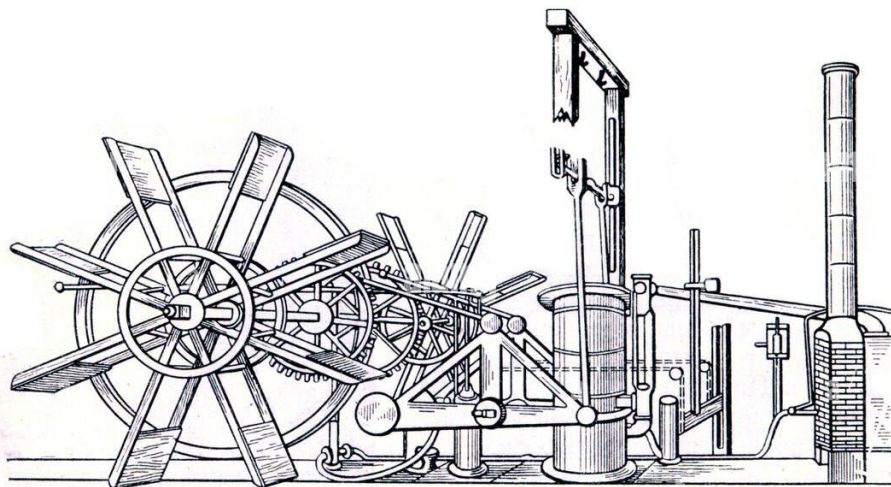


Figura 2-1 Propulsión de un barco de vapor [5].

Este tipo de buques facilitaron la planificación de los viajes marítimos, ya que la derrota de la nave dejó de depender directamente de la fuerza del viento, como ocurría anteriormente con la propulsión a vela. Esto impulsó el comercio internacional y la expansión de las rutas marítimas. Además, estos buques eran también utilizados para navegación fluvial y costera, permitiendo así la conexión entre regiones que previamente eran de difícil acceso. Avanzado el siglo XIX, los barcos de vapor fueron paulatinamente reemplazados por otros que equipaban motores de combustión interna, especialmente, a partir de la aparición del motor diésel [6].

2.1.1 El motor de combustión interna

En 1824, Sadi Carnot postula las bases de una nueva disciplina: la Termodinámica. Este sienta los primeros principios de las máquinas térmicas, como el ciclo de máximo rendimiento: el Ciclo de Carnot (Figura 2-2) [7], [8].

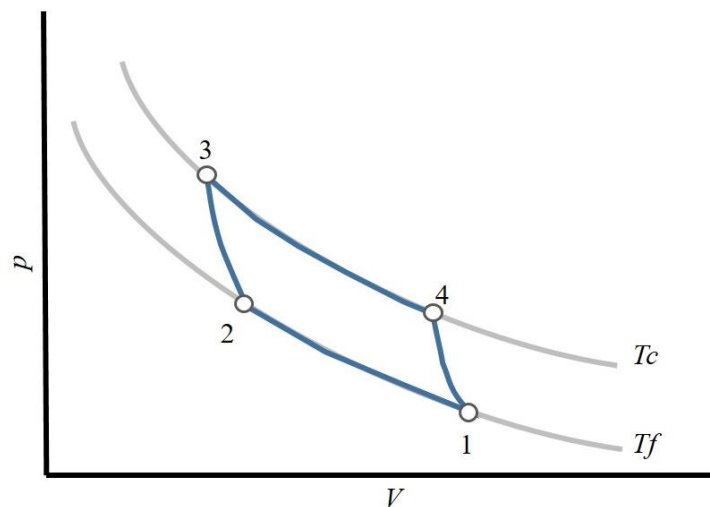


Figura 2-2 Ciclo de Carnot (autoría propia).

A finales de siglo, aparecen los primeros motores de combustión interna alternativos (MCIA). Si bien, su funcionamiento es diferente, sobre todo, por su mayor rendimiento en comparación con el de una máquina de vapor. Todos los motores térmicos actuales parten de los principios de funcionamiento de la máquina de vapor. Los MCIA son máquinas volumétricas, es decir, el volumen de trabajo está confinado en un espacio cuyo volumen varía alternativamente en función del tiempo [9]. Una característica de las máquinas de desplazamiento positivo (volumétricas) es que su comportamiento es predecible. Esto permitió su relativamente rápido desarrollo inicial, que fue previo a que se asentasen unas robustas bases teóricas que explicaran, mediante el método científico, el funcionamiento de estas máquinas.

Más adelante, el desarrollo de combustibles derivados del petróleo como la gasolina o el diésel y de las progresivas mejoras en eficiencia, fiabilidad y potencia; los MCIA pasan a ser la principal forma de propulsión de toda clase de vehículos. Actualmente, el 70% de la flota marítima mundial equipa motores diésel de 2 tiempos de baja velocidad; el 17% utiliza motores diésel de 4 tiempos de velocidad media [11].

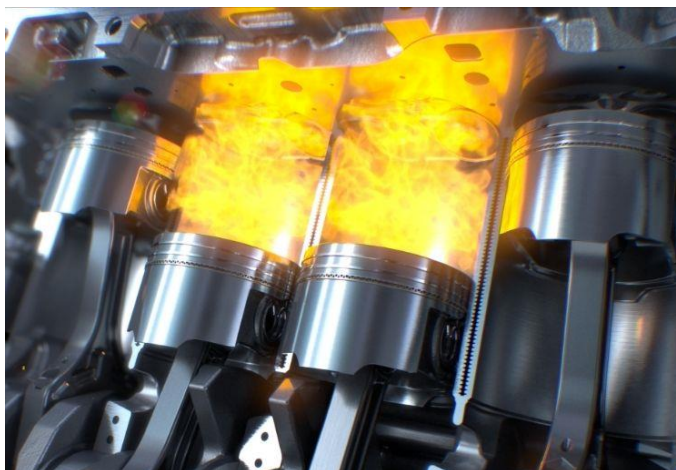


Figura 2-3 Detalle cámara de combustión MCIA [10].

2.1.2 Turbina de gas

Aunque a principios del siglo XX ya se reconocía la turbina de gas como una fuente de energía práctica, no fue hasta 1930 cuando debido a la inminente guerra en Europa, Inglaterra y Alemania invirtieron grandes esfuerzos en su desarrollo. Esta nueva máquina, aplicada inicialmente a aeronaves, ofrecía tremendas ventajas en términos de velocidad y rango de acción. Actualmente, el uso de las turbinas de gas se ha extendido también a los grandes barcos, especialmente los militares. Así como para su uso en plantas industriales para la obtención de energía eléctrica.

Este tipo de motor, convierte la energía térmica del combustible en energía mecánica, pero a diferencia de los MCIA, estas utilizan un flujo continuo de combustible. En este caso, la expansión de los gases resultantes de la combustión, tiene lugar a lo largo de una serie de rotores conectados a un eje (Figura 2-4), del que se obtiene la energía mecánica necesaria para impulsar el vehículo que lo porte [12].

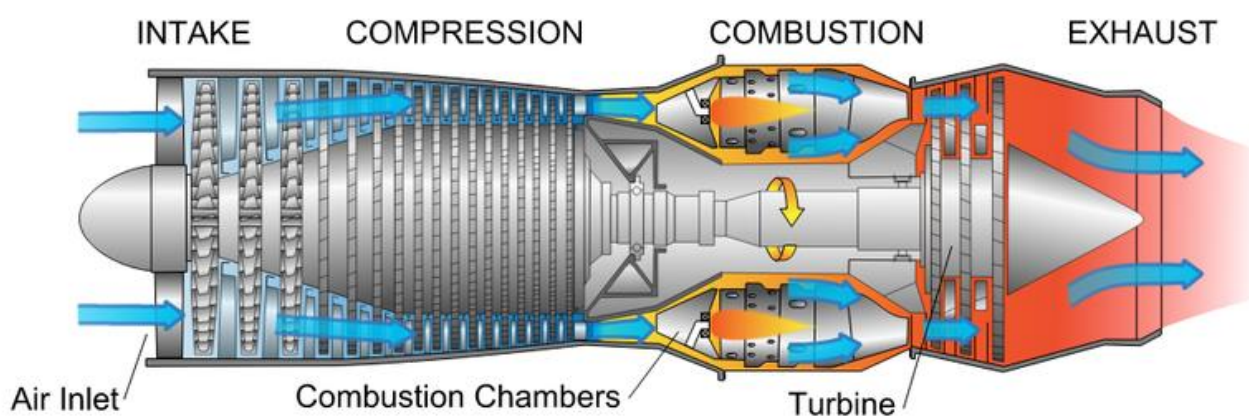


Figura 2-4 Turbina de gas utilizada para la propulsión marítima [5].

2.1.3 Propulsión eléctrica

El motor eléctrico obtiene la energía mecánica a través de la energía eléctrica. La implementación de una planta de propulsión eléctrica en un buque implica ciertas peculiaridades frente a otros tipos de propulsión. Es necesaria la implementación de generadores, cuadros de distribución y transformadores (entre otros) para el funcionamiento del sistema. En general, este tipo de propulsión es ampliamente utilizada en buques militares modernos, ya que produce menores emisiones de ruido al exterior, lo que los hace más discretos que los que equipan propulsiones basadas en motores de combustión o turbinas.

En buques, la energía eléctrica se obtiene de diferentes fuentes, como son las pilas de combustible o los sistemas diésel-eléctrico.

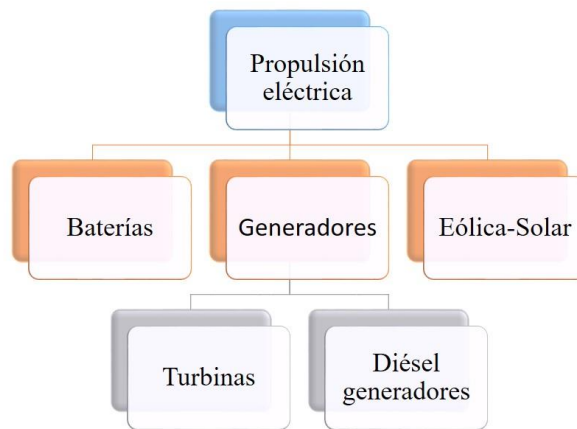


Figura 2-5 Propulsión eléctrica (autoría propia).

Por un lado, las pilas de combustible son elementos de naturaleza electroquímica. La ventaja de este tipo de dispositivos es que no depende de ningún tipo de proceso de combustión, sino que transforma directamente el combustible en energía eléctrica (Figura 2-6). Esta transformación tiene lugar gracias a un proceso de reducción-oxidación. En estas pilas el combustible puede ser, por ejemplo, el hidrógeno. La ventaja desde el punto de vista ambiental de este sistema, es que el único excedente que se desprende de esta reacción es el agua. Por lo tanto, esta tecnología proporciona energía limpia y eficiente [13].

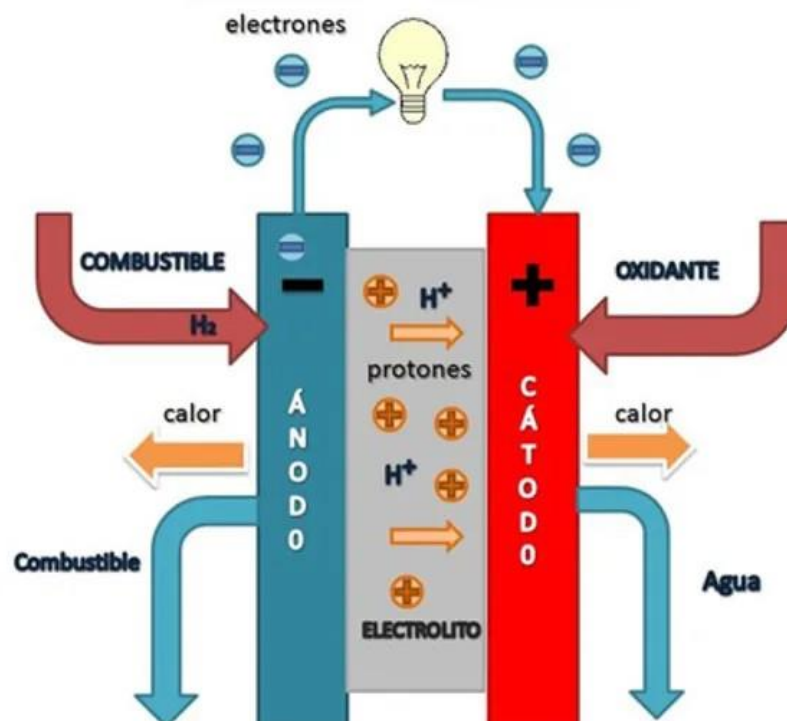


Figura 2-6 Pila de combustible de H_2 [14].

La industria militar utiliza este tipo de sistemas para submarinos, ya que aporta una enorme capacidad de permanencia en inmersión [15].



Figura 2-7 Sistema AIP Submarinos S-80 [16].

Sin embargo, el sistema diésel-eléctrico, no es completamente independiente de los motores de combustión. En este caso la electricidad es aportada por uno o varios motores diésel generadores. La electricidad aportada por estos es normalmente guardada en baterías. Este es el sistema usado por los Buques de Acción Marítima (BAM) de la Armada Española con una configuración “*Combined Diesel or Electric*” (CODOE) [17].

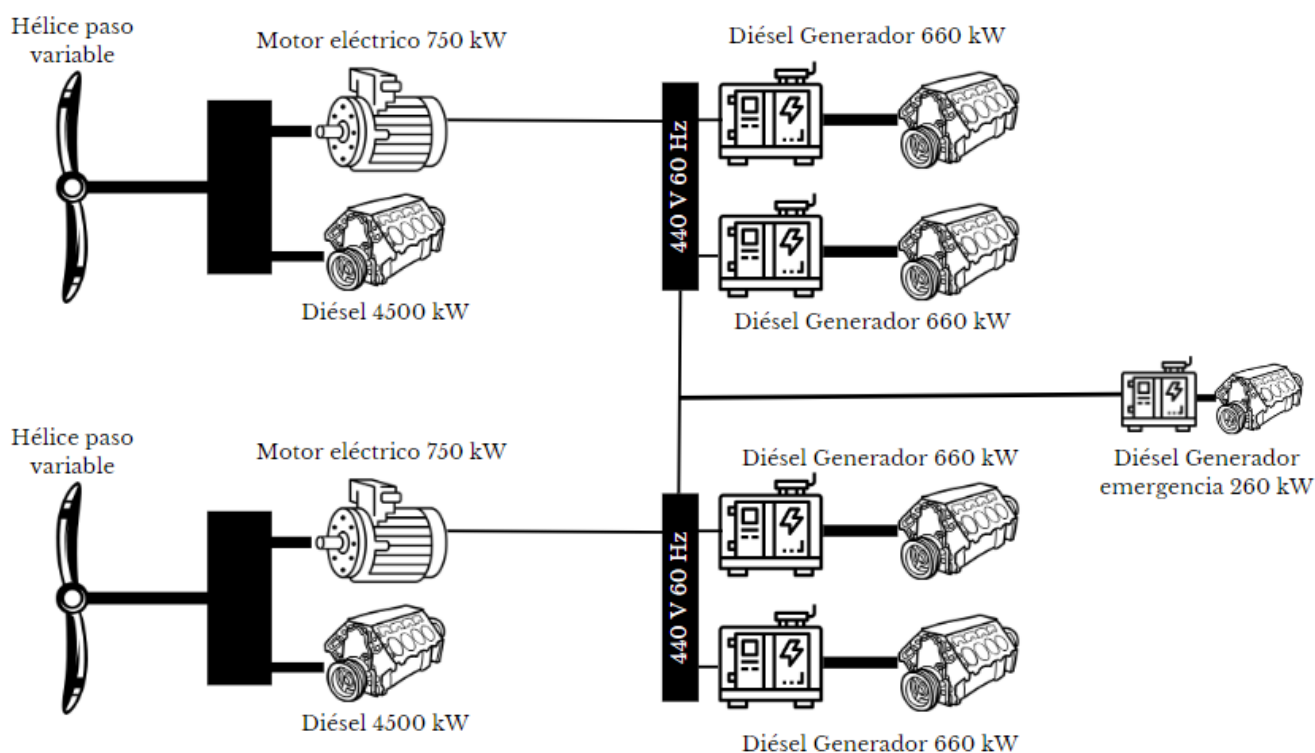


Figura 2-8 Esquema propulsión CODOE Buque de Acción Marítima (autoría propia basado en [17] y [18]).

2.1.4 Propulsión nuclear

En la década de 1950 se construye en Estados Unidos el primer submarino con propulsión nuclear. En sus pruebas de mar, el USS Nautilus batió todos los records relativos a tiempo de inmersión, velocidad y distancia en inmersión establecidos hasta la fecha por otros submarinos de propulsión convencional.

De hecho, salvo por motivos logísticos, cualquier buque equipado con propulsión nuclear podría estar navegando *infinitamente* [19].

El zenit del sistema es el reactor nuclear, que, mediante la fisión nuclear, libera una enorme cantidad de energía térmica. Esta energía térmica calienta un circuito de agua, creando así vapor de agua que, en el siguiente paso del proceso, se dirige a una turbina. En algunos buques, la turbina proporciona directamente la energía mecánica necesaria para el movimiento del eje. Mientras que, en otros, esta va conectada a un generador eléctrico, siendo este tipo de propulsión otra variante de la propulsión eléctrica.

Los reactores que utilizan los buques son de agua a presión, y suelen usar como combustible una aleación metálica Zirconio-Uranio. La vida estimada de la quema de una barra de dicho combustible, puede durar más de 10 años [20].

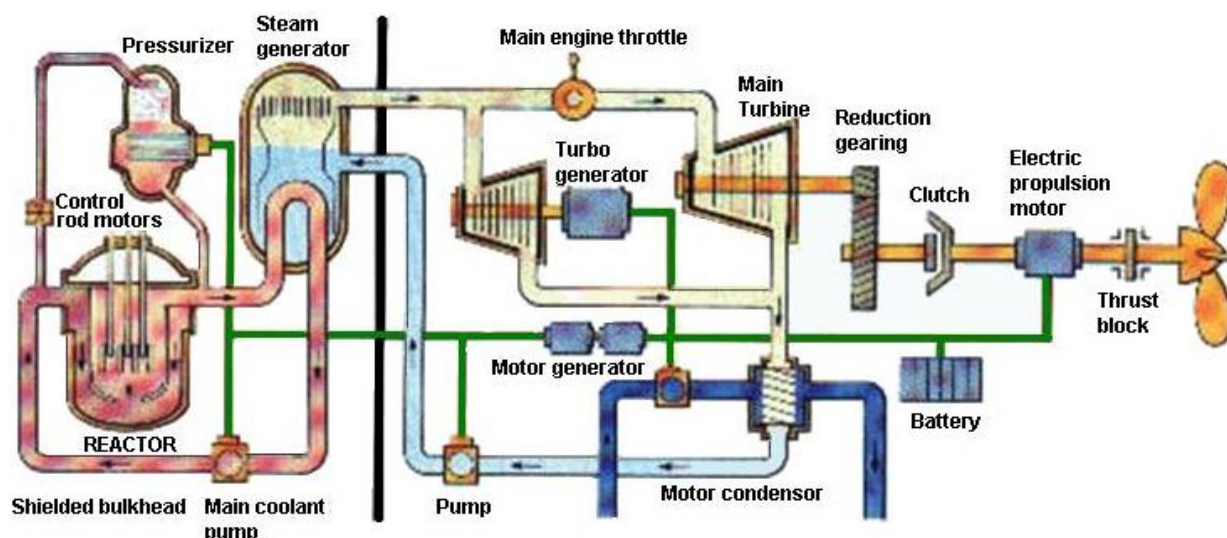


Figura 2-9 Esquema reactor de agua a presión [21].

2.2 Combustibles fósiles

2.2.1 Carbón

La aparición de las primeras máquinas de vapor en la Revolución Industrial trajo consigo un extraordinario aumento de la productividad de las fábricas de la época ya que estas podían trabajar ininterrumpidamente. Con este gran avance tecnológico, también aumentó exponencialmente la demanda de energía. Para satisfacer esta mayúscula demanda, en 1870 Inglaterra producía cien millones de toneladas de carbón al año para su combustión en dichas fábricas [6].

En la actualidad, si bien en España la producción de electricidad mediante combustión de carbón no supera el 2% [23], es el segundo combustible más utilizado en las plantas térmicas europeas, solamente por detrás del gas natural (Figura 2-10). Esto, ligado al mayúsculo potencial contaminante de los residuos que se desprenden de la quema de carbón, resulta en que prácticamente un cuarto de los GEI emitidos sea debido al uso de este combustible (Figura 2-10e).

Aun así, por su relativamente bajo coste y gran disponibilidad, el carbón sigue siendo una de las principales fuentes de energía de numerosos países, sobre todo en las zonas menos desarrolladas del planeta.

Desde el punto de vista marítimo, a día de hoy el uso del carbón como combustible para buques está superado, siendo este sustituido por otros líquidos o gaseosos, logísticamente más manejables y operables mediante sistemas automáticos.

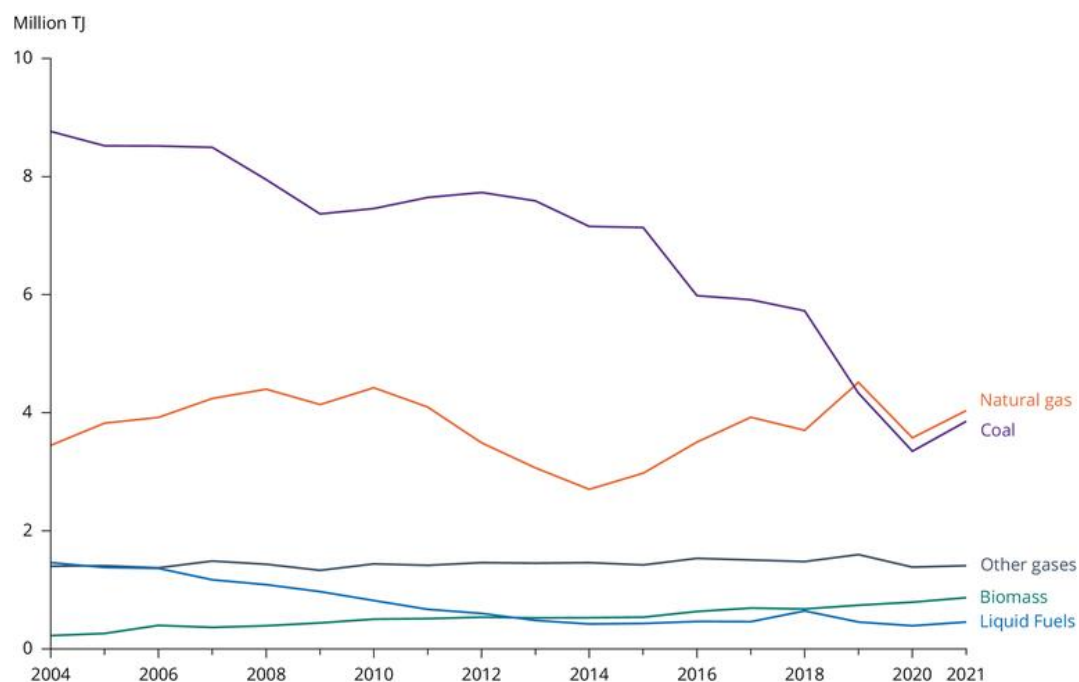


Figura 2-10 Consumo de combustibles por tipo en la UE [22].

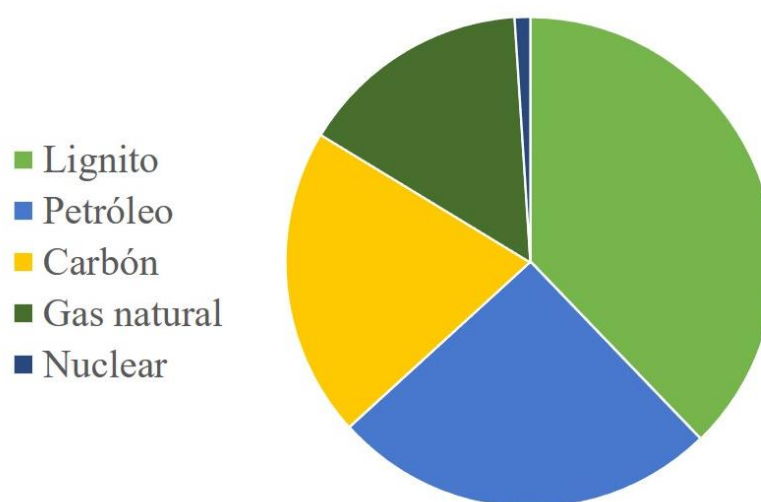


Figura 2-11 GEI emitidos por tipo de combustible (autoría propia basado en [24]).

2.2.2 Petróleo y sus derivados

El petróleo ha sido el motor de nuestra sociedad desde el inicio de la construcción en masa de automóviles. Es a día de hoy, el recurso natural más importante para la humanidad en el ámbito energético (Figura 2-12). Hasta el punto que, la tenencia o no de bolsas de petróleo puede influir categóricamente en la importancia geopolítica y fortaleza económica de un país, en definitiva, de su posición internacional [25]. Así mismo, es un recurso militarmente indispensable, que marca categóricamente las capacidades militares de una nación.

En la historia reciente, numerosas guerras se han iniciado con el *casus belli*, más o menos explícito, de las fuentes y reservas petrolíferas de un país anheladas por otro, sobre todo en el medio oriente. Véase por ejemplo las guerras del golfo de los años noventa [26], o la invasión de Irak por parte Estados Unidos en 2003.

2.2.2.1 Gasolina

La gasolina es utilizada principalmente por turismos y motocicletas, en motores MCIA con encendido por ignición. Los distintos tipos de gasolinas están definidos por su octanaje, siendo mayor la relación de compresión cuanto mayor sea el este [27]. Esta se obtiene mediante procedimientos de refinado del petróleo y mezcla con naftas [28].

2.2.2.2 Diésel

Son mezclas de hidrocarburos empleadas como combustible en MCIA de encendido por compresión. Este combustible, no se clasifica por su octanaje sino por su índice de cetano. Tiene mayor rendimiento energético que la gasolina y los motores que lo utilizan, tienen mayor par. Esto hace a este combustible ser ideal para aplicaciones con un alto requerimiento de par, como la maquinaria industrial o buques y embarcaciones de menor porte.

El diésel utilizado por estos últimos (*Diesel Fuel Marine*), tiene además en su composición, diversos aditivos adicionales para mejorar el rendimiento y hacerlo más resistente a la contaminación por agua, requisito esencial al ir normalmente almacenados en tanques por debajo de la línea de flotación del buque [29].

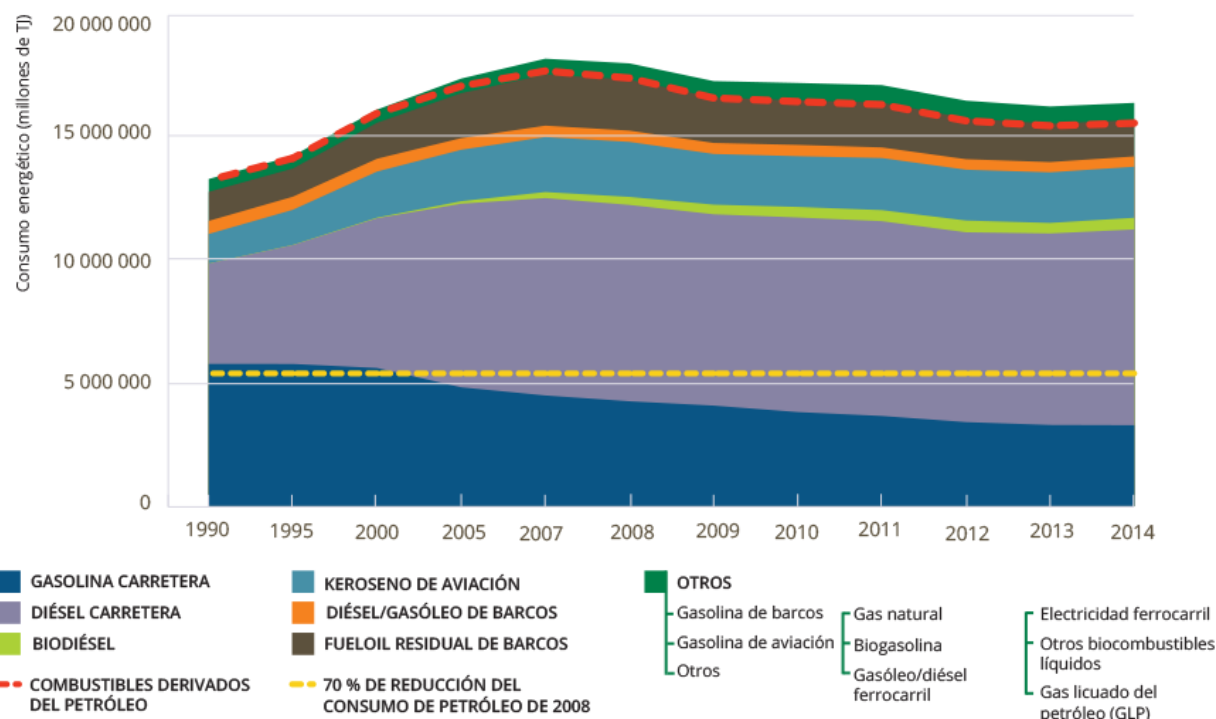


Figura 2-12 Consumo de energía según tipo de combustible [30].

2.2.2.3 Gas licuado del petróleo (GLP)

Es GLP es una mezcla de propano y butano, del cual un 45% se obtiene del refinado del petróleo mientras que el restante 55% se obtiene del refinamiento de gas natural. Este tipo de combustible emite aproximadamente un 20% menos de emisiones de GEI que el diésel o la gasolina. Es por esto que, unido a las cada vez más restrictivas políticas medioambientales en occidente, muchas empresas del sector de la automoción han desarrollado motores que operen con GLP. Los motores de gasolina ya existentes, pueden también funcionar con este combustible simplemente implementando un segundo depósito para el GLP [31].

2.2.2.4 Queroseno

Es un producto del refinado del petróleo, de mayor octanaje que la gasolina, principalmente utilizado como combustible para aviación. Se compone de parafinas y naftenos. Pese a ser menos volátil que la gasolina, al igual que el diésel, su manipulación se debe de realizar con precaución, ya que sus vapores son altamente combustibles al mezclarse con el aire [32].

2.3 Combustibles sostenibles

2.3.1 Biodiesel o e-diésel

El biodiesel es un combustible producido a partir de grasas o aceites vegetales. Este puede funcionar en cualquier motor diésel convencional, con la particularidad de que su uso reduce las emisiones de CO₂. Sin embargo, aún queda camino de investigación para que sea una alternativa viable para reemplazar íntegramente el empleo de combustibles fósiles. Entre otros problemas, como la mayoría de combustibles alternativos, su capacidad energética es considerablemente menor a la del diésel [33].

Por otro lado, el e-diésel consiste en una mezcla de diésel con etanol aproximadamente al 15% de concentración en volumen de este último. Si bien este combustible reduciría las emisiones contaminantes, no tiene muy buenas cualidades comparado con el diésel. La adición de etanol al diésel tiene como consecuencia ligada la reducción de capacidad lubricadora de este. Además tiene un nivel de cetano muy bajo, por lo que la utilización de aditivos resulta necesaria [34].

2.3.2 Hidrógeno

El uso del hidrógeno como combustible puede emplearse bien en sistemas propulsores basados en motores de combustión interna, o bien en pilas de combustible. Este presenta numerosas ventajas frente al uso de los combustibles fósiles habituales. Mientras que los combustibles habituales liberan CO₂ a la atmósfera durante su combustión, la del hidrógeno solo da lugar a un subproducto de agua (Figura 2-13). Por otro lado, es importante tener en cuenta que las reservas de combustibles fósiles tienen una cantidad limitada de estos, luego es previsible que en algún momento se agoten este tipo de recursos. Sin embargo, el hidrógeno se puede obtener sin restricciones, pues es el elemento más abundante en el universo [35].



Figura 2-13 Combustión del hidrógeno [36].

Es posible obtener hidrógeno puro de varias maneras, siendo las técnicas más utilizadas los procesos termoquímicos como la gasificación de carbón o de biomasa, el reformado del gas natural y la electrolisis del agua (ver Figura 2-14) [37]. Si bien los métodos de gasificación son de alto aprovechamiento energético puesto que emplea un residuo, estos siguen emitiendo CO₂ a la atmósfera, además de provocar corrosión en las tuberías. Por ello, la opción más interesante para obtener hidrógeno es a partir de la electrolisis, proceso que disocia el agua en oxígeno e hidrógeno. Para que este proceso sea completamente limpio, la energía necesaria para la rotura de la molécula de agua ha de tener origen completamente renovable [35], obteniéndose así el llamado “hidrógeno verde”. De lo contrario, se clasificará como “gris” si proviene de combustibles fósiles o gas natural (su producción emite CO₂); o “azul” si deriva de estos últimos, pero incorporando al proceso sistemas de captura de carbono, lo que ayuda a reducir la emisión a la atmósfera de GEI.

Lo que dificulta que el hidrógeno sea considerado como la mejor opción para sustituir a los combustibles fósiles es la dificultad para su almacenamiento y transporte. Su densidad, en condiciones normales, es sumamente baja: $0,09\text{kg/m}^3$, al igual que su viscosidad. Esto implica que conseguir absoluto hermetismo en un tanque de hidrógeno es enormemente complicado, puesto que las moléculas de H_2 tienden a escaparse de este por cualquier junta o poro, por mínimo que sea. Se plantean entonces tres alternativas para lidiar con este problema: la compresión entre, criogenizarlo hasta los -253°C o bien el empleo de hidruros recargables [38].

El almacenamiento en tanques a presión, requiere que dichos receptáculos tengan grandes capacidades de resistencia a largo plazo de numerosas recargas a presión además de un alto grado de seguridad, por las presiones de entre 300 y 750 bares que llegan a alcanzarse en su interior [3].

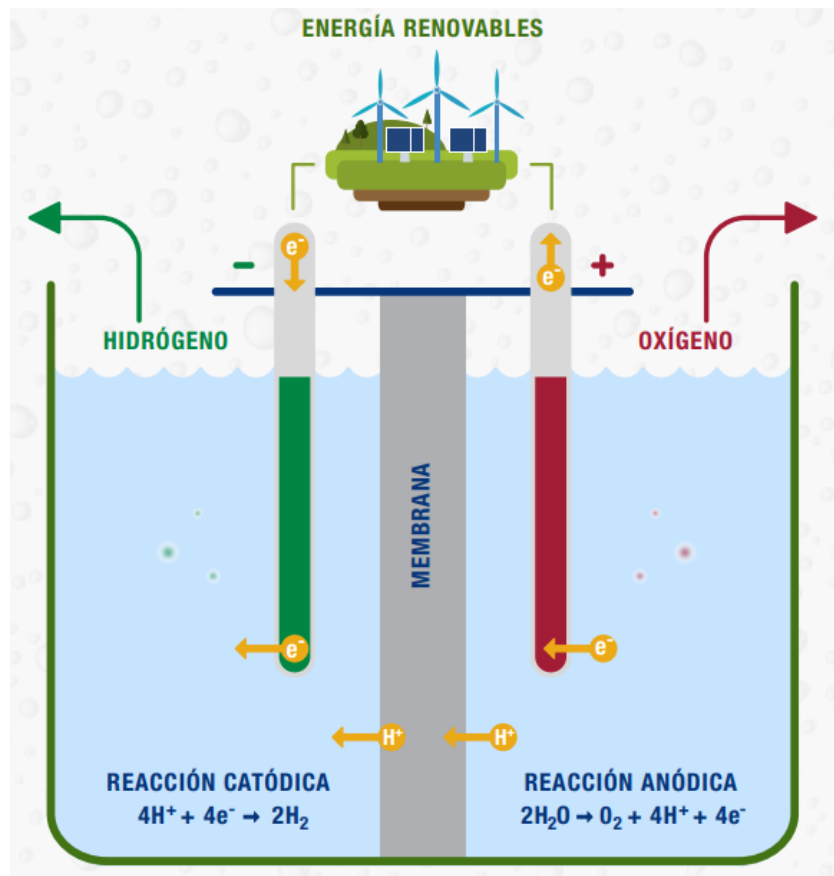


Figura 2-14 Esquema de obtención del hidrógeno verde [39].

El método más utilizado por los buques que operan con hidrógeno es el transporte del mismo en estado líquido. Cuando se criogeniza, el hidrógeno licuado presenta la ventaja de tener una mayor densidad energética por unidad de volumen que cuando este está en estado gaseoso. Sin embargo, durante el licuado, se pierde hasta un 40% de la energía. Sumado a esto, cuando se deja el hidrógeno líquido durante largos periodos dentro del correspondiente depósito, se producen importantes pérdidas por evaporación [38].

Entre todos los mencionados, el más importante es el problema del volumen que este ocupa. Para un mismo requerimiento de energía, un buque puede ver reducida su capacidad de carga hasta la mitad [3]. El impacto de este problema afecta directamente a la competitividad del negocio que desarrolle el buque, sea cual sea su sector.

2.3.3 Gas natural licuado (GNL)

El gas natural licuado viene siendo durante años un prometedor combustible alternativo para la propulsión marina. Esta tecnología, frente a otras, ahorra la necesidad de invertir en costosos equipos de

tratamiento para los gases de escape [40]. Este no es más que gas natural con una composición del 98% en metano. Su combustión emite bajas cantidades de CO_2 y NO_x (ver Figura 2-16). Cuando se criogeniza a -160° reduce su volumen un 600%, facilitando así su transporte. Este proceso de licuefacción exige una gran inversión inicial para la construcción de un buque metanero.

El transporte de GNL por vía marítima se hace en los buques “metaneros”, mientras que el gas natural en estado gaseoso transita por gaseoductos. Pese a reducir su volumen, es necesario hasta un 50% más de espacio para su almacenamiento en buques que para uno con propulsión convencional, debido a su baja capacidad energética en comparación con el diésel. Estos buques tienen principalmente dos configuraciones: Diseño esférico autosostenido (MOSS) con depósitos independientes y diseño de membrana, que utilizan la estructura del propio barco para el almacenamiento de GNL (ver Figura 2-15). Los metaneros utilizan el propio gas para su propulsión, resultando en un consumo de entre un 0,15% y 0,30% diariamente [41].

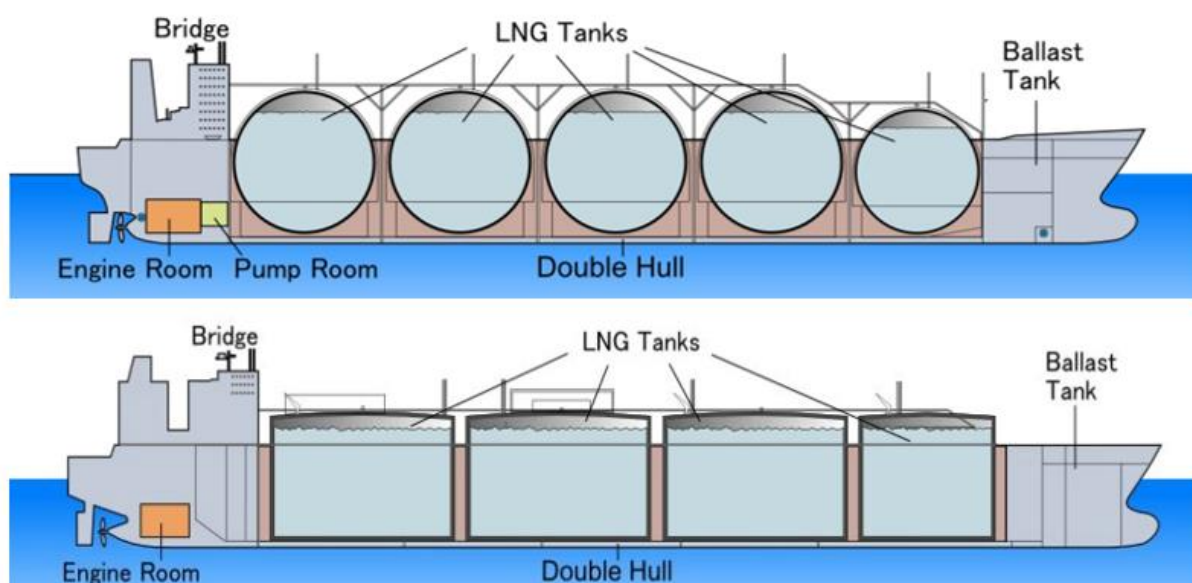


Figura 2-15 Buques con diseño MOSS (arriba) y de membrana (abajo) [41].

Para el manejo de GNL se requieren complejas estructuras para mantener la temperatura a la que el este gas se encuentra licuado. Aun así, es complicado garantizar que, durante el transporte, manipulación o incluso durante la combustión, no existan fugas de este, lo que supone un riesgo adicional.

Existen alternativas intermedias como el motor dual-fuel. Este funciona con hasta un 80% de GNL y un 20% de diésel, pudiendo llegar a usarse con el 100% de DFM. Estos motores no reducen tanto la liberación de CO_2 , sino los SO_x (100%) y NO_x (85%) (Figura 2-16).

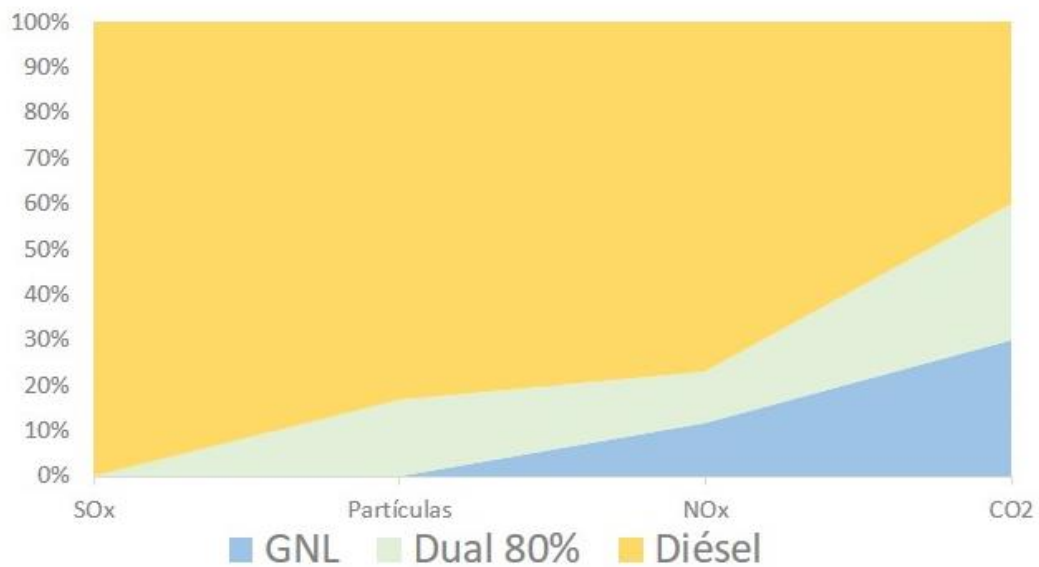


Figura 2-16 % de emisiones GNL frente a diésel (autoría propia basado en [41] y [42]).

2.3.4 Biometano y e-metano

Son combustibles energéticamente muy similares al GNL, por tanto, pueden utilizarse en buques que operen con GNL. Lo cual resulta beneficioso en la transición hacia la completa independencia de combustibles fósiles. Un importante problema cuando hablamos del biometano, es que, si se pretende obtener de residuos orgánicos, es prácticamente imposible alcanzar el mínimo necesario para que pueda llegar a ser un sustituto de los combustibles fósiles. Por otro lado, si se obtiene la materia prima de cultivos destinados particularmente a ello, surgen algunos problemas. El más destacable es que estos cultivos necesitan labrarse con maquinaria convencional que emite CO₂, por lo tanto, no es un proceso inocuo.

Por su parte, el e-metano o diésel sintético necesita carbono, el cual normalmente se captura de la atmósfera. Este proceso es muy demandante energéticamente, por lo tanto, en caso de que la energía necesaria para llevarlo a cabo no se obtenga de fuentes renovables, no es una alternativa eficiente en términos ecológicos ni económicos [43], [3].

2.3.5 Metanol

El metanol es un combustible líquido en condiciones normales, por lo que resulta interesante respecto de otras alternativas puesto que su transporte y almacenamiento es sencillo. Sumado a esto, actualmente se encuentran ya operando en los buques, motores dual fuel que usan metanol como combustible. Para surtir a estos buques de metanol, ya existen redes de logística a nivel mundial de distribución de este. En definitiva, el metanol utilizado como combustible marítimo hace uso de una tecnología bien conocida y explotada durante los últimos años.

Actualmente el proceso de obtención más típico del metanol sigue el proceso descrito en la Figura 2-17. Para hacer del metanol una alternativa completamente respetuosa con el medio ambiente, resulta necesario obtener este de fuentes que así lo sean. Esto implicaría realizar una serie de cambios en el método de operación actual, pasándose a obtener este directamente de hidrógeno verde (ver apartado 2.3.1.)

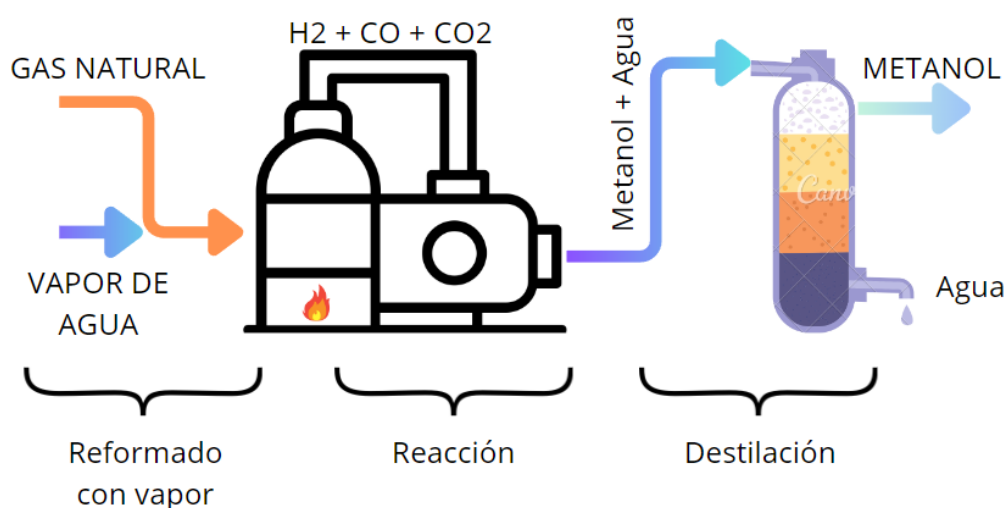


Figura 2-17 Proceso de obtención de metanol (autoría propia basado en [3]).

Para la consecución del metanol, es necesario contar con carbono, normalmente capturado de la atmósfera. Este proceso de captura de carbono es complejo y costoso. Otra desventaja de este, es que es tóxico e inflamable. Además, tiene la mitad de poder energético que el DFM habitual. Esto implica, como ocurría con el hidrógeno, restar espacio de carga al buque para destinarlo a tanques de metanol, reduciendo así la rentabilidad operacional del propio buque [3].

2.3.6 Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos que derivan de materias orgánicas. Por ejemplo, se pueden obtener a través de biomasa o incluso residuos orgánicos. Se consideran como combustibles con cero emisiones netas, puesto que se estima que el CO_2 que se desprende durante todo el proceso de obtención de este combustible, es igual o incluso inferior al que puede llegar a absorber la materia prima de la que se obtienen estos biocombustibles antes de su transformación [44]. Para que realmente estos combustibles sean completamente inocuos para el medio ambiente, la energía utilizada para su obtención debe provenir de fuentes renovables.

Están clasificados en tres *generaciones* diferentes, las cuales se indican en la Tabla 2-1, según el tipo de materia prima utilizada para su obtención. Los de primera generación, logran bioetanol a partir de maíz o caña de azúcar. Estos tienen como desventaja o peligro que, al utilizar alimentos como materia prima, puede provocar la subida de precio de estos recursos para el consumo genera. Los de segunda generación son obtenidos de biomasa lignocelulósicas, de gran disponibilidad y bajo precio. Si bien los biocombustibles de segunda generación son más ecológicos, su producción es más costosa. Los de tercera generación surgen para intentar paliar las desventajas de las anteriores generaciones. Estos últimos se obtienen a través de micro o macroalgas fermentadas. El uso de algas para la obtención de combustibles tiene como ventaja, entre otras, que no es necesario un pretratamiento de estas ya que son fermentables directamente. Además, pueden cultivarse en lugares no destinados a la alimentación humana [45].

Existen diferentes tipos de procesos para la conversión de la materia prima en biocombustibles: procesos catalíticos, termoquímicos y puramente biológicos. Por su parte, a través de procesos catalíticos se consigue biodiesel gracias a un proceso químico llamado transesterificación, producción de novedosos tipos de combustibles mediante tecnologías de aprovechamiento y explotación de CO_2 [46], [47].

Generación	Materia prima
Primera generación	Maíz, caña de azúcar, trigo
Segunda generación	Biomasa lignocelulósica
Tercera generación	Algas

Tabla 2-1 Generaciones de biocombustibles (autoría propia basada en [45]).

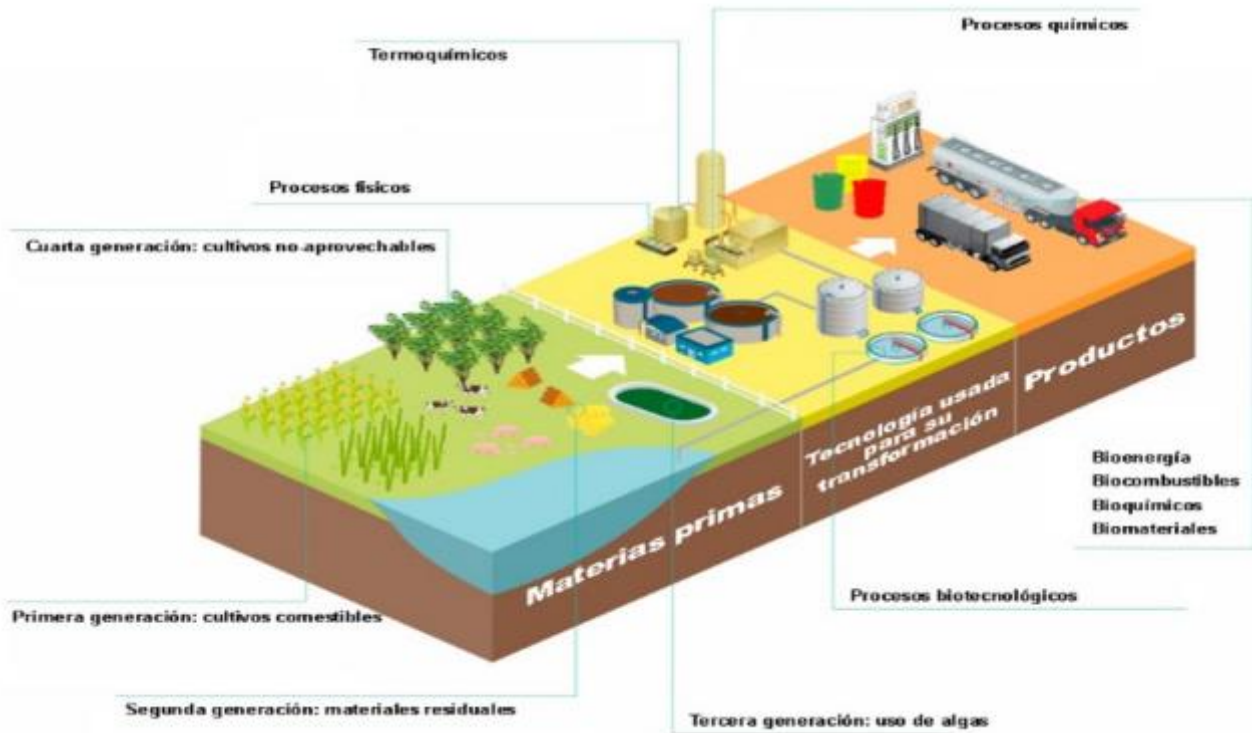


Figura 2-18 Diagrama de producción de una biorrefinería [46].

Los procesos termoquímicos conllevan otros intermedios de combustión, gasificación, pirolisis y licuefacción. Se usan principalmente para obtener gasolina, diésel, metanol y queroseno. La viabilidad de las plantas que llevan a cabo estas transformaciones, están supeditadas a la economía de escala. Por lo tanto, es esencial el desarrollo de reactores que consigan niveles de conversión más elevados, en definitiva, más eficientes [46].

2.3.7 Amoniaco

El amoniaco es un combustible eminentemente limpio, puesto que no contiene carbono, ni necesita de él para su obtención. Por lo tanto, durante su combustión no se libera CO₂, principal culpable del efecto invernadero. Su fabricación es bastante sencilla a partir de un proceso de síntesis de hidrógeno renovable [3].

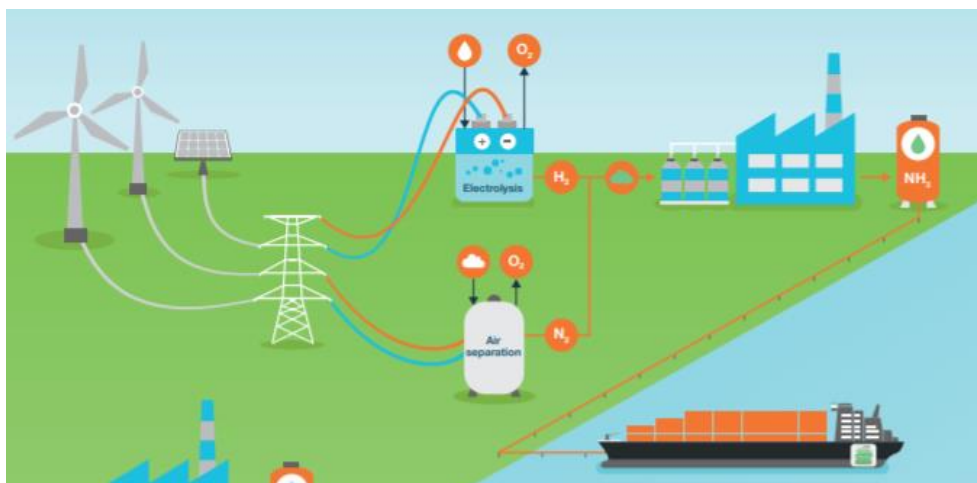


Figura 2-19 Diagrama esquemático producción de amoníaco [48].

Si bien no es líquido a temperatura ambiente, si lo es a partir de -35°C , con lo cual su almacenamiento y transporte no resulta tecnológicamente complicado. Según *Global Maritime Forum*, hacia 2026 los buques con propulsión mediante amoníaco podrían considerarse una idea “ambiciosa pero factible”. Aunque a día de hoy aún no se ha elaborado una reglamentación para el uso de amoníaco como combustible marítimo.

Un factor negativo del amoníaco es, como es habitual en el resto de combustibles renovables, su baja capacidad calorífica. Además de esto, si bien no se emite CO_2 , su combustión desprende N_2O , muy perjudicial para el medio ambiente. Este problema puede solucionarse mediante catalizadores en los escapes, hecho que aunque es tecnológicamente asequible, encarecería la fabricación de estos sistemas [49].



Figura 2-20 Potencial diseño de buque propulsado por amoníaco [50].

2.3.8 Resumen de características de diferentes combustibles renovables

Propiedad	Diésel	Hidrógeno	Metanol	Amoniaco
Densidad [kg/m^3]	857	0,0838	798	674
Contenido de carbono [% en masa]	86,88	0	37,49	0
Capacidad calorífica [MJ/kg]	42,50	119,90	20,10	18,80
Temperatura de autoignición [$^{\circ}\text{C}$]	55,00	584,55	11	651
Temperatura de llama [$^{\circ}\text{C}$]	2054	2045	1890	1800

Tabla 2-2 Resumen características de diferentes combustibles (autoría propia basado en).

2.4 HyMethShip

HyMethShip se refiere a una nueva tecnología, todavía en fases de desarrollo, basada en un ciclo cerrado de carbono con e-metanol e hidrógeno. El electro-metanol se obtiene mediante CO_2 capturado directamente de la atmósfera e hidrógeno obtenido por electrolisis del agua. Este se almacena en el barco hasta ser utilizado, ya sea para almacenarlo más tarde en instalaciones portuarias, bunkering o para el uso dentro del propio barco.

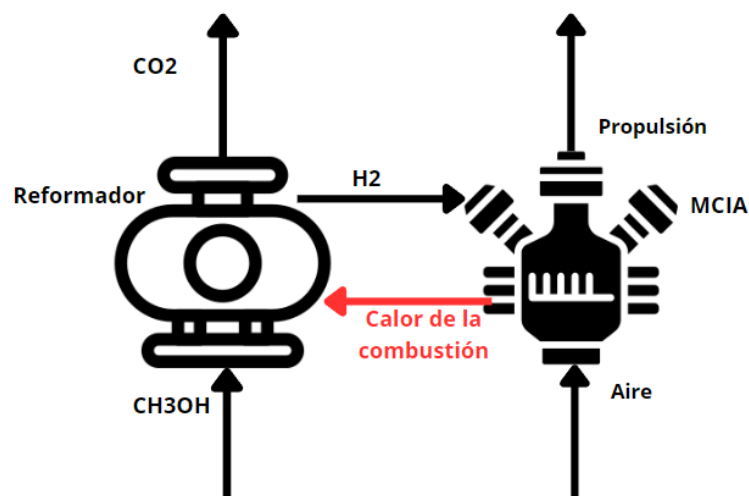


Figura 2-21 Diagrama esquemático ciclo cerrado (autoría propia basado en [51]).

Para su uso a bordo, se hace pasar el e-metanol (CH_3OH) por un reformador, que lo vuelve a separar en CO_2 que será reutilizado de nuevo a bordo para producir más e-metanol (ciclo cerrado, ver Figura 2-21) y H_2 para ser utilizado como combustible principal. Antes de volver a almacenar el CO_2 es necesario enfriarlo para su licuefacción. Así este último CO_2 reciclado sustituye casi por completo al obtenido de la atmósfera. El calor necesario para la reacción endotérmica que tiene lugar en el reformador, es proporcionado por el calor residual que desprende el motor durante su combustión. Recapitulando, el HyMethShip es un sistema de enorme eficiencia [51].

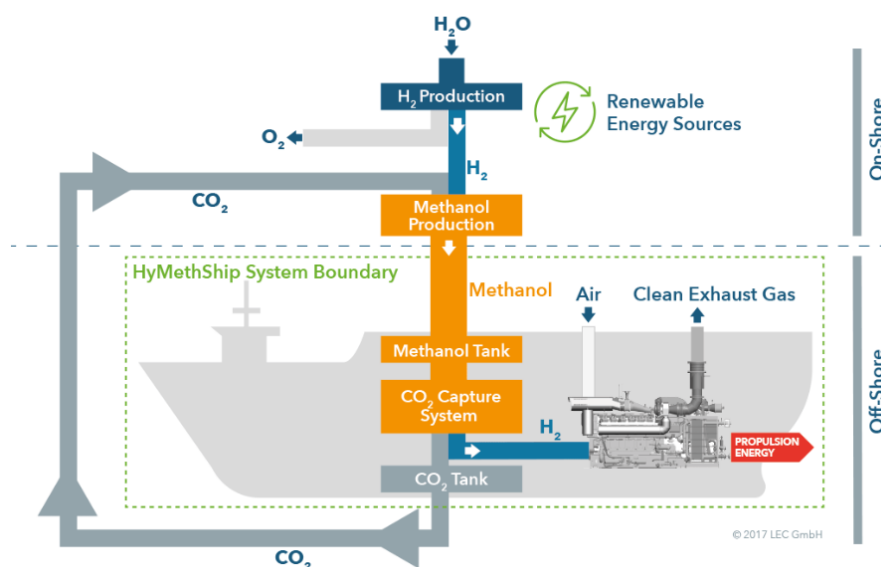


Figura 2-22 Esquema HyMethShip [52].

2.5 Bunkering

El *bunkering* hace referencia al proceso de repostaje de un buque. Es un proceso relativamente complejo que se puede llevar a cabo con el buque atracado en puerto, fondeado en las proximidades de este o bien en alta mar. La norma que regula estas operaciones es la ISO 20519 de 2017 [53], que fija unos criterios de seguridad así como medioambientales.

Aunque el combustible más comúnmente utilizado en estas operaciones es el GNL, cada vez es más habitual la utilización de otros combustibles renovables como el amoniaco o el biogás licuado. El repostaje se puede hacer mediante tres técnicas diferentes reflejadas en la Tabla 2-3 [54], [55].

Tipo de bunkering	Descripción
Pipe to Ship (PTS)	Combustible suministrado en terminal portuaria
Ship to Ship (STS)	Combustible proporcionado por otro buque. Normalmente de tipo gabarra
Truck to Ship (TTS)	Repostaje desde camiones en el muelle

Tabla 2-3 Tipos de *bunkering* (autoría propia).

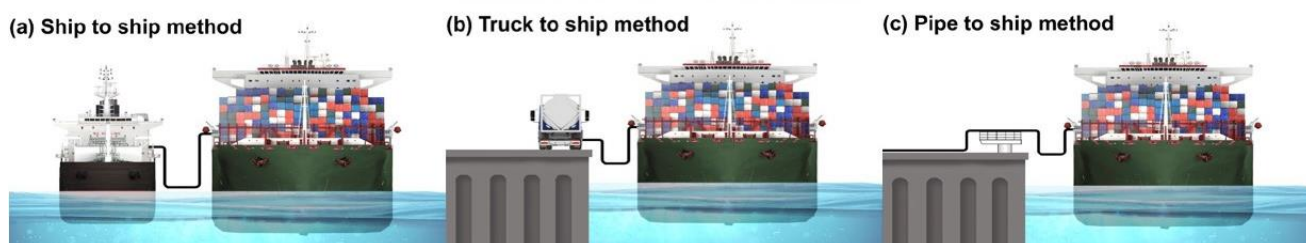


Figura 2-23 Tipos de *bunkering* [56].

2.6 Normativa: Convenio MARPOL

MARPOL es el principal convenio de alcance internacional para prevenir la contaminación causada por los buques. Fue redactado tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo, 1972) [57]. Si bien este fue adoptado en 1973, el Comité de Protección del Medio Marítimo (CPMM) decide formular el nuevo protocolo de 1978 tras una serie de accidentes marítimos en los años 1976 y 1977. MARPOL entró finalmente en vigor en 1983, y más tarde, en 1997 fue modificado añadiendo un sexto Anexo a los cinco que ya lo conformaban, aunque éste último no entraría en vigor hasta 2005. El Convenio tiene como objetivo reducir lo máximo posible la contaminación producida por los buques sea cual sea su porte o actividad [58].

ANEXO	Fuente contaminante	Última modificación
ANEXO I	Hidrocarburos	2003
ANEXO II	Sustancias nocivas líquidas a granel	1983
ANEXO III	Sustancias perjudiciales transportadas en bultos	1992
ANEXO IV	Aguas sucias	2003
ANEXO V	Basuras de los buques	1988
ANEXO VI	Contaminación atmosférica	2005

Tabla 2-4 Anexos Convenio MARPOL (autoría propia basada en [58]).

MARPOL también establece ciertas áreas designadas como “Áreas Marítimas Especialmente Sensibles” (PSSA, por sus siglas en inglés), en las cuales se aplican normas más estrictas para la protección del medio ambiente marino. La OMI es la entidad encargada de administrar y actualizar el convenio, mientras que los Estados miembros de esta adoptan sus disposiciones a nivel nacional.

2.6.1 Anexo VI

El Anexo VI del convenio MARPOL, ratificado en 1997 y modificado en sucesivas ocasiones, se centra en la reducción de las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Este anexo establece un límite máximo permitido para las emisiones de estos gases dependiendo de la localización geográfica. Dichos límites han sido revisados y ajustados a lo largo del tiempo para garantizar una reducción continua de las emisiones [59].

Las “Prescripciones para el control de las emisiones de los buques” se dictan en las reglas 12, 13 y 14 como se indica en la Tabla 2-5

Regla	Contenido
12	Sustancias que desgastan la capa de ozono
13	Óxidos de nitrógeno (NO _x) → Limita emisiones en función de la potencia y velocidad
14	Óxidos de azufre (SO _x) → Limita emisiones según área geográfica

Tabla 2-5 Reglas más características sobre el control de emisiones en el Convenio MARPOL (autoría propia).

2.6.1.1 Zonas de Control de Emisiones

En este anexo se designan Áreas de Control de Emisiones (ECAs por sus siglas en inglés), donde se aplican límites más estrictos en cuanto a emisiones provenientes de los buques, teniendo en cuenta

también las partículas en suspensión. Estas áreas se establecen con objeto de reducir la contaminación del aire, proteger ecosistemas marinos sensibles y mejorar la calidad del aire en zonas costeras altamente pobladas. Actualmente existen ECAs en: el Mar Báltico, Mar del Norte, Mar de la Mancha y costa de América del Norte, entre otras (ver Figura 2-24) [60].

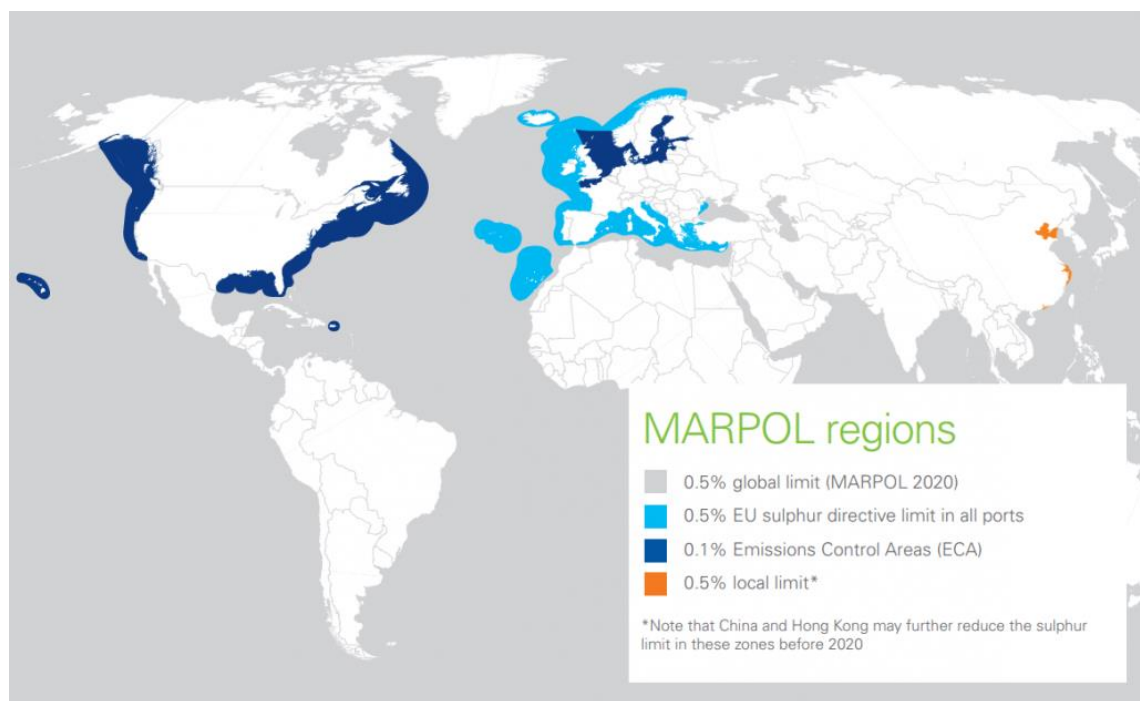


Figura 2-24 Zonas de Control de emisiones [61].

Los buques que navegan dentro de estas ECAs deben cumplir con rigurosos estándares en términos de contenido de azufre en los combustibles utilizados. Esto impulsa la utilización de tecnologías de reducción de emisiones, por ejemplo, sistemas catalíticos; pero lo más importante: promueve la utilización de combustibles renovables con menores emisiones que los de origen fósil. La implementación de estas se ha llevado a cabo, y se llevará en ocasiones futuras, de una manera gradual y siempre definiendo fechas concretas para la activación de estas áreas. De esta manera se permite a la industria marítima y a las autoridades pertinentes ajustarse paulatinamente a estas nuevas regulaciones.

2.6.1.2 OMI 2020

La OMI 2020 es una implementación de la Organización Marítima Internacional que entró en vigor el 1 de enero de 2020. Esta nueva regulación complementa al Anexo VI de MARPOL y tiene como objetivo reducir las emisiones de óxidos de azufre (SO_x).

En ella se establece un límite para el contenido de azufre en el combustible utilizado por los buques a nivel mundial. Anteriormente a la OMI 2020 este límite estaba establecido en el 3.5% en masa, pasando tras su ratificación a ser de 0.5%. Esta reducción en las emisiones de azufre a la atmósfera no es beneficiosa únicamente para el ambiente marítimo sino también para prevenir la acidificación y la lluvia ácida, siendo esto esencial para la salubridad de los cultivos [62].

La implementación de la OMI 2020 ha tenido considerable impacto económico y operativo en la industria marítima. Esto es en principal medida debido a los costos asociados a la compra de combustibles más limpios y a la instalación de tecnologías de mitigación de emisiones [63].

2.6.1.1 Área de control de emisiones de NO_x

Estas zonas regulan las emisiones de óxidos de nitrógeno mediante el establecimiento de tres niveles, llamados “Tiers”. Estas limitaciones se aplican a los motores construidos a partir del año 2000 y que tengan más de 130 kW.

TIER	A PARTIR DEL AÑO...	n < 130	LÍMITE NO _x [g/kWh] 130 ≤ n ≤ 2000	n ≥ 2000
TIER I	2000	17.0	$45.0 \times n^{0.20}$	9.6
TIER II	2011	14.4	$44.0 \times n^{0.23}$	7.7
TIER III	2016	3.4	$9.0 \times n^{0.20}$	1.96

Tabla 2-6 Niveles “Tiers” de regulación de emisiones de NO_x [64].

Como refleja la figura la Figura 2-25 Límite de NO_x emitido frente a revoluciones del motor [65]., la restricción marca por los Tier va aumentando con el paso del tiempo. Esto estimula a las empresas del sector marítimo a una transición hacia la adopción de tecnologías verdes y de combustibles sostenibles.

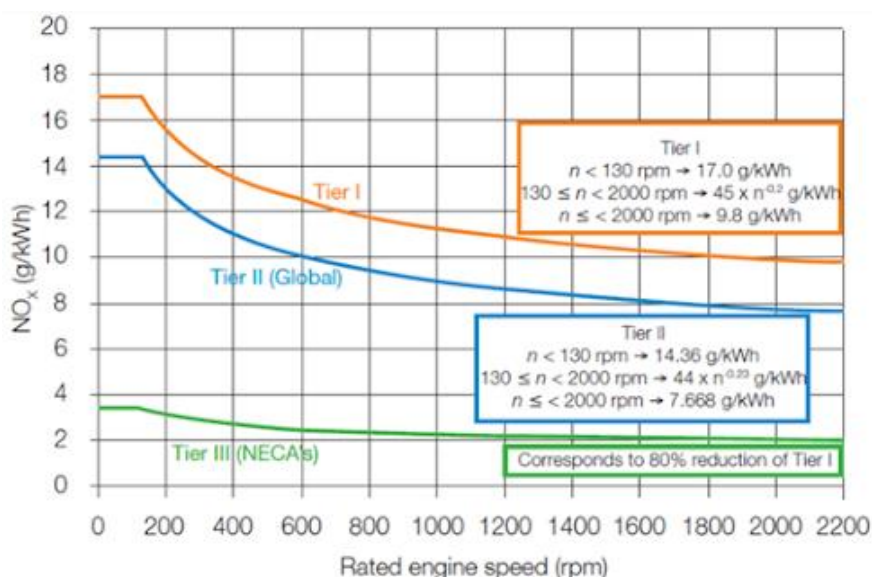


Figura 2-25 Límite de NO_x emitido frente a revoluciones del motor [65].

2.7 Proyectos en España

2.7.1 Maersk-Cepsa: Metanol verde

En diciembre del año 2023 tuvo lugar la 28ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en Dubai, también conocida como COP28. En el marco de estos eventos, casi 200 países mostraron su conformidad con la idea de la necesaria transición hacia un modelo energético independiente de los combustibles fósiles [66].



Figura 2-26 Logos corporativos de: Cepsa, Maersk y C2X [67]–[69].

La Compañía Española de Petróleos (Cepsa) sentó las bases de un proyecto energético con el gigante multinacional en el sector del transporte marítimo, Maersk, a través de su empresa C2X. Este proyecto pretende desarrollar una de las mayores plantas de metanol verde a nivel mundial en Huelva, marcando un objetivo de producción anual de 300.000 toneladas [68].

La elaboración de proyectos energéticos que proporcionen independencia de los combustibles de origen fósil es esencial para la autonomía estratégica de España [70]. El acuerdo entre estas dos empresas, hace patente el compromiso tanto del ejecutivo como del sector energético español con la transición hacia modelos energéticos sostenibles.

2.7.2 Hidrógeno verde

La eléctrica española Iberdrola se encuentra actualmente en proceso de construcción de dos grandes complejos de generación de hidrógeno verde para la producción de fertilizantes. Estas dos plantas estarán situadas en Palos de la Frontera (Huelva) y en Puertollano (Ciudad Real). Esta última se comenzó a operar en 2022, produciendo desde entonces más de 200.000 toneladas anuales [71].

Cepsa también es otro importante protagonista del sector del hidrógeno verde español. La petrolera encabeza el proyecto europeo del Valle andaluz del hidrógeno, y tiene como objetivo producir 400 MW para el año 2026 [72].

En la misma línea, Repsol, de la mano de otras empresas españolas, está embarcada en un proyecto de construcción de un electrolizador en Cartagena, que empezará a operar a una capacidad de 100 MW. Esta operación está enmarcada dentro del objetivo anunciado por la propia Repsol de alcanzar los 522 MW para producción de hidrógeno en 2025 [73].



Figura 2-27 Instalaciones de Repsol en el Valle de Escombreras (Cartagena) [73].

3 METODOLOGÍA

El propósito de este capítulo es familiarizar al lector con la metodología utilizada, así como presentar los datos que han obtenido de la bibliografía existente.

Los datos utilizados para el estudio han sido tomados principalmente del Cuarto Estudio de Gases de Efecto Invernadero de la OMI en 2020 [74], entre otros. Dicho estudio contempla diversas variables como el tipo, tamaño, tonelaje, potencia de la planta propulsora o consumo de combustible de buques a nivel mundial. Este es el primero acometido desde la puesta en marcha de la Estrategia inicial de la OMI para la reducción de emisiones de GEI provenientes de los buques en 2018 y trabaja con datos hasta dicho año. Por otro lado, es el primer estudio de esta organización que incluye estimaciones de la intensidad del carbono.

3.1 Estructura de la flota marítima española

El sector marítimo nacional está constituido por numerosos tipos de buque con diferentes roles y necesidades, por ejemplo, en términos de capacidad de almacenaje o requisitos mínimos de la planta propulsora en función del tipo de navegaciones que determinado buque realice. Tras analizar la estructura de la flota española (Figura 3-1), que refleja datos correspondientes a noviembre de 2020, en la base de datos del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, se ha decidido escoger los 4 tipos de buque que se relacionan en la Tabla 3-3 por considerarse los más representativos de dicha flota.

Resulta conveniente especificar que no se han tenido en cuenta para el estudio los buques de pesca por diferentes motivos. En primer lugar, no se cuenta con una base de datos suficiente donde obtener datos de horas navegadas en un periodo de tiempo, así como patrones de navegación, de este tipo de barcos dentro de la flota española. Además, numerosos estudios consideran estos barcos, habitualmente de pequeño o mediano porte, como barcos potencialmente electrizables por sus características de navegación [75], [76].

Así mismo, es necesario fijar los sujeto ejemplos de referencia para hacer las comparaciones pertinentes. Para ello se han cogido los datos de referencia de buques que habitualmente operan en el puerto de Algeciras del portal de tráfico marítimo en vivo *MarineTraffic* [77] (ver Tabla 3-1).

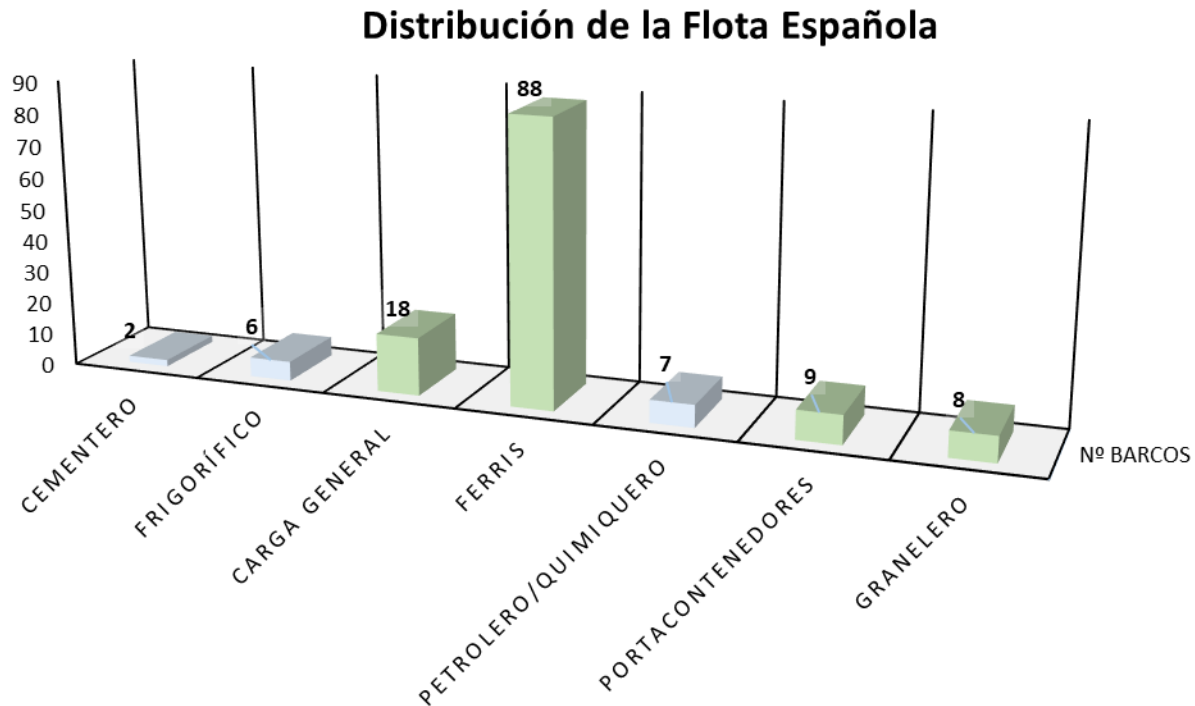


Figura 3-1 Distribución de la flota española (autoría propia, datos fechados en 2020 [78]).



Figura 3-2 Logo MarineTraffic [77]

Tipo de barco	Nombre	Potencia de la planta [MW]	Tanque de combustible [m³]	Carga de referencia
Ferri	Mistral	12,6	840	12.100 [m²]
Portacontenedores	CGA CGM Orfeo	69,6	14000	9600 [TEU]
Carga General	Arklow Rambler	1,94	190	6.800 [Ton]
Granelero	Good Hope Max	9,2	2600	76.739 [Ton]

Tabla 3-1 Datos de referencia para los buques [77] (autoría propia).

Respecto a la evolución del precio de la producción de combustibles hasta el año 2040, se han obtenido datos de diferentes estudios. Se estima que el coste de producción de los nuevos combustibles renovables, que se consideran potenciales candidatos para sustituir al diésel en el transporte marítimo, se reduzca aproximadamente un 20%.

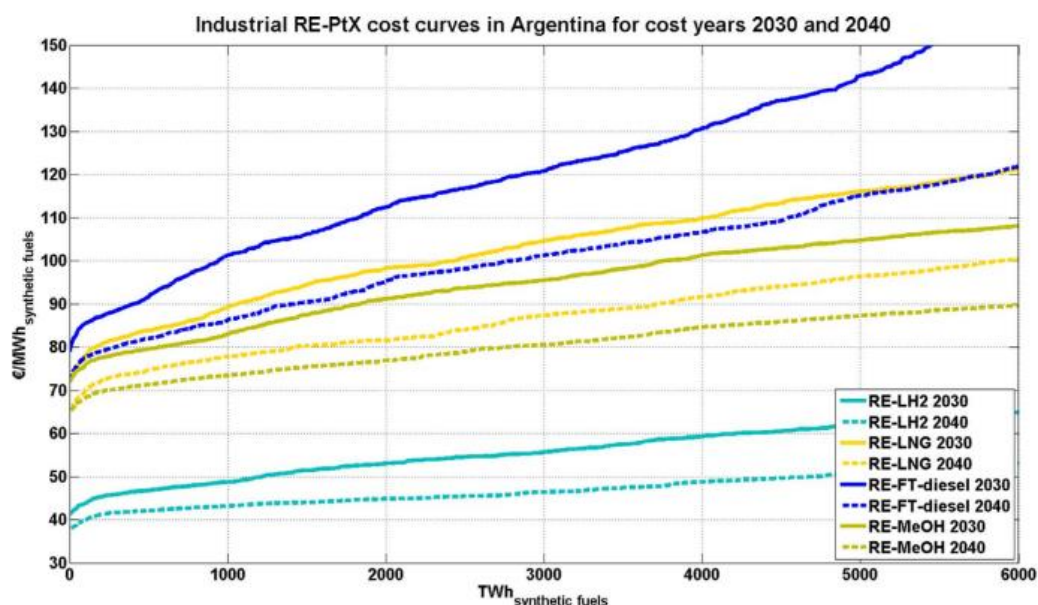


Figura 3-3 Evolución de los costes de combustibles sintéticos en el periodo 2030-2040 [79].

3.2 Costo total de propiedad (TCO)

Una de las herramientas utilizadas para el análisis es el costo total de propiedad (TCO, por sus siglas en inglés). Esta técnica evalúa no solo el costo inicial, sino también todos los costos relacionados a lo largo del ciclo de vida de lo que esté siendo objeto del estudio, en este caso: los costos operativos, de mantenimiento, de actualización, así como cualquier otro costo asociado con la posesión y uso continuado de un determinado activo. En definitiva, el análisis TCO ayuda a evaluar la viabilidad económica a lo largo del tiempo. Así, es posible identificar áreas específicas donde los costes pueden ser más altos, contribuyendo así a la identificación de las áreas a optimizar.

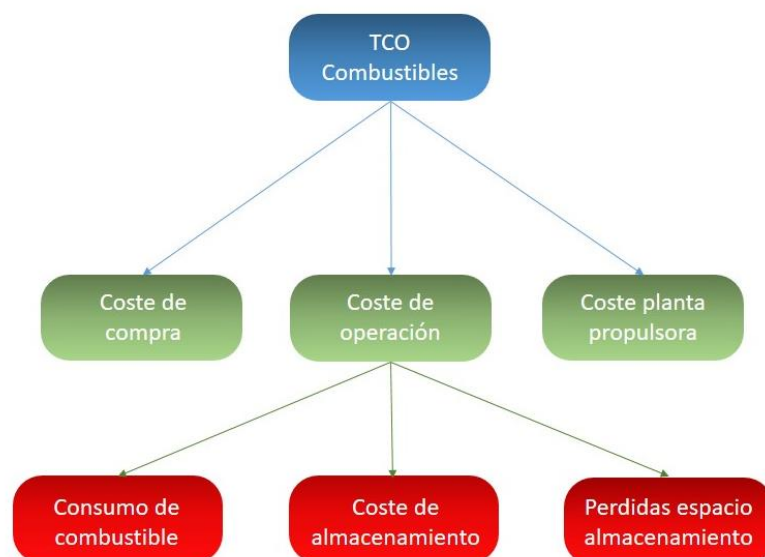


Figura 3-4 Diagrama esquemático TCO (autoría propia).

Durante el estudio se llevará a cabo el análisis del costo de obtención de diferentes combustibles, teniendo en cuenta además de la propia fabricación del combustible, el coste por manejo, almacenamiento, transporte y *bunkering*. También se analizarán las inversiones de capital (CAPEX) para diferentes tipos de buques, que realicen diferentes tipos de navegaciones, considerando la adecuación de estos a diferentes tipos de propulsión. Finalmente, se determinará el TCO teniendo en

cuenta el coste por almacenamiento del combustible a bordo y la pérdida de rentabilidad en términos de espacio para almacenamiento de activos que esto implica. Para calcular el TCO se utilizará la ecuación (1).

$$TCO = (Coste_{Comb} \cdot Consumo_{Comb} \cdot tasa\ de\ uso) + Coste_P + Coste_T \quad (1)$$

Para el cálculo del TCO se tienen en cuenta los siguientes factores:

- $Coste_{Comb}$ – Coste de compra de combustible
- $Consumo_{Comb}$ - Consumo de combustible
- $Coste_P$ – Costes derivados de la planta propulsora
- $Coste_T$ – Coste por pérdida de almacenamiento

El cálculo del valor de estos se calcula más adelante, en distintos apartados del presente capítulo.

Los costes de capital son los estimados para la década de 2030 y se expresan en euros (€). Así mismo se considera una disminución en el coste de producción de los combustibles para el año 2040 de un 20% (ver Figura 3-3).

3.3 Análisis DAFO

Mediante un análisis DAFO se identificarán las debilidades y fortalezas de cada combustible. De esta manera, se pretende determinar las prioridades del proceso, así como identificar el combustible más idóneo para su implantación en el sector marítimo. Se definen como fortalezas las capacidades del combustible para ganar ventaja sobre los otros. Mientras que las debilidades tratan de mostrar los puntos flacos e ineficiencias de estos respecto de sus competidores.

Para dicho análisis se tienen en cuenta variables como la seguridad de operación, el coste a lo largo de todo el ciclo de vida del combustible, las emisiones tanto durante su obtención como durante su operación, así como las necesidades relativas a su almacenamiento, ya sea a bordo de los buques o en instalaciones de tierra. En la Figura 3-5 se representa, de una manera esquemática, el proceso a seguir para llevar a cabo este análisis.

3.4 Producción de combustibles

Se consideran para el presente análisis, por ser los combustibles de origen no fósil más viables para el uso en el sector naval, además del diésel: el metanol, el amoniaco y el hidrógeno. Existen diferentes maneras de producir estos combustibles, que se reflejan en la Figura 3-6. El metanol y el diésel son los más flexibles en cuanto a obtención, mientras que el hidrógeno y el amoniaco son principalmente obtenidos por medio de la electrolisis del agua.

Se han separado los combustibles en tres categorías según su tipo de proceso de obtención. Por un lado, los biocombustibles proceden de biomásas. Los bio-electrocombustibles sin embargo proceden del exceso de CO_2 en las biomásas aprovechado a través de hidrogenación electrolítica. Por último, los electrocombustibles proceden del CO_2 capturado bien a bordo o bien en instalaciones en tierra [80], [81]. En la Tabla 3-2 se refleja el coste económico de los procesos de producción de los diferentes combustibles.

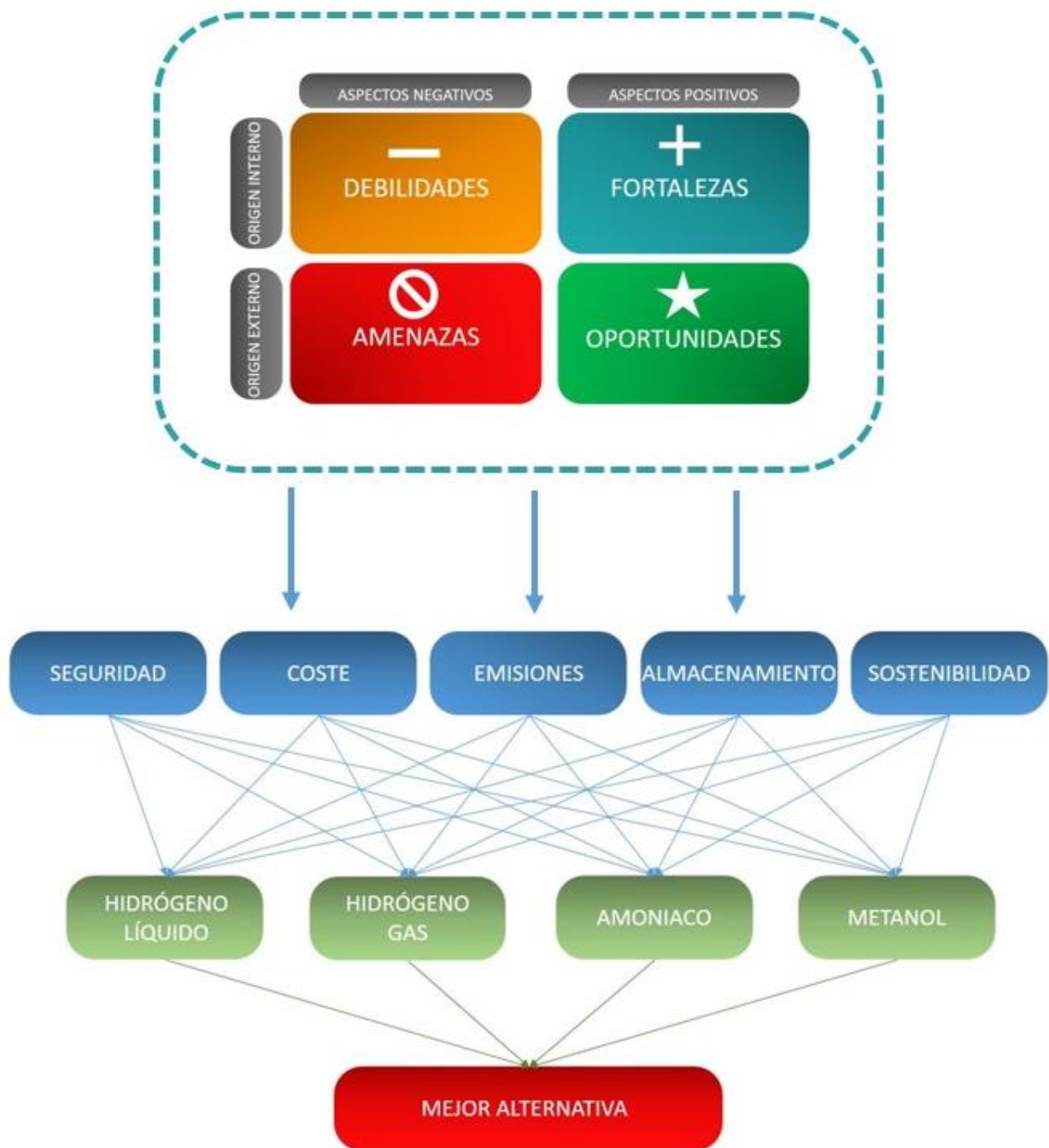


Figura 3-5 Diagrama esquemático del estudio mediante análisis DAFO (autoría propia).

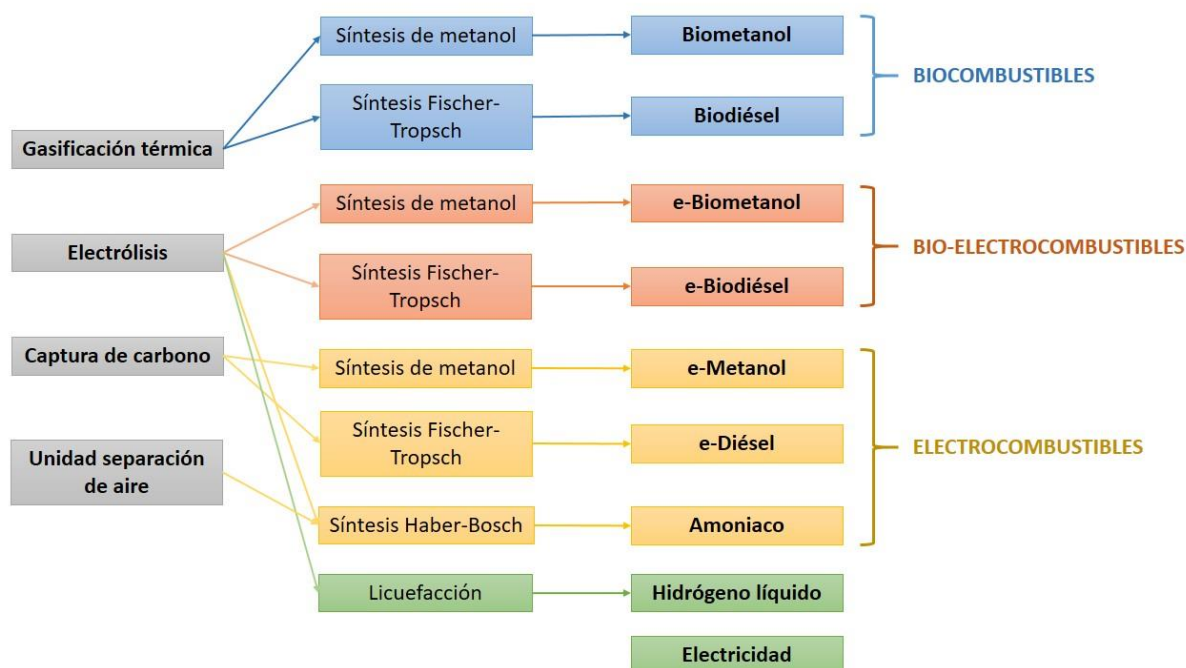


Figura 3-6 Diagrama esquemático de proceso de obtención de combustibles (autoría propia basado en [80]).

Proceso	Costo	Unidad	Ciclo de vida [años]	Eficiencia [%]
Electrolisis	0.60	Millones de €/MW	20	67
Gasificación	1.56	Millones de €/MW	20	77
Captura de carbono	400	€/tonelada de CO ₂	25	-
Síntesis de amoníaco	0.44	Millones de €/MW	20	87
Licuefacción de metano	0.50	Millones de €/MW	30	97
Licuefacción de hidrógeno	1.40	Millones de €/MW	30	75

Tabla 3-2 Costos de procesos de obtención de combustible (autoría propia basado en [82], [82]–[88]).

3.4.1 Combustibles sintéticos

Los combustibles renovables estudiados en el presente estudio se han creado de forma sintética. Los costes de los diferentes procesos de producción de los combustibles, se han obtenido de diferentes modelos utilizados en el análisis de Korberg [80].

Los combustibles estudiados parten de procesos relativamente similares (ver Figura 3-6). Se considera que para que los combustibles sean eminentemente verdes, la energía para estos procesos debe provenir de energías renovables como la solar o la eólica. Así se obtiene agua dulce a partir de agua del mar por medio de osmosis inversa, que posteriormente se utiliza en los procesos de electrolisis [80], [89]. El hidrógeno y el CO₂ son, en la mayoría de casos, el punto de partida para la obtención de otros combustibles como el metanol.

Según estudios de la *Energy Information Administration* (EIA), se calcula que la demanda de combustibles en los buques en durante el año 2012 fue de aproximadamente 3500 toneladas por hora, y estima que para el año 2040 esta demanda aumentará hasta las 5200 toneladas hora. [90]

3.4.2 Diésel

Es necesario estudiar también los costes asociados al tradicional diésel como base comparativa para los potenciales combustibles renovables. Debido a las nuevas normativas, cada vez más exigentes con respecto a las emisiones, en muchos casos resulta necesario instalar en los barcos que operan diésel algunos sistemas que reducen las emisiones, por ejemplo: los *scrubbers*. Sin embargo, si bien su instalación si computa para el cálculo del TCO, el coste de operación de estos sistemas no se tiene en cuenta para el estudio. La EIA estima que el barril de Brent aumente su precio hasta situarse alrededor de los 100 € para el año 2050 [91].

3.5 Coste asociado al consumo de combustible

Cada tipo de barco tiene asociado un patrón de navegación. Los datos utilizados en la Tabla 3-3 han sido obtenidos del Cuarto Estudio de Gases de Efecto Invernadero asociados al sector marítimo realizado por la IMO, que estudia datos hasta noviembre de 2020 [74]. Se han considerado las variables de número de navegaciones que cada tipo de buque realiza anualmente, así como la duración media en horas de estas. Correlacionando estas dos variables, se obtienen las horas de navegación anuales. Es decir, las horas de uso de la planta propulsora.

Tipo de buque	Potencia [kW]	Navegaciones anuales	Duración media navegaciones [h]	Horas de navegación anuales
Granelero	15000	9	480	4320
Carga general	6000	18	240	4320
Portacontenedores	55000	11	480	5280
Ferris de gran porte	11000	229	12	2520

Tabla 3-3 Tipo de navegación según buque (autoría propia basado en [74], [78]).

Por otro lado, en la Tabla 3-4 se refleja el coste de operación de cada tipo de planta propulsora en € por kW de potencia con datos obtenidos de diferentes estudios. Los MCIA considerados para todos los tipos de buque serán de dos tiempos por ser los más comunes en la flota actual además de ser más eficientes que los de cuatro tiempos [80].

Tipo de propulsión	Coste [€/MWh]
MCIA Diésel	240
MCIA Metanol	265
MCIA Amoniac	370
MCIA Hidrógeno	470
FC Hidrógeno	240

Tabla 3-4 Coste de operación según tipo de planta propulsora (autoría propia basado en [80], [87], [92]).

Finalmente, en la Figura 3-7 Coste anual por consumo de combustible (autoría propia). se representa el consumo anual que supone, para cada tipo de barco y combustible, el consumo de este.

3.6 Coste por pérdidas de espacio de almacenamiento a bordo

Los buques, actualmente operando en su mayoría con diésel marino, cuentan con tanques de combustible sobredimensionados. Esto es debido a que, a lo largo de sus derrotas, los buques planifican sus repostajes de combustibles en función al precio de este en los diferentes puertos de recalada, en lugar de hacerlo en lugares fijos a lo largo de toda su vida de operación. Además, es necesario dejar un margen de seguridad en términos de nivel de combustible que establezca un nivel mínimo del que no se pueda bajar salvo en caso de emergencia.

Como ya se ha dicho en el apartado 2.3 del presente estudio, los combustibles renovables tienen considerablemente peores propiedades energéticas así como menores densidades volumétricas que los combustibles convencionales. Pese a ello, debido al actual sobredimensionamiento de los tanques de combustible ya instalados en los buques, la densidad volumétrica de estos potenciales combustibles no debería, por lo general, suponer un problema para su implantación.

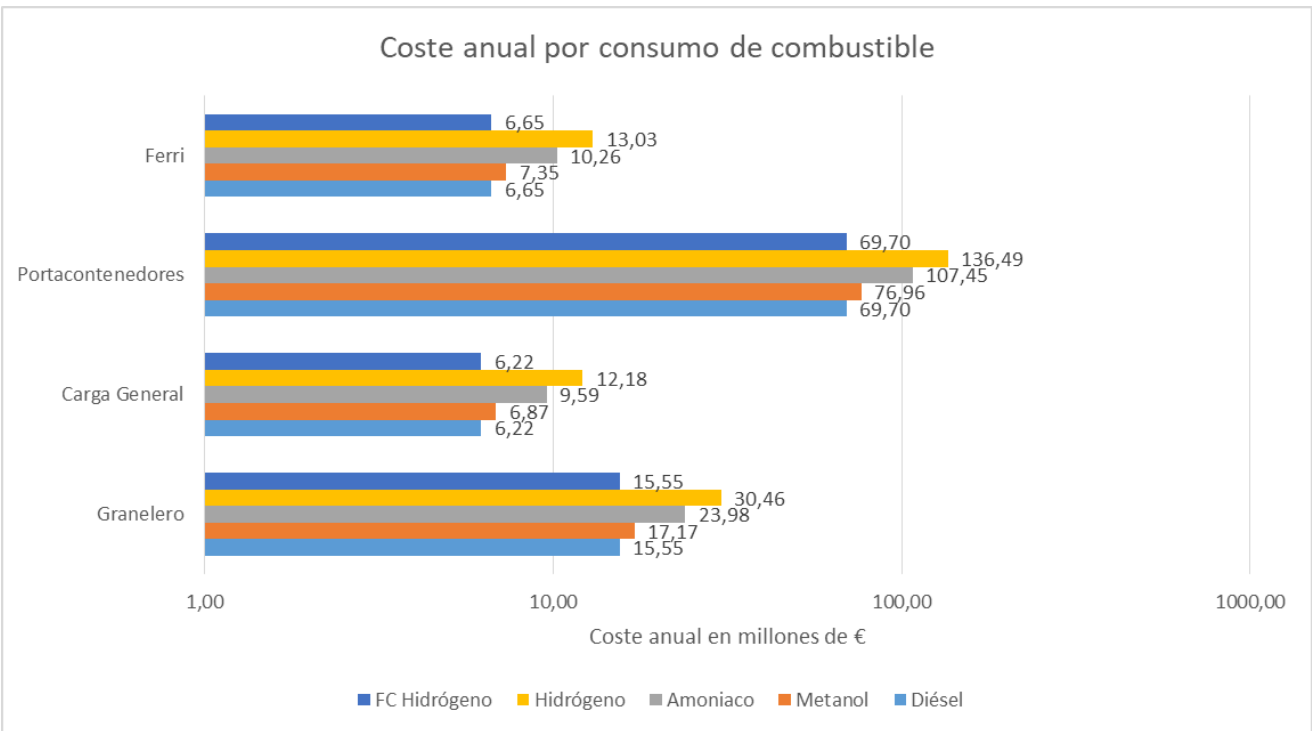


Figura 3-7 Coste anual por consumo de combustible (autoría propia).

Longitud derrota	Graneleros [€/ton/día]	Carga general [€/ton/día]	Portacontenedores [€/TEU/viaje]	Ferris [€/m²/viaje]
< 250 MN	2.4	2.4	600	6
250 MN < L < 750 MN	2.4	2.4	900	NA
> 750 MN	2.4	2.4	1100	NA

Tabla 3-5 Pérdidas por reducción de espacio de carga (autoría propia basado en [79], [80], [93]).

En los estudios de Horvath [79], Raucci [93] y Korberg [80] se estima una cuantificación aproximada del coste al que se debe hacer frente en caso de implementar, en según qué tipo de barco, la propulsión mediante combustibles renovables de menor densidad volumétrica. Estas estimaciones se representan en la Tabla 3-5 para los cuatro tipos de barco analizados, en función de la longitud de la derrota que realicen. Destacar, que las unidades resultantes para cada tipo de buque son diferente, atendiendo esto al tipo de carga que transportan. Por otro lado, en la Tabla 3-6 se refleja el porcentaje

del espacio de carga que se pierde debido a las necesidades particulares de almacenamiento de los combustibles en estudio.

Combustible	% de espacio de carga
Hidrógeno líquido	4.85
Metanol	2.29
Amoniaco	2.37

Tabla 3-6 % de volumen de carga perdido según combustible (autoría propia basado en [94]).

Finalmente se ha realizado el cálculo del coste anual que supone, para cada tipo de buque, la limitación en su capacidad de almacenamiento derivada de la implementación de combustibles renovables. Los resultados de estos cálculos se reflejan en la Figura 3-8.

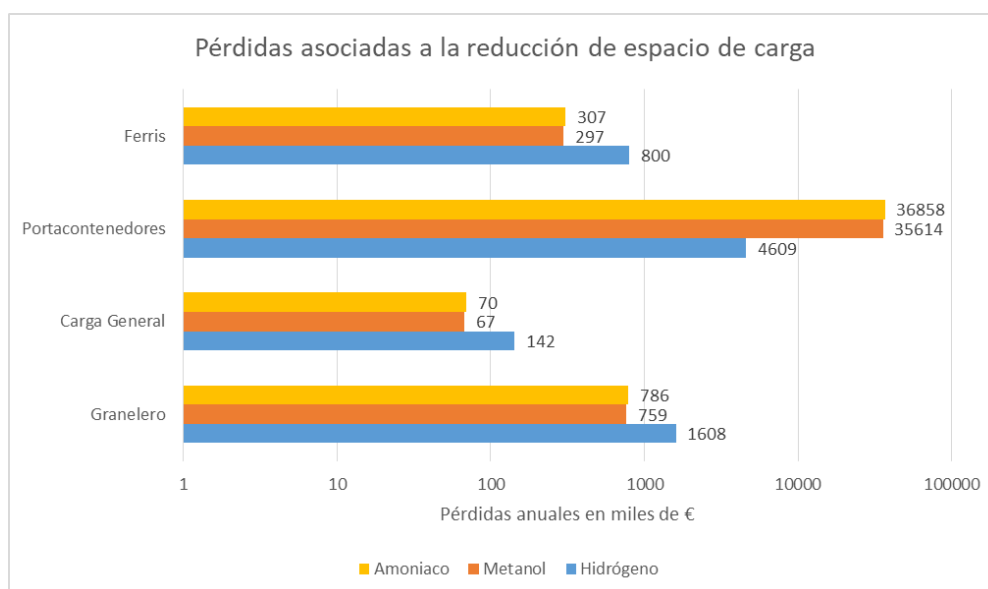


Figura 3-8 Pérdidas anuales asociadas a la reducción del espacio de carga (autoría propia).

3.7 CAPEX. Coste de adaptación de las plantas propulsoras

Para la adaptación de los buques que actualmente operan con diésel es necesario que sus plantas propulsoras, así como los sistemas de almacenamiento pasen por un proceso de adaptación para la correcta operación de estos combustibles. En la Tabla 3-7 se reflejan la inversión necesaria para dichas modificaciones.

Elemento(s)	Hidrógeno	Metano	Amoniaco
Reductora/embragues/ motor eléctrico/MCIA [€/kWh]	120	70	70
Sistemas de almacenamiento y trasiego [€/m ³]	2960	2830	600

Tabla 3-7 Costes de inversión según combustible (autoría propia basado en [95], [96]).

Finalmente, en la Figura 3-9, se indica la inversión inicial necesaria para el acondicionamiento de cada tipo de buque, a cada uno de los combustibles estudiados.

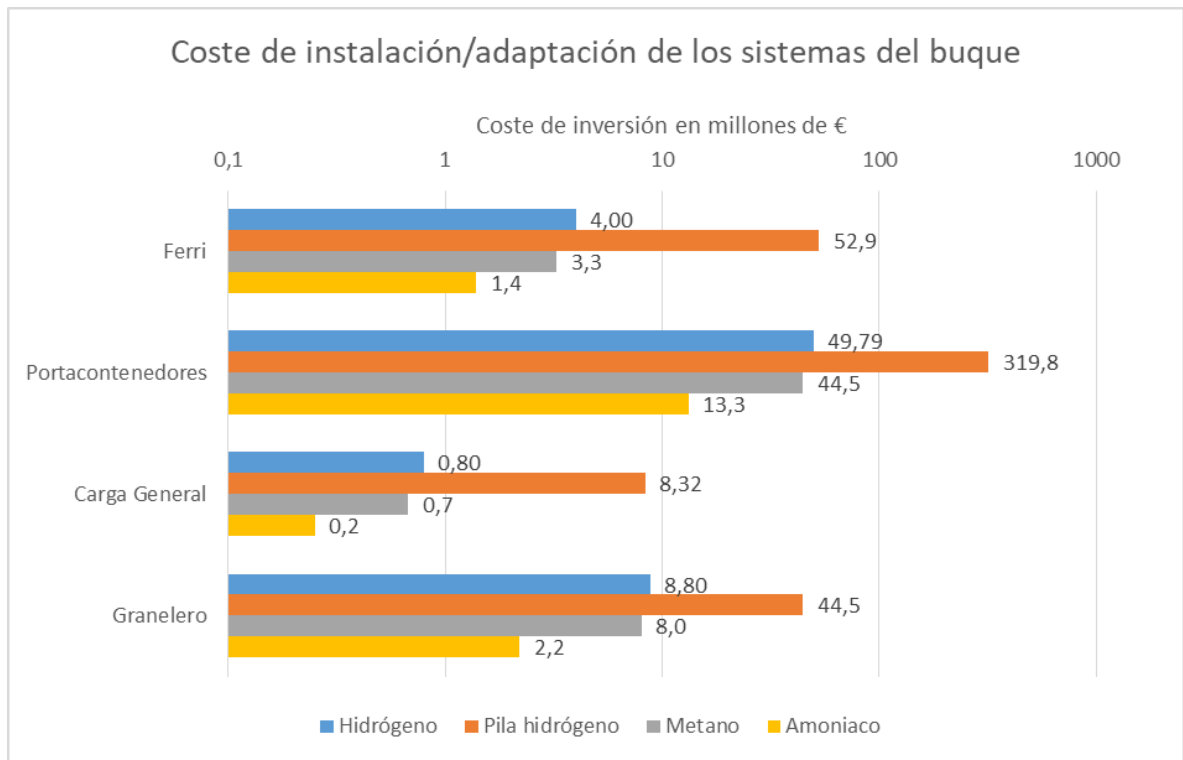


Figura 3-9 Coste de inversión inicial para la adaptación del buque a cada combustible (autoría propia).

4 RESULTADOS

4.1 Cálculo TCO

A continuación, se presentan los cálculos del TCO, en millones de € obtenidos para cada combustible. Los datos para el año 2040 se han calculado considerando una tasa de retorno del 11%.

4.1.1 TCO en ferris

FERRIS	Pila de hidrógeno [M€]	Hidrógeno [M€]	Metanol [M€]	Amoniaco [M€]
Coste por consumo	6,65	13,03	7,35	10,26
Perdidas espacio carga	NA	0,80	0,30	0,31
Inversión adaptación	52,90	4,00	3,30	1,40
TCO 1^{er} AÑO	59,55	17,83	10,95	11,97
TCO 2040	53,00	15,87	9,74	10,65

Tabla 4-1 Resultados TCO para buques de tipo ferry (autoría propia).

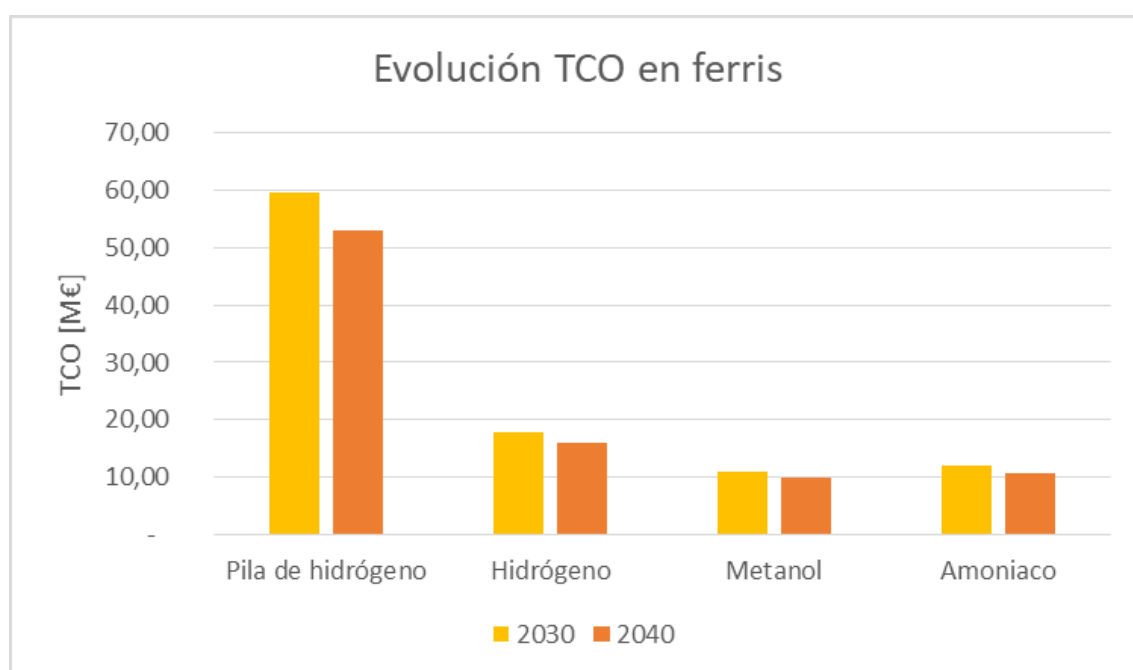


Figura 4-1 Evolución TCO en ferris para el año 2040 (autoría propia).

Como se observa en la Tabla 4-1, los combustibles con menor TCO son el metanol con 10,95 millones de € en su primer año de implantación, y el amoniaco con 11,97 millones de €. Por otro lado, el hidrógeno operado en motores de combustión interna supone un TCO calculado de 17,83 millones de €. Por último, la pila de hidrógeno se asocia con el mayor TCO de los cuatro combustibles comparados, llegando triplicar el los resultados obtenidos para otros combustibles, con un TCO de 59,55 millones de €.

Por otro lado, la pila de hidrógeno implica un coste de inversión para su instalación de 52,9 millones de €. Si bien esta inversión solo debería hacerse una vez, es al menos 13 veces mayor que la necesaria para otras tecnologías.

Para el año 2040, se observa que la reducción en términos de TCO es considerablemente mayor en la pila de hidrógeno, mientras que en los demás combustibles esta diferencia es mínima. Esto es debido al gran coste de inversión inicial que va asociado a la implantación de celdas de hidrógeno.

4.1.2 TCO en portacontenedores

PORTACONTENEDORES	Pila de hidrógeno [M€]	Hidrógeno [M€]	Metanol [M€]	Amoniaco [M€]
Coste por consumo	69,70	13,49	76,96	107,45
Perdidas espacio carga	NA	4,61	35,61	36,86
Inversión adaptación	319,80	49,79	44,50	13,30
TCO 1^{er} AÑO	389,50	67,89	157,07	157,61
TCO 2040	346,66	60,42	139,80	140,27

Tabla 4-2 Resultados TCO para buques de tipo portacontenedores (autoría propia).

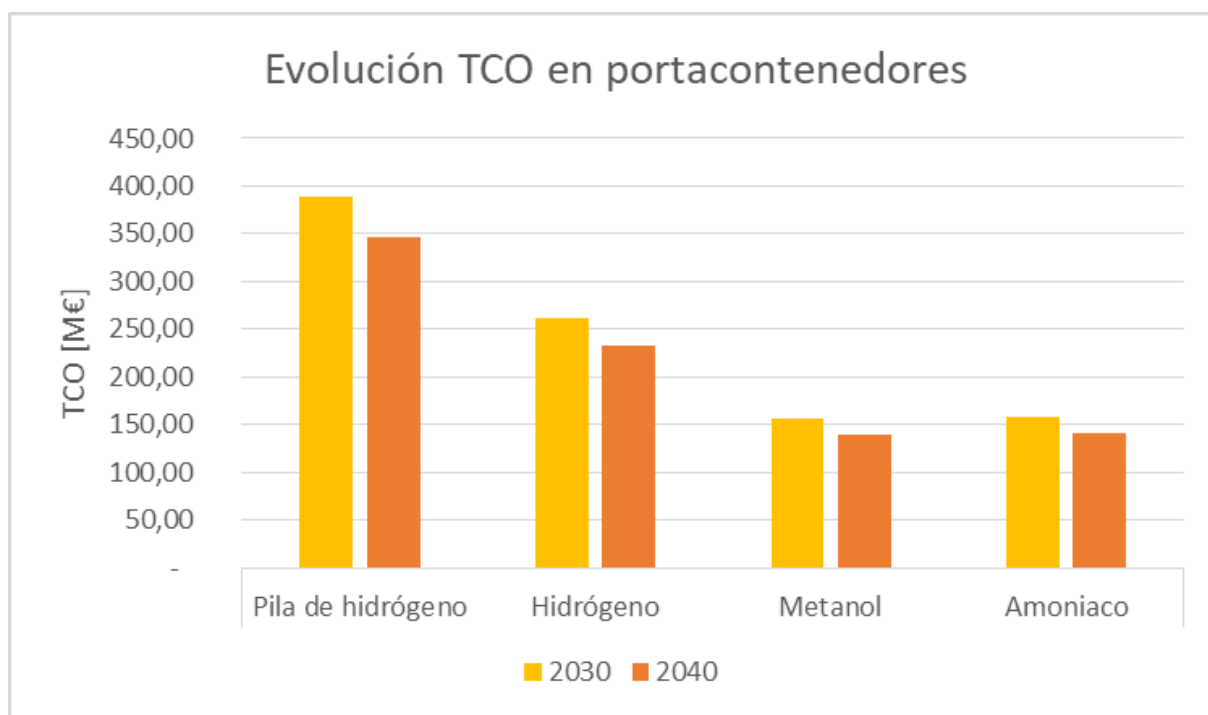


Figura 4-2 Evolución TCO en portacontenedores para el año 2040 (autoría propia).

De nuevo en los buques portacontenedores, las opciones más económicas son la implementación del metanol o el amoniaco como combustible para sus plantas propulsoras, con un TCO asociado de 157 millones de €. La propulsión con hidrógeno mediante motores de combustión interna se sitúa como opción intermedia desde el punto de vista del TCO. Finalmente, las celdas de combustible de hidrógeno

se presenta como la opción menos viable desde el punto de vista del TCO, arrojando el cálculo de éste un coste de casi 150 millones de € en su año de implantación.

De nuevo la tecnología de la pila de hidrógeno implica una inversión inicial de al menos 250 millones de € más que para otros combustibles. Esto puede suponer un impedimento para las empresas armadoras de los buques que tengan que hacer frente a esta considerable inversión.

4.1.3 TCO en buques de carga general

CARGA GENERAL	Pila de hidrógeno [M€]	Hidrógeno [M€]	Metanol [M€]	Amoniaco [M€]
Coste por consumo	6,22	12,18	6,87	9,59
Perdidas espacio carga	NA	0,14	0,07	0,07
Inversión adaptación	8,32	0,80	0,70	0,20
TCO 1^{er} AÑO	14,54	13,12	7,64	9,86
TCO 2040	12,94	11,68	6,80	8,78

Tabla 4-3 Resultados TCO para buques de carga general (autoría propia).

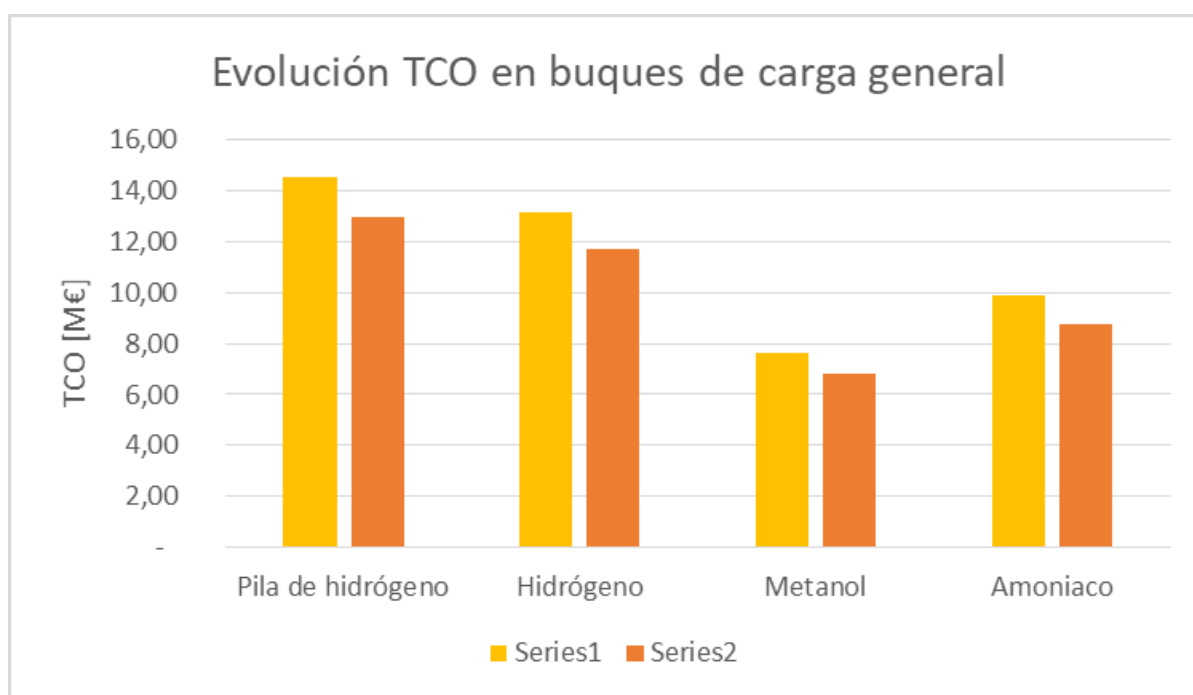


Figura 4-3 Evolución TCO en buques de carga general para el año 2040 (autoría propia).

Para los buques de carga general, la mejor opción desde el punto de vista del TCO es el metanol. Suponiendo un coste total en su primer año de 7,5 millones de €. El amoniaco sigue considerándose una opción económica, con un coste asociado de 9,86 millones de €. Por otro lado, la implementación del hidrógeno como combustible, en cualquiera de sus posibles configuraciones, supone la opción más costosa según el cálculo del TCO superando ambas los 13 millones de €, aproximadamente el doble que el TCO asociado al metanol.

4.1.4 TCO en graneleros

GRANELERO	Pila de hidrógeno [M€]	Hidrógeno [M€]	Metanol [M€]	Amoniaco [M€]
Coste por consumo	15,55	30,46	17,17	23,98
Perdidas espacio carga	NA	1,61	0,79	0,76
Inversión adaptación	44,50	8,80	8,00	2,20
TCO 1^{er} AÑO	60,05	40,87	25,96	26,94
TCO 2040	53,44	36,37	23,10	23,98

Tabla 4-4 Resultados TCO para buques graneleros (autoría propia).

Para los buques graneleros se repite el patrón observado en los anteriores tipos de barco. Siendo la opción más rentable, desde el punto de vista del coste total de propiedad, la propulsión basada en metanol o en amoniaco. De nuevo, el hidrógeno utilizado en motores de combustión interna se sitúa como opción intermedia, mientras que la pila de hidrógeno lleva asociada un coste del doble de los combustibles mencionados.

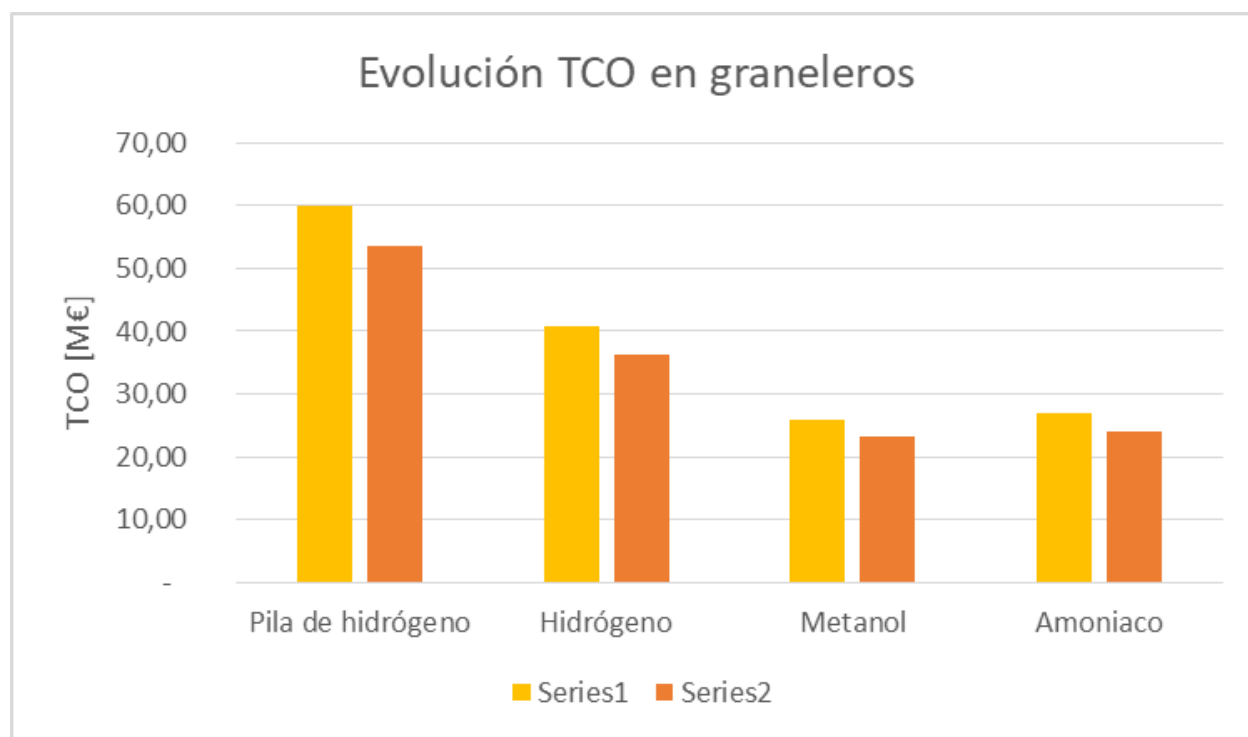


Figura 4-4 Evolución TCO en buques graneleros para el año 2040 (autoría propia).

4.1.1 Análisis de sensibilidad del TCO

Los resultados del cálculo del coste total de la propiedad se mueven en un amplio intervalo de cantidades según el tipo de barco al que se aplique dicho cálculo. Esta diferencia de resultados atiende a diferentes factores, tales como: el tamaño del barco, el tipo de operaciones que desarrolle, las diferentes necesidades particulares relativas al espacio de carga, la longitud de las derrotas efectuadas y la cantidad de días anuales que pase el buque en la mar.

En general, el alto precio de la electricidad, incrementa el coste del hidrógeno obtenido por electrolisis. La superior eficiencia de la propulsión mediante celdas de combustible respecto a los motores alternativos no es suficiente para considerar esta tecnología como una opción viable actualmente. Sin embargo, el uso de la red eléctrica para la producción de hidrógeno evita las posibles dificultades eventuales de intermitencia en la operación de las plantas productoras.

En el caso del amoniaco, el coste de la operación de captura de carbono incrementa el precio de producción de este, que influye directamente en el TCO asociado a dicho combustible. En el caso del hidrógeno utilizado como combustibles para motores de combustión interna, el costoso proceso de producción y almacenamiento de este no se ve rentabilizado, como si pasa en las pilas de combustibles, por la eficiencia de los motores, situándolo como la opción menos rentable atendiendo a los resultados arrojados por el cálculo del coste total de propiedad para todos los buques.

Respecto a las pilas de hidrógeno, es importante reseñar la gran inversión inicial que requiere su implantación comparándola con otros combustibles. Esto, en muchos casos, puede frenar la predisposición de las empresas propietarias y operadoras de los buques estudiados.

4.2 Resultados del análisis DAFO

4.2.1 DAFO: Metanol

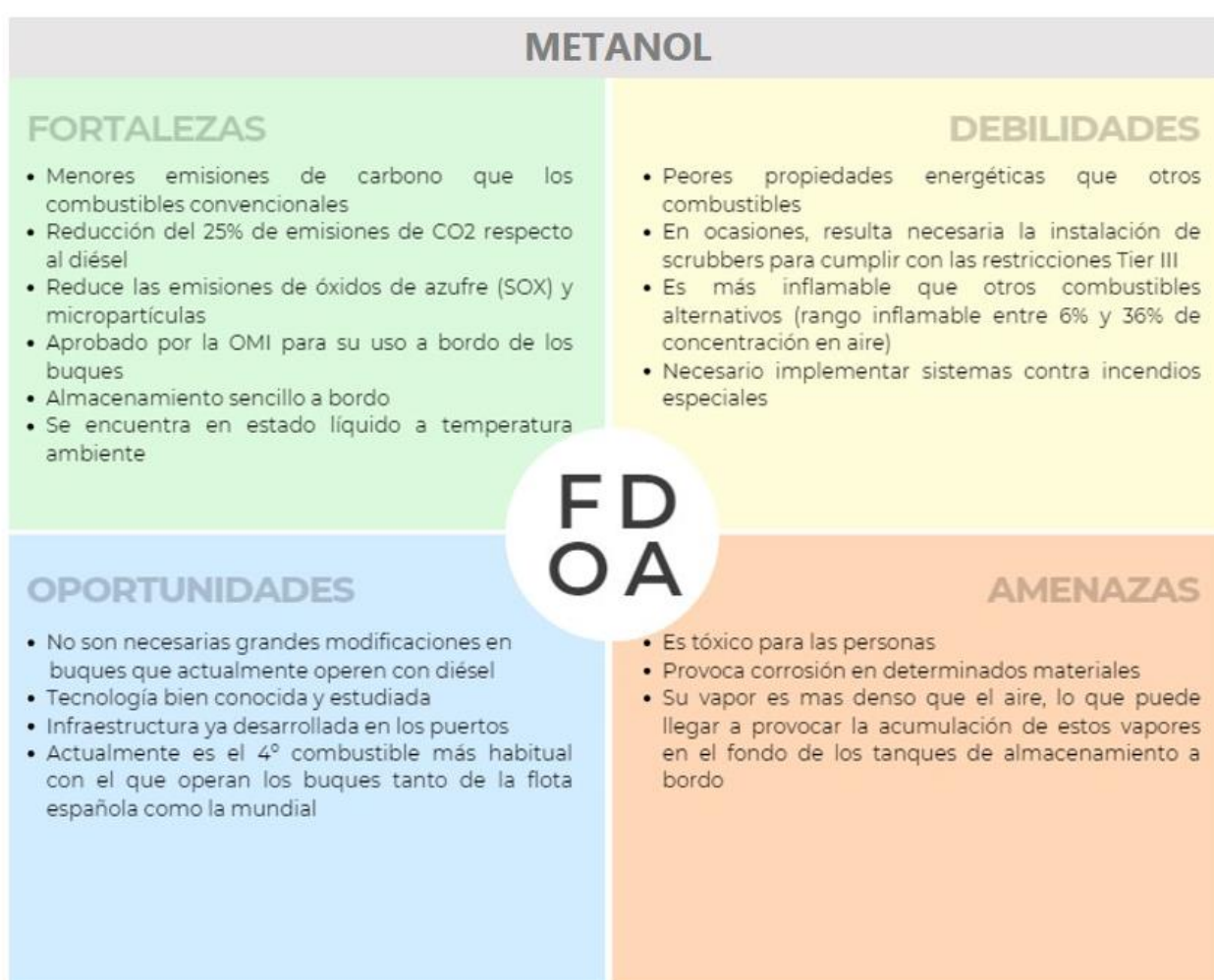


Figura 4-5 Análisis DAFO del metanol como combustible (autoría propia).

4.2.1.1 Fortalezas del metanol

El metanol emite un 25% menos de carbono en comparación con el diésel actual. Además, la combustión de metanol emite también menos óxidos de azufre y macropartículas, lo que mejoraría la calidad del aire y minimizando el impacto de la navegación no solo para la navegación, sino también para la salud humana. Todo esto, lo sitúa como una clara alternativa en el proceso de implementación de combustibles renovables tanto en el sector energético en general, como en el sector marítimo.

Otro factor que respalda la viabilidad del metanol para su adopción como combustible marino es la aprobación por parte de la OMI para su uso a bordo, lo cual hace patente el cumplimiento de este combustible con los estándares internacionales de seguridad y sostenibilidad.

La facilidad de almacenamiento a bordo es otra de las fortalezas distintivas del metanol. Este, ofrece una solución logística práctica y eficiente para su utilización en el sector marítimo. Además, el hecho de que su manejo en la infraestructura ya existente de GNL, es otro punto fuerte del metanol. Todo ello, contribuye a la viabilidad operativa de la transición hacia fuentes energéticas más limpias.

Adicionalmente, el hecho de que el metanol se encuentre en estado líquido a temperatura ambiente proporciona una ventaja adicional en términos de manipulación y utilización, eliminando la necesidad de complejos sistemas de almacenamiento y distribución que podrían asociarse con otras opciones de combustibles renovables.

4.2.1.2 Debilidades del metanol

La capacidad de generar menos energía por unidad de volumen podría resultar en una menor autonomía de los buques o en la necesidad de transportar mayores cantidades de combustible, lo que podría impactar la eficacia operativa y la capacidad de carga de las embarcaciones.

Otro aspecto crítico a considerar es la posible necesidad de instalar *scrubbers* para cumplir con los estándares de emisiones Tier III. Aunque el metanol contribuye a la reducción de diversas emisiones contaminantes y la tecnología a su alrededor es considerablemente conocida, la eventual instalación de estos dispositivos puede añadir complejidad y costos adicionales a la transición hacia su uso, afectando la viabilidad económica de la adopción a gran escala.

Por otro lado, la inflamabilidad del metanol, cuyos márgenes oscilan entre el 6% y el 36% de concentración en aire, representa otra debilidad significativa. Esta característica introduce riesgos adicionales de seguridad, ya que niveles más altos de inflamabilidad pueden aumentar la vulnerabilidad ante eventos de emergencia como incendios a bordo. En consecuencia, se requerirá una gestión rigurosa de los protocolos de seguridad y la implementación de medidas específicas para mitigar estos riesgos potenciales.

En la misma línea, la necesidad de implementar sistemas contra incendios especiales representa un desafío adicional en términos de diseño y equipamiento de las embarcaciones. La adaptación de infraestructuras y la capacitación del personal para manejar situaciones de emergencia asociadas al metanol implican costos y esfuerzos adicionales que pueden dificultar su implantación a nivel general en la flota española.

4.2.1.3 Oportunidades del metanol

El metanol presenta oportunidades estratégicas significativas para su integración en el sector marítimo, destacando aspectos que facilitan su adopción sin necesidad de modificaciones exhaustivas en las embarcaciones que actualmente operan con diésel. Esta característica permite una transición más fluida hacia el uso de metanol como combustible, minimizando la necesidad de inversiones considerables en la adecuación de la flota existente. Además, la tecnología asociada al metanol se encuentra en un estado de desarrollo relativamente avanzado. Esto contribuye a una mejor aceptación y confianza por parte de la industria marítima.

La existencia de infraestructura en los puertos es otra oportunidad clave para el metanol, puesto que facilita la logística y operatividad, facilitando una transición más progresiva y eficiente en comparación con otros combustibles que podrían requerir una infraestructura específica adicional.

El hecho de que el metanol ya sea el cuarto combustible más utilizado en buques actualmente señala una oportunidad inherente. Este hecho indica una significativa aceptación por parte del sector y destaca la capacidad del metanol para integrarse de manera exitosa en la operativa de las embarcaciones, respaldando su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

4.2.2 Debilidades del metanol

La toxicidad del metanol para las personas constituye un punto negativo. La exposición a este compuesto químico puede tener efectos adversos para la salud, lo que demanda la implementación de estrictas medidas de seguridad y entrenamiento del personal para minimizar los riesgos laborales asociados.

Otro aspecto clave es la corrosividad del metanol en ciertos materiales. Esto puede afectar negativamente a la integridad estructural de los buques y sus componentes, lo que implica la necesidad de seleccionar cuidadosamente los materiales utilizados en la construcción y mantenimiento de las embarcaciones.

Por último, la densidad del vapor del metanol, que es más pesado que el aire, plantea una tercera debilidad significativa. Esto puede dar lugar a la acumulación de vapores en los fondos de los tanques, aumentando el riesgo de situaciones peligrosas como la formación de atmósferas explosivas dentro de estos.

4.2.3 DAFO: Hidrógeno



Figura 4-6 Análisis DAFO del hidrógeno como combustible (autoría propia).

4.2.3.1 Fortalezas del hidrógeno

El hidrógeno cuenta con mejor densidad energética que muchos de sus competidores. Es decir, ofrece una liberación considerable de energía durante su combustión. Por otro lado, el hidrógeno es un elemento tremendamente abundante en nuestro planeta. Esto implica que su disponibilidad es

prácticamente ilimitada. Por lo tanto, asegura una fuente de combustible estable, minimizando las preocupaciones relativas a la eventual escasez y asegurando un continuo suministro.

Durante los últimos años, se han puesto en marcha numerosos proyectos vinculados al hidrógeno, como la creación de estaciones de carga y plantas de producción de hidrógeno verde. De ello se deduce una mejora considerable de la viabilidad logística de la implantación del hidrógeno como combustible naval.

En líneas similares, la tecnología desarrollada alrededor del hidrógeno, si bien aún consta de amplio margen de desarrollo, se considera actualmente una tecnología fiable. Esto puede influir positivamente en el respaldo que el entramado que envuelve al sector marítimo pueda dar a la progresiva adopción del hidrógeno como combustible.

4.2.3.2 Debilidades del hidrógeno

El hidrógeno es el combustible más caro de producir, almacenar y transportar. Su implantación requiere una gran inversión inicial tanto por parte de las empresas productoras como los clientes finales. Por lo tanto, se deduce que el precio del hidrógeno podría suponer un obstáculo en el camino hacia su adopción como combustible marítimo alternativo.

Por otro lado, los sistemas de las plantas propulsoras de los buques actuales, deberían sufrir una considerable reconversión para adaptarse a los requerimientos derivados de operar con hidrógeno. Esto puede suponer tanto costos adicionales como complejidades logísticas excesivas.

Las necesidades del hidrógeno relativas a su almacenamiento son muy exigentes. Los tanques de almacenamiento deberían poder proporcionar temperaturas criogénicas en su interior, lo que supone un desafío técnico considerable. Además, el almacenamiento de este limita en gran medida el espacio útil del buque en cuestión para almacenar el activo con el que se esté trabajando.

4.2.3.3 Oportunidades del hidrógeno

El hidrógeno es una buena alternativa para buques que efectúen derrotas muy largas, con la consiguiente necesidad de autonomía, debido a su buena eficiencia así como a sus buenas propiedades energéticas.

Por otro lado, si bien la inversión inicial a hacer frente, el hidrógeno ofrece una buena tasa de retorno de inversión. Es decir, a largo plazo, la implantación del hidrógeno puede implicar amplios márgenes de beneficio económico, lo que definitivamente supone un incentivo para la industria marítima en cuanto a la transición hacia la implementación a gran escala del hidrógeno como combustible en sus barcos.

Además, resulta posible utilizar, con algunas modificaciones, la red de infraestructura existente de gas natural. Lo que simplifica la logística relativa a este proceso de migración hacia tecnologías más respetuosas con el medio ambiente.

4.2.3.4 Amenazas del hidrógeno

La tecnología alrededor del hidrógeno es cara y compleja. La necesaria inversión en investigación y desarrollo puede suponer un gran obstáculo, especialmente para empresas con recursos financieros limitados. Esto supone definitivamente una amenaza para la adopción generalizada del hidrógeno como combustible principal del sector marítimo.

La infraestructura actual tanto de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno es, a día de hoy, insuficiente. Esto puede limitar su disponibilidad a largo plazo, lo que puede comprometer la adopción de este a gran escala en el sector marítimo. Además, su transporte y almacenamiento suponen grandes desafíos tecnológicos.

Por otro lado, aun no existe una legislación clara respecto al uso de este como combustible embarcado. Esto puede generar cierta incertidumbre en el sector y dificultar la implementación de esta tecnología, ya que la industria podría mostrarse reticente a invertir en activos sin una regulación clara al

respecto. Además, existe cierta percepción negativa por parte de la sociedad hacia el hidrógeno, lo que podría dificultar aún más que la industria se lance a invertir en este tipo de tecnologías.

4.2.4 DAFO: Amoniac



Figura 4-7 Análisis DAFO del amoniac como combustible (autoría propia).

4.2.4.1 Fortalezas del amoniac

El amoniac genera cero emisiones nocivas para el medio ambiente durante todo su ciclo de vida (siempre que la electrolisis se nutra de electricidad proveniente de energías renovables).

Además, el amoniac se encuentra en estado líquido a 20°C y 8.6 bares de presión, lo que facilita su manipulación y almacenamiento a bordo. Esto supone una gran ventaja logística, tecnológica y económica frente a muchos de sus competidores.

Por último, cabe resaltar que su inflamabilidad es considerablemente menor que la de otros combustibles renovables, teniendo su rango de inflamabilidad entre el 15% y el 27% de concentración en aire.

4.2.4.2 Debilidades del amoniac

El amoniac presenta peores condiciones energéticas respecto a sus competidores. La cantidad necesaria de amoniac para obtener la misma cantidad de energía que se aportaría una determinada cantidad de diésel es muy grande, lo que afecta directamente al rendimiento y autonomía de las

embarcaciones que lo operen. Así mismo, repercutiría directamente en la capacidad de almacenamiento del barco, viéndose esta considerablemente reducida. Por otro lado, sus propiedades de combustión son relativamente malas.

En determinadas ocasiones, sería necesario la implementación de sistemas secundarios que reduzcan las emisiones de NO_x, como los *scrubbers*. Lo que añade a los proyectos relativos a la implementación del amoniaco dificultades técnicas y económicas.

4.2.4.3 Oportunidades del amoniaco

El amoniaco puede utilizarse en configuraciones dual-fuel- Es decir, ofrece una transición gradual hacia fuentes de energías limpias sin la necesidad de exhaustivas modificaciones en las plantas propulsoras ya instaladas.

Por otro lado, el carbono se puede producir mediante la captura de carbono, ya sea a bordo o en instalaciones de tierra, y por medio de energías renovables como la eólica o la solar. Esto último, contribuye a la creación de una cadena de suministro completamente limpia y sostenible.

4.2.4.4 Amenazas del amoniaco

La toxicidad de los vapores de amoniaco constituye una amenaza significativa. Estos irritan los tejidos mucosos del cuerpo humano, lo que representa una importante amenaza para la salud de los trabajadores. Por ello, serían necesarias estrictas medidas de seguridad, así como protocolos especiales relativos a su manejo para reducir al mínimo los riesgos laborales asociados.

Por otro lado, el amoniaco es corrosivo ante ciertos materiales. Esto afecta negativamente a la integridad de los sistemas y componentes de las embarcaciones, lo que implica una cuidadosa elección de materiales que pueden encarecer este tipo de proyectos.

Respecto a su combustión, esta emite grandes cantidades de óxidos de nitrógeno. Lo que implicaría la implementación de dispositivos adicionales que redujesen estas emisiones y permitiesen cumplir con los estándares ambientales actuales.

5 ALTERNATIVAS PARA LA ARMADA

5.1 Una Armada heterogénea

La Armada Española tiene actualmente en servicio 96 unidades, todas de diferente porte y necesidades, cuyas misiones abarcan desde colaborar en labores portuarias de atraque y desatraque hasta el combate de alta intensidad en el espectro marítimo. En la Tabla 5-1 se exponen las características principales de los buques más importantes de la Flota. Se han omitido los buques auxiliares y del tren naval por la abrumadora variedad de unidades con diferentes características que operan en los diferentes arsenales y estaciones navales de la Armada. De la misma manera, se han omitido los vetustos patrulleros litorales y de altura por la proximidad de su baja en la Lista Oficial de Buques de la Armada debido a su longevidad, lo que hace carecer de sentido plantear proyectos de rediseño de sus cámaras de máquinas.

	Nº de unidades	Eslora [m]	Propulsión	Velocidad máx. (kts)	Autonomía (mn)
Fragatas “F-80”	6	138	COGAG 2x Turbina Gas (50 MW)	29	4500 a 20 kts
Fragatas “F-100”	5	147	CODOG 2x Turbina Gas (50 MW) 2x Diésel (17.6 MW)	28.5	5000 a 18 kts
Buques de Asalto Anfibio	2	160	4 x Diésel (32,3 MW)	19	6000 a 12 kts
Portaaeronaves “Juan Carlos I”	1	230	1 x Turbina Gas (25 MW) 2 x Diésel (22 MW)	20	9000 a 15 kts
Buques de Acción Marítima	6	94	CODOE 2 x Diésel (9MW) 2 x Motor eléctrico (1,3 MW)	20.5	8700 a 10 kts
Buques de aprovisionamiento en combate	2	165	2 x Diésel (35 MW)	20	13400 a 20 kts
Buque logístico “Ysabel”	2	150	2 x Diésel (5.8 MW)	17	7000 a 10 kts

Tabla 5-1 Características de las principales plataformas de la Armada [97] (autoría propia).

5.2 Análisis DAFO desde el punto de vista militar

Mientras para los buques civiles, el coste de los combustibles, así como los índices de emisiones contaminantes son una prioridad, puesto que el objetivo principal de estos es proveer beneficio económico; para los buques militares las prioridades son las capacidades tácticas del buque y la disponibilidad continua y asegurada de este, ya sea mediante reaprovisionamiento en la mar o en puerto. Por lo tanto, aunque en el apartado 4.2 del presente trabajo ya se ha aplicado el análisis DAFO a los combustibles objeto de estudio, la aplicación de estos en unidades militares requiere de un nuevo análisis desde un punto de vista más específico.

5.2.1 DAFO desde la perspectiva militar: Metanol



Figura 5-1 Análisis DAFO del metanol como combustible para buques militares (autoría propia).

Como ya se mencionó anteriormente, el hecho de que la OMI ya haya aprobado el uso del metanol como combustible para buques aporta cierta confianza para su implantación tanto en buques civiles como en militares. El hecho de que el metanol se encuentre en estado líquido a temperatura ambiente supone un gran aliciente desde el punto de vista militar no solo por la relativa sencillez de su almacenamiento, sino también porque permite la posibilidad de realizar reaprovisionamiento en la mar con tubos flexibles, algo esencial para garantizar la permanencia del buque en zona de operaciones sin necesidad de recalar en puerto. Además, este se puede utilizar como combustible secundario en configuraciones dual-fuel, lo que elimina la necesidad de un rediseño integral de las plantas de propulsión actuales basadas en MCIA de diésel usadas por gran parte de la flota militar española. Sin embargo, no ofrece ninguna ventaja desde el punto de vista táctico ni logístico.

No obstante, el uso de este combustible implica ciertos riesgos desde el punto de vista de la seguridad a bordo que pueden suponer un gran obstáculo para la implementación del metanol en según qué tipo de

buques militares. Por su gran inflamabilidad, no parece adecuado la presencia de este combustible en ambientes de alta intensidad, donde la posibilidad de un impacto en el propio buque sea una realidad, que puede tener resultados catastróficos si el vapor acumulado en los tanques de combustible acabase detonando. En la misma línea, sería de vital importancia la instalación de sistemas contraincendios específicos capaces de hacer frente a los riesgos que derivan de la presencia de metanol a bordo.

5.2.2 DAFO desde la perspectiva militar: Hidrógeno

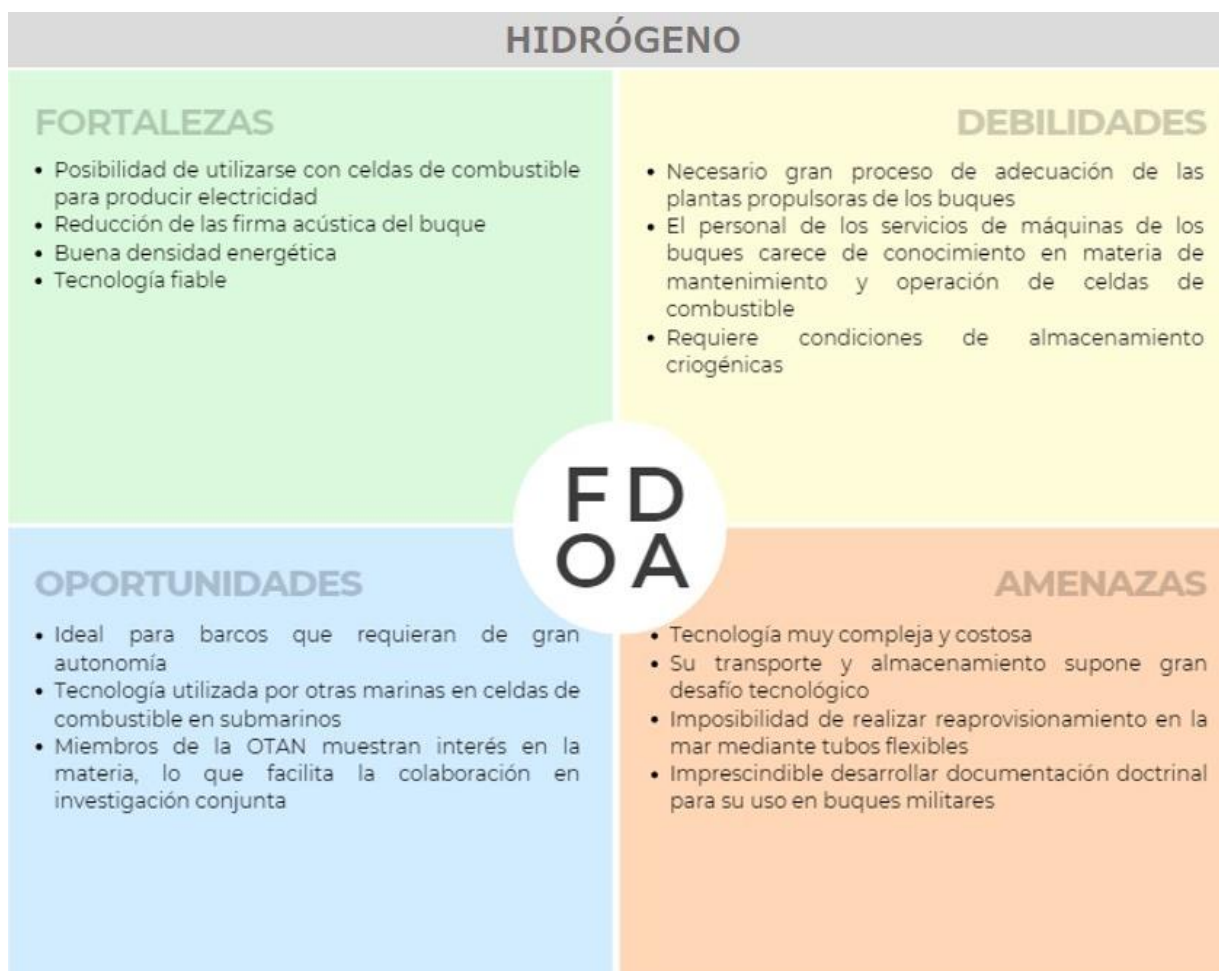


Figura 5-2 Análisis DAFO del hidrógeno como combustible para buques militares (autoría propia).

La idoneidad del uso del hidrógeno en de combustión interna quedó descartada en el capítulo 4 del presente documento. Sin embargo, su uso para proveer de electricidad a determinado buque mediante el uso de celdas de combustible es una buena opción para determinados buques. Esta tecnología ofrece diferentes beneficios en el ámbito militar. Entre ellas, destaca la reducción de la firma acústica, tan crucial para la guerra antisubmarina así como para la navegación en aguas minadas. Además, miembros de la OTAN han manifestado su interés por el desarrollo de estas tecnologías.

Sin embargo, el uso del hidrógeno en buques militares plantea ciertas desventajas frente a otros. La más importante es la imposibilidad del aprovisionamiento en la mar mediante tubos flexibles, único método actual de reaprovisionamiento en uso por las marinas de todo el globo. Además, el personal mecánico de la Armada no tiene conocimientos sobre el hidrógeno, lo que obligaría a delegar al menos durante los primeros años, la necesaria formación de estos a empresas externas. Por otro lado, las necesidades criogénicas relativas al almacenamiento de hidrógeno en estado líquido suponen un gran desafío tecnológico para su implantación en los, por lo general, longevos buques de la Armada.

5.2.3 DAFO desde la perspectiva militar: Amoniac

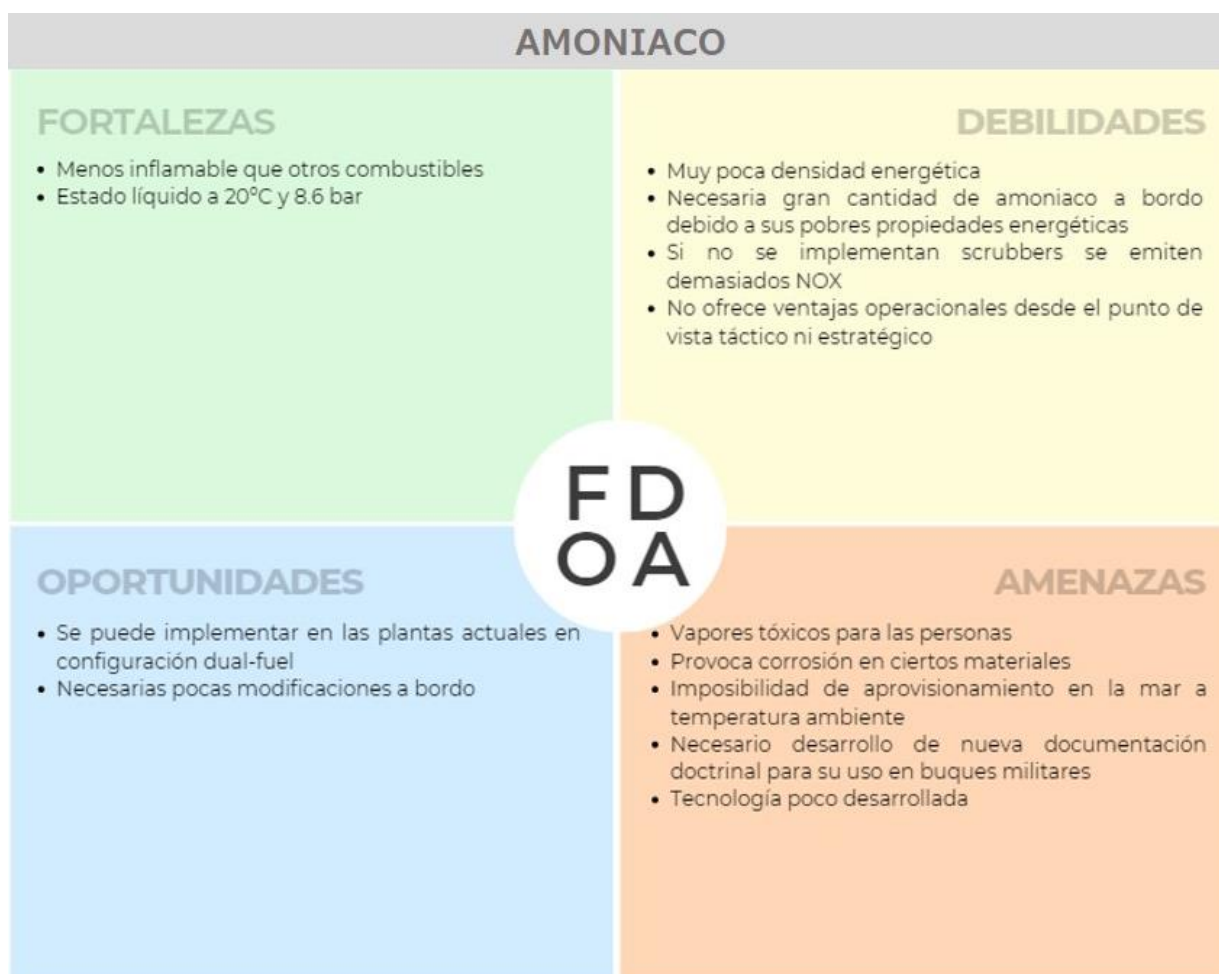


Figura 5-3 Análisis DAFO del amoniac como combustible para buques militares (autoría propia).

El análisis DAFO del amoniac arroja considerablemente más argumentos en contra que a favor de la implantación del amoniac como combustible sustituto del DFM. Si bien es menos inflamable que otros competidores, es corrosivo para determinados materiales y tóxico para las personas. Además, su utilización va ligada al uso de *scrubbers* si se quiere reducir realmente el impacto de las navegaciones en el medio ambiente, ya que la combustión del amoniac emite grandes cantidades de NO_x. Pese a ser fácilmente licuable, no es líquido a temperatura ambiente, lo que supone un problema desde la perspectiva del reaprovisionamiento en la mar. Además, su pobre densidad energética obligaría a almacenar a bordo grandes cantidades de amoniac si se prevé permanecer un tiempo prolongado en la mar.

5.3 Alternativas para diferentes plataformas

No todas las plataformas con las que cuenta la Armada son susceptibles de cambio respecto de su concepción inicial. En este sentido, los buques de primera línea, como son: las fragatas, los buques anfibios y el BPE “Juan Carlos I” no se consideran aptos actualmente para su transición hacia el uso de combustibles renovables que sustituyan o complementen a los actuales, debido a que estos buques están diseñados para operar en escenarios de alta intensidad donde se necesita el máximo rendimiento posible, así como para aprovechar al máximo el espacio dentro de él.

Por un lado, las fragatas Clase Santa María (F-80) datan de la década de los 80 y, por lo tanto, su baja en la Armada es previsible que ocurra en los próximos años hasta el 2030. Esto, unido a que uno de los atractivos principales de ésta fragata es, precisamente, su propulsión de turbinas que le hacen alcanzar

a cabo para su uso como buque militar fue la eliminación de una de sus cubiertas de carga para su adecuación al transporte de ciertos vehículos militares de gran porte. Por ello, es susceptible de realizar adaptaciones en su, ya antigua, cámara de máquinas; debido a que no requiere de exigentes prestaciones desde el punto de vista de la maniobrabilidad y velocidad.

Por otro lado, no es difícil encontrar suficiente justificación como para acometer modificaciones de gran porte en sus sistemas actuales, ya que precisamente, el Ministerio de Defensa buscó un buque de segunda mano, por lo tanto, de relativamente bajo coste, con estas características. Además, su papel en el ámbito militar no difiere en exceso del que este buque desempeñaba en su anterior vida civil. El Ysabel es utilizado por el Ejército como buque de apoyo en el transporte de tropas y material en escenarios de paz, como pueden ser ejercicios en territorios insulares o rotaciones en las diferentes misiones que realizan las tropas en zonas colindantes con el Mar Mediterráneo.

Área de gasto	Motor diésel [M€/año]	Motor dual-fuel (diésel-metanol) [M€/año]
Consumo diésel	8,50	0,98
Bunkering diésel	0,82	0,09
Consumo metanol	NA	9,96
Bunkering metanol	NA	0,13
Gasto total	9,32	11,03

Tabla 5-2 Coste por consumo de combustible anual del buque “Ysabel” (autoría propia basado en [100]).

Es por ello, que se propone una solución tipo dual-fuel que combine diésel con metanol. En la Tabla 5-2 se refleja el coste anual debido al consumo de combustible en ambos modos de operación: diésel y diésel—etanol. Se observa que, aunque el precio del metanol es aproximadamente un 40% más barato que el diésel, la eficiencia del motor dual-fuel es mucho más baja que la del motor de combustión interna convencional. Por otro lado, el coste de inversión relativo a la conversión de la planta propulsora del Ysabel, es según diversos estudios de 285 €/kW, lo que se traduce en un coste de inversión inicial de 2,36 millones de €. Por último, el coste anual de mantenimiento y operación de la planta propulsora dual-fuel, supone un gasto de 97.501 €.

Tipo de gasto	Coste
Consumo combustibles	11,03 [M€/año]
Obras de transformación	2,36 [M€]
Mantenimiento y operación	97.501,00 [€]
Gasto total	13,49 [M€]

Tabla 5-3 Cálculo coste total del proyecto dual-fuel del buque “Ysabel” (autoría propia basado en [100]).

Con el objetivo de aproximar el gasto anual por consumo de combustible del motor dual-fuel al que implica el actual diésel, se propone una reducción de velocidad que limite el gasto de combustible del buque. Para ello, teniendo en cuenta que el buque no necesita de grandes velocidades, se reduce la velocidad máxima o de operación del buque de 10 nudos suponiendo una reducción de velocidad (SR) del 44% (ver Figura 5-5).

Los precios actuales, así como la prevista evolución del diésel y el metanol, hace que la conversión a configuración dual-fuel sea injustificable desde un punto de vista únicamente económico si se pretenden mantener las mismas capacidades que con el motor actual. Sin embargo, desde el punto de vista medioambiental, el uso de tecnologías dual-fuel en una proporción de 90% metanol y 10% diésel, reduce las emisiones de elementos contaminantes a la atmósfera de manera que se cumplan las directrices reguladoras de la OMI (ver Figura 5-6).

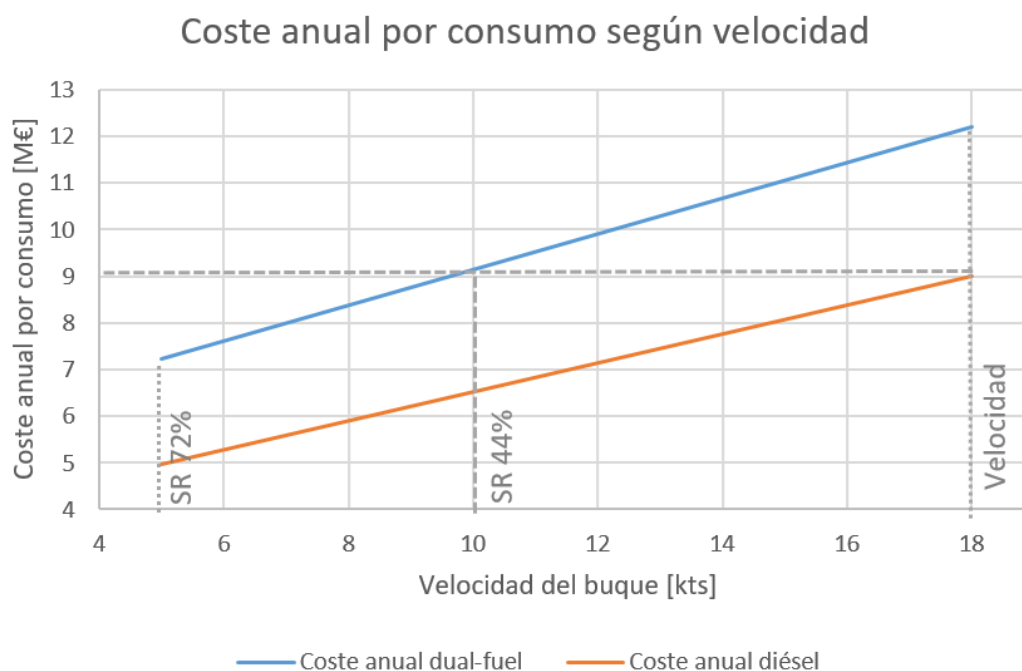


Figura 5-5 Coste anual por consumo según velocidad (autoría propia basado en [100]).

Reducción de emisiones en motor dual-fuel respecto de motor diésel

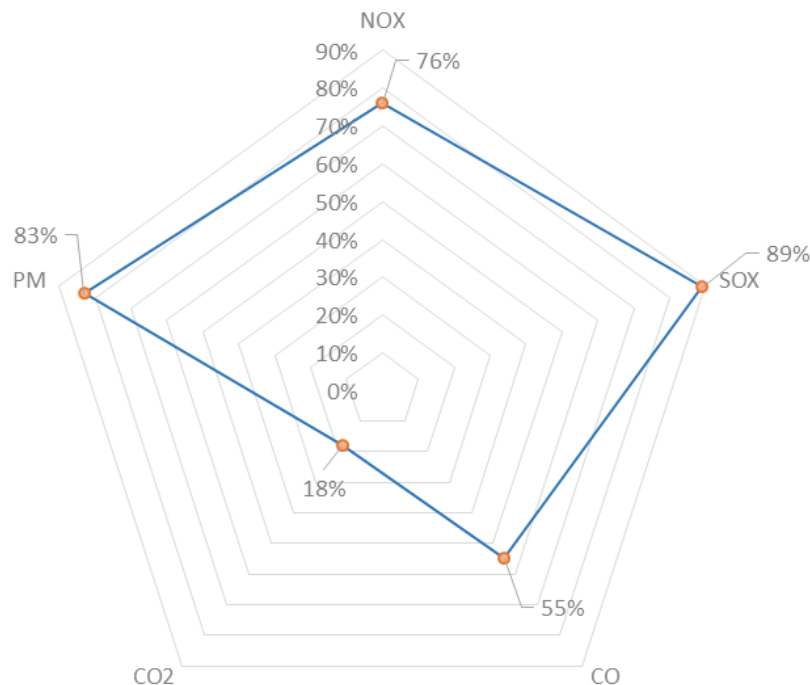


Figura 5-6 Reducción de emisiones al utilizar configuración dual-fuel (autoría propia basado en [100]).

5.3.2 Celdas de hidrógeno en los Buques de Acción Marítima

A lo largo de los anteriores capítulos se han descrito varios combustibles renovables. Basándonos la bibliografía existente, así como en consecuencia de la interpretación de los resultados obtenidos en el

apartado anterior, se propone al hidrógeno como mejor alternativa al DFM utilizado por los buques de La Armada de naturaleza eminentemente militar, como lo son los Buques de Acción Marítima.

Si bien una posible solución a corto plazo pudiera ser el suministro de hidrógeno por medio de empresas externas a La Armada, resulta esencial, por la naturaleza de la institución militar, la capacidad de garantizar la disponibilidad continua y segura de hidrógeno para considerarlo una opción viable desde el punto de vista logístico y estratégico. Para ello, resulta necesario que La Armada cuente con sus propias vías de producción de dicho combustible. La institución, de hecho, cuenta con instalaciones que ofrecen el espacio suficiente para la instalación de plantas electrolíticas productoras de hidrógeno, basadas en energía solar o eólica. Además, a partir de la electrolisis, se obtendría secundariamente oxígeno que podría ser utilizado en otros ámbitos como el médico o el de las operaciones de buceo.

El almacenamiento es otro aspecto clave en el proceso de consumación del hidrógeno como una alternativa viable al DFM en los buques de La Armada. Para ello, es necesario realizar un minucioso análisis de riesgos relativos al almacenamiento de este a bordo de los buques, ya que el ambiente hostil en el que estos barcos militares operan, exige unos estándares de seguridad sustancialmente mayores a los buques civiles.

Como ya se ha mencionado a lo largo de este documento, el hidrógeno tiene más del doble de capacidad calorífica que otros combustibles renovables, como el metanol. Sin embargo, su almacenamiento en estado líquido implica un gran reto tecnológico debido a las necesidades criogénicas de este. Sin embargo, pese a que a día de hoy no hay buques militares que utilicen hidrógeno como combustible principal, su uso en celdas de combustibles instaladas en submarinos es una realidad desde hace varias décadas.



Figura 5-7 Submarino alemán U-31 con sistema AIP de hidrógeno [101].

Al no haber actualmente buques militares operando con hidrógeno, resulta imposible encontrar datos sobre la viabilidad de este combustible en el sector. Sin embargo, La Armada de Estados Unidos declaró en 2014 la consecución de hidrógeno a través de agua del mar como uno de sus proyectos de investigación a llevar a cabo. Pese al evidente interés de la gran potencia militar por el hidrógeno, no lo llegan a considerar como un combustible principal, sino un combustible secundario para situaciones de baja exigencia de potencia para así poder aumentar los días que sus buques pudieran pasar en la mar sin necesidad de reaprovisionamiento [102]. Además, la propulsión mediante celdas de combustible puede contribuir a minimizar la firma acústica del buque que las monte debido a la ausencia de partes móviles que causen vibraciones. Con todo esto, a día de hoy resulta imposible asegurar la viabilidad de estos combustibles en ambientes de combate, donde no se puede prescindir de la potencia disponible.

Por su modo de operar, el tipo de buque militar más adecuado para dar los primeros pasos en la implementación del hidrógeno como una alternativa real al diésel fuel marine es el patrullero oceánico. Las navegaciones de este tipo de buques consisten en patrullas por entornos marítimos de baja intensidad, en las que su permanencia en zona no está tan limitada por el combustible sino por los víveres

almacenados a bordo. Es decir, la pérdida de cierta capacidad de autonomía desde el punto de vista del combustible, no es tan problemática dado que el factor limitante de estos es la capacidad de abastecer de comida a su dotación sin tocar puerto para reabastecerse.

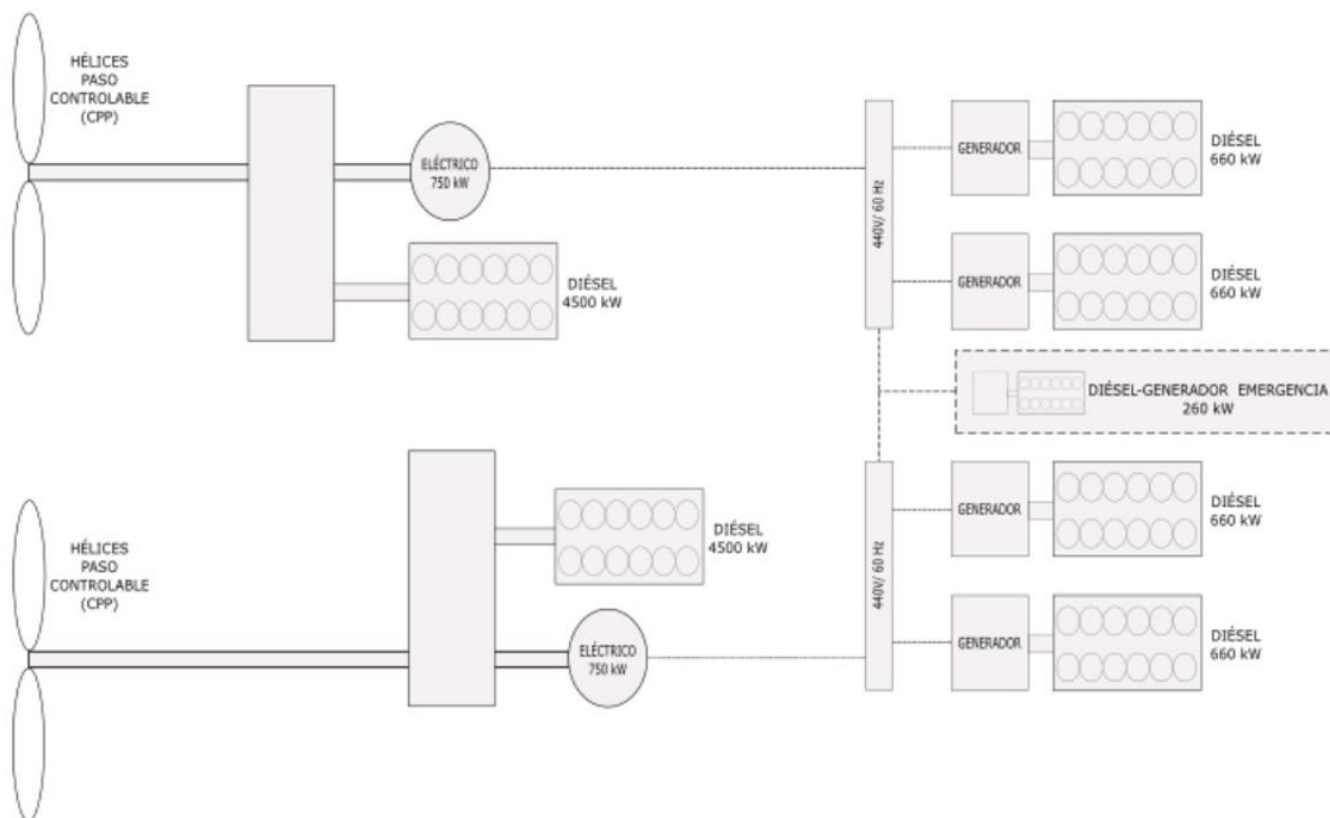


Figura 5-8 Diagrama esquemático planta de propulsión de los BAM [103].

España cuenta actualmente con seis buques de este tipo. Reciben el nombre de Buque de Acción Marítima (BAM) y actualmente operan con un sistema CODOE (ver Figura 5-8). El sistema que equipan está formado por dos motores diésel de 4,5 MW cada uno y dos motores eléctricos de 750 kW alimentados por cuatro DDGG de 660 kW cada uno. La planta de propulsión descrita dota al buque de una velocidad máxima de 19 nudos y una velocidad económica o de crucero de 10 nudos a la que es capaz de navegar hasta 8700 millas. Es en este último modo de operación donde se usan los motores eléctricos, cuya energía necesaria obtenerse igualmente con un sistema de celdas de hidrógeno. En la Tabla 5-4 se expone una propuesta de modificaciones a realizar para los Buques de Acción Marítima de la Armada para sustituir sus DDGG por celdas de hidrógeno.

Requerimientos	Descripción
Fuente de energía	Celda de hidrógeno de 1.5 MW
Propulsión	CODOE
Autonomía	Propulsión eléctrica con hidrógeno - 5000 MN a 10 kts
Almacenamiento	Hidrógeno (gas comprimido) – 12,2 ton
Coste aproximado	• 5 M€ - Instalación de la celda de hidrógeno y adaptación de los tanques de almacenamiento • 40 M€ - Modificaciones estructurales • 4.5 M€ - Apoyo logístico necesario

Tabla 5-4 Modificaciones y propuestas para buques tipo BAM (autoría propia basado en [104]).

6 DISCUSIÓN

Entre los combustibles estudiados para su potencial implantación como fuente de energía para las plantas propulsoras, el metanol se sitúa como la mejor opción en la mayoría de los tipos de buque a los que se ha aplicado el estudio. Desde la perspectiva del TCO, esta tecnología es en todos los casos la opción más competitiva. Por un lado, la madurez de esta tecnología frente a sus competidoras hace que el TCO resultante, unido al relativamente bajo precio del metanol, lo convierte en una de las opciones más prometedoras. Por otro lado, al existir la posibilidad de implementar plantas propulsoras de tipo dual-fuel, se abre un panorama donde existen soluciones intermedias que faciliten en gran medida la paulatina transición, sin necesidad de grandes cambios estructurales, hacia una adopción integral de este u otros combustibles renovables. Sin embargo, los armadores de los buques que se encuentren inmersos en el proceso de transformación de su propulsión pueden ser reticentes al uso del metanol debido a la corrosividad de este, lo que implica un necesario mayor gasto a largo plazo desde el punto de vista del mantenimiento, restando así la rentabilidad de los potenciales proyectos ligados a este combustible.

Por su parte, las pilas de hidrógeno, gracias a su gran eficiencia, permiten que el volumen de hidrógeno necesario a bordo sea sustancialmente menor al volumen necesario por los otros competidores. Esto repercute directamente en el TCO minimizando la pérdida de rentabilidad de la operación de estos buques debido al espacio de carga que se pudiese ver mermado para el almacenamiento a bordo de combustible. Sin embargo, la instalación de celdas de combustible y de los indispensables tanques criogénicos, supone un gasto de inversión considerablemente mayor al asociado a las otras tecnologías. Esto puede suponer un impedimento para las empresas con menor potencial económico para su decantación hacia este tipo de combustibles.

Si bien el transporte y almacenamiento del hidrógeno es el más complicado tecnológicamente, el hecho de que actualmente haya numerosos proyectos en marcha en todo el territorio nacional supone, sin duda, un incentivo desde el punto de vista de las empresas situándolo como la opción preferida entre las estudiadas. En la misma línea, cabe la posibilidad de usar parte de la infraestructura actualmente asociada al gas natural para su transporte y almacenamiento. Además, la tecnología asociada al hidrógeno es considerada fiable y segura. Aunque el hidrógeno tiene asociado ciertos riesgos debido a su alta volatilidad, este no es tóxico para las personas. Además, a diferencia del metanol y el amoníaco, no oxida los materiales habituales en buques, lo que, a largo plazo, supone un beneficio en concepto de cuidados preventivos. Por otro lado, la obtención de hidrógeno mediante electrolisis está enormemente afectada por las fluctuaciones del precio de la electricidad.

Para las empresas con menor capacidad económica a corto plazo, el metanol puede resultar una mejor opción. El coste total de propiedad asociado a este no es suficientemente mayor que el asociado al hidrógeno para descartarlo como una opción adecuada para su implementación a gran escala. Además, la adaptación de los buques actuales que se encuentren operando con diésel, es relativamente sencilla

desde el punto de vista tecnológico, ya que su almacenamiento a bordo es infinitamente más sencillo que el del hidrógeno, que necesita de temperaturas criogénicas y materiales capaces de soportar elevadas presiones. Asimismo, el metanol es actualmente el cuarto combustible más utilizado por la flota nacional, lo que sin duda aporta confianza a las empresas que eventualmente se enfrenten a esta transición hacia combustibles menos perjudiciales para el medio ambiente.

El amoniaco, pese a no ser la mejor opción desde la perspectiva del coste total de propiedad, es una opción viable para buques pertenecientes a empresas con menor capacidad económica que operen buques antiguos propulsados con diésel debido a la posibilidad de implementarlo en configuraciones dual-fuel sin mayores retos ingenieriles. Parece correcto por tanto, situar al amoniaco junto al metanol, como una posible opción intermedia para barcos con plantas propulsoras antiguas.

Por último, desde el punto de vista militar, es importante tener en cuenta la importancia de dotar a los buques militares de las mejores capacidades tácticas posibles, así como la imprescindible necesidad de asegurar una situación logística que asegure la disponibilidad de combustible en cualquier momento y lugar del mundo. Por ello, no todos los buques militares son actualmente plataformas válidas para la implementación de combustibles renovables. Es por esto que, los buques considerados de primera línea, como lo son las fragatas o los anfibios, no se considera a corto plazo la transformación de sus plantas propulsoras, bien por motivos tácticos o bien por motivos logísticos. Sin embargo, la Armada cuenta con numerosos patrulleros cuyo modo de operación admite unas menores capacidades relativas a la velocidad y maniobrabilidad del buque. Para estos buques de segunda línea, los llamados Buques de Acción Marítima, la implementación de celdas de combustible con hidrógeno no se considera simplemente una posibilidad factible, sino que además esta tecnología puede dotar a dichos buques de nuevas capacidades tácticas que resultan ciertamente interesantes en estos días de creciente preocupación sobre la guerra antisubmarina por parte de las grandes potencias militares.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En la presente sección, se exponen las conclusiones alcanzadas a lo largo de este estudio. Así mismo, se llevará a cabo un análisis del nivel de cumplimiento de los objetivos establecidos previamente. Para finalizar el trabajo, se proponen líneas futuras para continuar con la investigación sobre los combustibles alternativos y su aplicación al sector marítimo.

7.1 Conclusiones

Tras aplicar los análisis del DAFO y del TCO, a diferentes combustibles renovables, como son el metanol, amoníaco e hidrógeno tanto en motores de combustión interna como en celdas de combustible, se concluye que, el metanol es la alternativa más plausible para su incorporación a la flota marítima española, adoptando en el corto-medio plazo configuraciones dual-fuel, relegando las plantas puras de metanol para buques de nueva construcción o bien, para aquellos que estén en proceso de realizar grandes reparaciones o mantenimientos.

A lo largo del estudio, se constata fehacientemente que el hidrógeno, implementado junto con celdas de combustible es la mejor opción debido a sus características desde el punto de vista de la seguridad, capacidad calorífica, suministro, rendimiento y emisiones. En contrapartida, la enorme complejidad que implica su almacenamiento y transporte, debido principalmente a las necesidades criogénicas de este, lo hace menos atractivo desde el punto de vista económico proporcionado por el TCO.

Por otro lado, el presente estudio tenía como objetivo identificar plataformas navales militares que fueran susceptibles para la implantación de combustibles renovables. Para ello, no solo se han considerado características económicas y/o medioambientales, sino que, además, en ciertos casos según el tipo de buque, se ha considerado como prioridad sobresaliente las capacidades operacionales derivadas del uso de estos potenciales combustibles alternativos. Tras esta evaluación se han identificado dos plataformas como especialmente adecuadas para implementar diferentes combustibles renovables: los Buques de Acción Marítima y el transporte logístico “Ysabel A-06”.

Así, se ha planteado la posibilidad de incorporar celdas de combustible en los Buques de Acción Marítima operados por la Armada, para su uso en patrullas a baja velocidad. El objetivo principal es impulsar un cambio en el ámbito militar hacia tecnologías sostenibles que, además, doten a las diferentes unidades de ventajas tácticas y logísticas como lo son la reducción de la firma acústica o la disminución del tamaño de las cámaras de máquinas. En la misma línea, se ha identificado como plataforma idónea para una solución intermedia, de tipo dual-fuel, al buque de transporte logístico del Ejército de Tierra “Ysabel”.

Por lo tanto, en relación con el cumplimiento de los objetivos planteados, se ha conseguido identificar de manera exitosa el combustible alternativo cuya implantación en el sector marítimo

nacional es más viable, tanto desde el punto de vista tecnológico como económico, de entre aquellos que se encuentran actualmente en desarrollo.

Igualmente, se ha alcanzado con éxito el objetivo relativo al estudio e identificación de los buques operados por la Armada cuya adaptación al uso de los combustibles renovables es más viable. Así como el de proponer modificaciones en dichas plataformas para su adecuación al uso de los combustibles propuestos.

7.2 Líneas futuras

Del presente estudio surgen diversas líneas de investigación que se consideran de interés y que no se han estudiado en profundidad. Se plantean así, con el objetivo de dar continuidad al estudio sobre los combustibles renovables, algunas posibles áreas de trabajo e investigación para futuros trabajos:

- Diseñar y modelar un posible diseño para las cámaras de máquinas de los Buques de Acción Marítima sustituyendo los actuales motores diésel-generadores por celdas de combustible que suministren al motor eléctrico la energía necesaria para su funcionamiento.
- Estudiar la viabilidad de implantar tecnologías dual-fuel en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar, por ser estas una plataforma idónea para investigación en proyectos de posible aplicación en otros buques de la Armada.
- Analizar las modificaciones necesarias en los buques de aprovisionamiento logístico (AOR) encargados de la transferencia de combustible a buques militares en la mar, para su operación con diferentes combustibles renovables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Maugeri, «The age of oil: the mythology, history, and future of the world's most controversial resource», *Choice Reviews Online*, vol. 44, n.º 05, pp. 44-2726-44-2726, ene. 2007, doi: 10.5860/CHOICE.44-2726.
- [2] Observatorio del Transporte y la Logística en España, «Informe Anual 2021».
- [3] R. Gutierrez Fraile, «Nuevos combustibles ecológicos para buques», Asociación de Navieros Españoles.
- [4] United States Environmental Protection Agency, «Profile of the Fossil Fuel Electric Power Generation Industry.» 1997.
- [5] J. Quereda Sala y E. Montón Chiva, «Dióxido de carbono y clima en el litoral mediterráneo», *Ingeo*, n.º 16, p. 5, dic. 1996, doi: 10.14198/INGEO1996.16.07.
- [6] E. Piguet, A. Péroud, y P. de Guchtenerire, «Migración y cambio climático», *Migraciones. Publicación del Instituto Universitario de Estudios sobre Migraciones*, n.º 30, Art. n.º 30, 2011.
- [7] T. Altamirano, *Refugiados ambientales: Cambio climático y migración forzada*. Fondo Editorial de la PUCP, 2021.
- [8] J. Ferrís y Cols, «Enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica por combustibles fósiles. Aspectos pediátricos.», *Revista de Especialistas Pediátricos*, n.º 2011.
- [9] O. M. I. Comité de protección del medio marino, «Estrategia de 2023 sobre la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques». julio de 2023.
- [10] «Pacto Verde Europeo». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>
- [11] R. et. al, *Power Plant Engineering*.
- [12] A. Limited, «steam engine steamboat Fulton, Claremont Stock Photo - Alamy». Accedido: 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.alamy.com/stock-photo-steam-engine-steamboat-fulton-claremont-31028156.html>
- [13] J. C. Palacios, «Desarrollo tecnológico en la Primera Revolución Industrial», vol. 17, 2004.
- [14] D. M. Guerra, «Sadi Carnot», *Prisma Tecnológico*, vol. 12, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2021, doi: 10.33412/pri.v12.1.2984.

- [15] F. Payri González y J. M. Desantes Fernández, «Motores de combustión interna alternativos», en Colección Académica. Editorial Universitat Politècnica de València, jun. 2011. Accedido: 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/70998>
- [16] M. Janbozorgi, K. E. Far, y H. Metghalchi, «Combustion Fundamentals», en Handbook of Combustion, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 0-0. doi: 10.1002/9783527628148.hoc001.
- [17] MrMotor, «Entendiendo la Combustión Interna: El corazón de los motores ->». Accedido: 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://combustioninterna.com/entendiendo-la-combustion-interna-el-corazon-de-los-motores-de-combustion/>
- [18] Aakko-Saksa, K. Lehtoranta, y N. Kuittinen, «Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options.», Progress in Energy and Combustion Science, 2023.
- [19] A. Lefebvre, Gas Turbine Combustion, Purdue University. School of Mechanical Engineering.
- [20] Peña-Martínez et. al, «Pilas de combustible», Revista de la Sociedad Española de Química, 2006.
- [21] «Pilas de combustible». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/hidrogeno-pilas-de-combustible>
- [22] Armada, «Submarinos S-80». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessubmarinos/prefLang-es/02s80>
- [23] Navantia, «Submarinos». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/lineas-de-negocio/submarinos/#ficha>
- [24] Revista de Ingeniería Naval, «BAM, Buque de Acción Marítima», n.º Junio 2011.
- [25] Armada, «Buques de Acción Marítima». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/10buques-accion-maritima--05buque-accion-maritima-audaz-p45>
- [26] M. Ragheb, «Nuclear Naval Propulsion», en IntechOpen, 2011. doi: 10.5772/19007.
- [27] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales «Aspectos actuales de la propulsión naval nuclear», 2001.
- [28] «World Nuclear Association». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://world-nuclear.org/>
- [29] «Fuel consumption in the EU-27, per fuel type — European Environment Agency». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/fuel-consumption-trends-per-fuel-type-2>
- [30] Greenpeace, «Carbón», Greenpeace España. Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/carbon/>
- [31] «Tipos de combustible y emisiones de GEI — Agencia Europea de Medio Ambiente».
- [32] T. S. Hunter, «Historical perspectives on the global petroleum economy», en Research Handbook on Oil and Gas Law, Edward Elgar Publishing, 2023, pp. 2-32. Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781788978224/book-part-9781788978224-6.xml>
- [33] Agencia Europea de Medio Ambiente «Tipos de combustible y emisiones de GEI ». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/infografia/tipos-de-combustible-y-emisiones/view>

- [34] C. Fong Reynoso, «La Crisis del Golfo Pérsico, crisis del petróleo», Carta Económica Regional, n.º 14, pp. 47-49, 1990.
- [35] REPSOL, «Octanaje: qué es, cómo se mide y diferencias en gasolina». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/octanaje-octano/>
- [36] A. Pino y R. G. Mur, «Proceso de refino del petróleo para la obtención de combustibles marinos».
- [37] R. Viskup et. al, «Diesel and gasoline engines».
- [38] S. Cuasquer Cuasapud, D. Pineda Maigua, y E. Álvarez Jaramillo, «Ventaja del uso de gas licuado del petróleo en comparación al sistema de combustible tradicional.», Dominio de las ciencias, vol. 8, n.º 3, 2022.
- [39] R. S. Kraus, Petróleo y gas natural. en Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.
- [40] I. Ramírez, N. Vela, y J. J. Rincón, «Biodiesel, un combustible renovable», Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, n.º 55, Art. n.º 55, ago. 2012, doi: 10.33064/iycuua2012554064.
- [41] K. C. Corkwell, M. M. Jackson, y D. T. Daly, «Review of Exhaust Emissions of Compression Ignition Engines Operating on E Diesel Fuel Blends», SAE Transactions, vol. 112, pp. 2638-2653, 2003.
- [42] J. R. Q. González, «El hidrógeno como combustible alternativo en la producción de energía y su implementación en el transporte vehicular», L'esprit Ingénieux, vol. 4, n.º 1, Art. n.º 1, 2013, Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/853>
- [43] Labster, «Electrólisis del agua». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://theory.labster.com/es/water-electrolysis/>
- [44] N. Martín Sánchez, «Obtención de hidrógeno mediante gasificación de sólidos carbonosos con vapor y agua supercrítica», Universidad de Salamanca, 2014. doi: 10.14201/gredos.124568.
- [45] «¿Qué es el hidrógeno verde?», iAgua. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-hidrogeno-verde>
- [46] A. G. García-Conde, «Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno».
- [47] R. Villa Caro, «Buques impulsados por gas natural licuado. Entrada en vigor del código IGF», Revista General de Marina.
- [48] J. Marcelo Arias, «Gas natural licuado. Tecnología y mercado», Instituto Argentino de la Energía «General Mosconi».
- [49] A. García Coterillo, «Estudio sobre la reducción de emisiones NOx Y SOx», Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Náutica.
- [50] J. Núñez, «Biometano, combustible renovable para la transición energética y la descarbonización de la economía en Colombia», Boletín El Palmicultor, vol. 610, n.º diciembre, Art. n.º diciembre, dic. 2022.
- [51] «¿Qué son los biocombustibles avanzados? Tipos y principales ventajas», REPSOL. Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshhtml>
- [52] M. D. Cortés-Sánchez, E. M. Gata-Montero, y A. Pipió-Ternero, «Biocombustibles: tipos y estrategias de producción.» Universidad Pablo de Olavide.

- [53] J. M. Campos Martín et. al, «Biocombustibles», Biofuels, dic. 2020, Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/226100>
- [54] M. E. Dómine, A. Fernández-Arroyo Naranjo, y J. M. López Nieto, «Proceso catalítico para la producción de hidrocarburos y compuestos aromáticos a partir de compuestos oxigenados presentes en mezclas acuosas», nov. 2019, Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/244995>
- [55] «Motor MAN B&W de dos tiempos que funciona con amoníaco», Cátedra Cosme Álvarez de los Ríos. Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.catedracosmealvarez.com/motor-man-bw-de-dos-tiempos-que-funciona-con-amoniaco/>
- [56] J. M. Álvarez Reyes, «Análisis de implementación de amoníaco como combustible para la propulsión de buques mercantes», 2022, Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/31840>
- [57] J. Díaz Lorenzo, «La propulsión por amoníaco podría ser una realidad en 2026», Puente de Mando. Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.puentedemando.com/la-propulsion-por-amoniaco-podria-ser-una-realidad-en-2026/>
- [58] E. Malmgren, «Towards Sustainable Shipping: Climate change and other environmental perspectives on carbon-based marine electrofuels and onboard carbon capture», Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2023.
- [59] «HyMethShip – Grüne Wende auf hoher See». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hymethship.com/index.html>
- [60] «UNE-EN ISO 20519:2017» Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059235>
- [61] «Bunkering de combustibles alternativos para buques», Revista Ingeniería Naval. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sectormaritimo.es/bunkering-de-combustibles-alternativos-para-buques>
- [62] «Bunkering», Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.puertosdetenerife.org/negocio/bunkering/>
- [63] «LNG Bunkering methods», Scientific Diagram. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/LNG-Bunkering-methods-a-ship-to-ship-method-b-truck-to-ship-method-and-c-pipe-to_fig2_351753710
- [64] U. Nations, «Conferencias sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible». Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/conferences/environment>
- [65] «Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques», MARPOL. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- [66] «Normativa marítima» Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/marina-mercante/marco-referencia-sector/normativa-maritima>
- [67] «Zonas especiales en virtud del Convenio MARPOL». Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Default%20\(9\).aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Default%20(9).aspx)

- [68] «New SOx regulation affects 70.000 ships», Purenviro. Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.purenviro.com/en/2018/09/11/new-sox-regulation-affects-70-000-ships/>
- [69] «OMI 2020: el límite de azufre en el combustible entra en vigor el 1 de enero». Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
- [70] C. Sigalas, «Financial impact of the IMO 2020 regulation on dry bulk shipping», Maritime Transport Research, vol. 3, p. 100064, ene. 2022, doi: 10.1016/j.martra.2022.100064.
- [71] «Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13». Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- [72] «IMO NOx Tier III emission standards for NECA - Berger Maritiem». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.bergermaritiem.nl/nox_tier_iii_neca
- [73] U. Nations, «COP28: La acción por el clima no puede esperar | Naciones Unidas», United Nations. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/cop28>
- [74] «C2X». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.c2xglobal.com/>
- [75] Cepsa, CEPESA.com. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepasa.com/es/prensa/cepasa-y-c2x-desarrollaran-la-mayor-planta-de-metanol-verde>
- [76] «Archivo:Maersk Group Logo.svg - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maersk_Group_Logo.svg
- [77] «Web de La Moncloa». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Paginas/2023/011223-sanchez-acuerdo-cepasa-c2x.aspx>
- [78] «Web de Iberdrola». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>
- [79] CEPESA, «El Valle Andaluz del Hidrógeno Verde». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepasa.es/es/utilidades/catalogo/hidrogeno-verde/valle-andaluz>
- [80] «Hidrógeno renovable», REPSOL. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cartagena.repsol.es/es/actualidad/parada-2021112/index.cshtml>
- [81] «Fourth Greenhouse Gas Study 2020». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- [82] «MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic». Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/shipid:6015/zoom:15>
- [83] S. Horvath, M. Fasihi, y C. Breyer, «Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040», Energy Conversion and Management, vol. 164, pp. 230-241, may 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.098.
- [84] A. D. Korberg, S. Brynolf, M. Grahn, y I. R. Skov, «Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 142, p. 110861, may 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110861.

- [85] E. Malmgren, S. Brynolf, E. Fridell, M. Grahn, y K. Andersson, «The environmental performance of a fossil-free ship propulsion system with onboard carbon capture – a life cycle assessment of the HyMethShip concept», *Sustainable Energy Fuels*, vol. 5, n.º 10, pp. 2753-2770, may 2021, doi: 10.1039/D1SE00105A.
- [86] «Technology Data for Renewable Fuels», The Danish Energy Agency. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-renewable-fuels>
- [87] M. Fasihi, O. Efimova, y C. Breyer, «Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants», *Journal of Cleaner Production*, vol. 224, pp. 957-980, jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.
- [88] J. Ikäheimo, J. Kiviluoma, R. Weiss, y H. Holttinen, «Power-to-ammonia in future North European 100 % renewable power and heat system», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, n.º 36, pp. 17295-17308, sep. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.121.
- [89] NCE Maritime CleanTech, «Norwegian future value chains for liquid hydrogen».
- [90] «Technology Data for Energy Storage», The Danish Energy Agency. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-energy-storage>
- [91] M. Taljegard, S. Brynolf, M. Grahn, K. Andersson, y H. Johnson, «Cost-Effective Choices of Marine Fuels in a Carbon-Constrained World: Results from a Global Energy Model», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, n.º 21, pp. 12986-12993, nov. 2014, doi: 10.1021/es5018575.
- [92] A. Kiani, M. Lejeune, C. Li, J. Patel, y P. Feron, «Liquefied synthetic methane from ambient CO2 and renewable H2 - A technoeconomic study», *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 94, p. 104079, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jngse.2021.104079.
- [93] «Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells – Analysis - IEA». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>
- [94] «International Energy Outlook 2023 - U.S. Energy Information Administration (EIA)». Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/index.php>
- [95] «Previsión precio del petróleo hoy I Precio petróleo 2023 - 2030». Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://capex.com/es/prevision/petroleo-precio>
- [96] «Estructura de la flota española a 10.11.2020», Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/marina-mercante/informacion-estadistica/registro-maritimo-espanol>
- [97] M. Koričan, N. Vladimir, y A. Fan, «Investigation of the energy efficiency of fishing vessels: Case study of the fishing fleet in the Adriatic Sea», *Ocean Engineering*, vol. 286, p. 115734, oct. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115734.
- [98] «Electrification of fishing vessels and their integration into isolated energy systems with a high share of renewables - ScienceDirect». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623031554>
- [99] N. de Vries, «Safe and effective application of ammonia as a marine fuel», 2019, Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Abe8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8>

- [100] C. Raucci, «The potential of hydrogen to fuel international shipping», Doctoral, UCL (University College London), 2017. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1539941/>
- [101] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, y D. A. Hudson, «A Comparison of Hydrogen and Ammonia for Future Long Distance Shipping Fuels», 2020.
- [102] S. Wu, B. Miao, y S. H. Chan, «Feasibility assessment of a container ship applying ammonia cracker-integrated solid oxide fuel cell technology», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n.º 63, pp. 27166-27176, jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.068.
- [103] J. Kopasz, «Hydrogen for maritime applications», Argonne National Laboratory, 2022.
- [104] «Lista Oficial de Buques de la Armada. 2023». Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/mardigitaldocinstituc/prefLang-es/00docu-institucional-armada+--04lista-oficial-buques-armada>
- [105] «Foro Naval | Nos vemos en los puertos del mundo». Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://foronaval.com/>
- [106] «Web de la Armada - BTL “YSABEL”». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/11buques-auxiliares--07buque-transporte-logistico-ysabel-a-06>
- [107] N. R. Ammar, «An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 69, pp. 66-76, abr. 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.02.001.
- [108] «1 Submarine Squadron». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bundeswehr.de/en/organization/navy/organization/flotilla-1/1-submarine-squadron>
- [109] C. Harress, «A Navy Powered By The High Seas», *International Business Times*. Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibtimes.com/goodbye-oil-us-navy-cracks-new-renewable-energy-technology-turn-seawater-fuel-allowing-1568455>
- [110] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, «Sistemas de propulsión combinada», 2023.
- [111] N. Pessanha Santos, «Hydrogen in the Portuguese Navy: A case study», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n.º 66, pp. 28684-28698, ago. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.180.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis tecno-económico para estudiar la viabilidad de la adopción a gran escala de combustibles alternativos tanto en el sector marítimo español como en las unidades de la Armada.

La implementación de dichos combustibles reduciría drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como otros agentes contaminantes, asociados a la navegación y en concreto, al transporte marítimo. Esto supondría una inestimable contribución a la disminución del calentamiento global. Este tema es tratado en los apartados correspondientes a “Combustibles fósiles” y “Normativa: Convenio MARPOL”.

La reducción de las emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles a bordo de los buques, que actualmente suponen el 3% de los GEI emitidos a la atmósfera a nivel mundial, tendría, sin lugar a dudas, un impacto positivo en la calidad del aire y por tanto, en la salud de las personas. Además, el impulso de nuevos proyectos relacionados con los combustibles renovables puede fomentar la creación de empleo a nivel nacional, no solo en el sector energético, sino también en todo el entramado industrial y logístico que lo acompaña.

Desde la perspectiva económica, si bien la inversión inicial puede ser cuantiosa, especialmente en el caso de las pilas de hidrógeno, a largo plazo esta inversión sería recuperada teniendo en cuenta el previsible descenso de los precios de estos nuevos combustibles una vez se haya asentado la tecnología que los rodea. Además, reduce la dependencia del país de aquellos que son productores de petróleo, el cual a día de hoy es indispensable para el normal funcionamiento de la sociedad y que se pretende, paulatinamente, sustituir por otros combustibles más responsables con el medio ambiente.

Por último, la adopción por parte de la Armada de combustibles renovables, puede contribuir a mejorar la imagen que, ciertos sectores sociales, tienen de las Fuerzas Armadas y en particular de la Armada.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El presente estudio abre un diálogo ético y social de especial relevancia en el la sociedad actual. En primer lugar, la motivación detrás de esta investigación nace de una conciencia creciente sobre la urgencia de abordar los desafíos ambientales y, en concreto, las emisiones de gases de efecto invernadero. Siendo el compromiso de construir una sociedad responsable con el medio ambiente una obligación ética hacia las generaciones futuras.

La evolución histórica de los combustibles y la propulsión marina expuesta en el capítulo hace referente a los “Métodos de propulsión naval”, destacando la necesidad de adaptación a combustibles renovables en línea con la normativa ambiental, no solo representa una evolución técnica, sino también un avance ético al buscar soluciones más respetuosas con el entorno marino y global.

La Metodología empleada, centrada en el Costo total de propiedad (TCO) y el Análisis DAFO, plantea cuestionamientos éticos y sociales fundamentales: ¿Cómo se ponderan los beneficios económicos frente a los impactos ambientales y sociales? ¿Cuáles son los valores éticos y sociales sobre los que se sustenta la toma de decisiones sobre la transición hacia los combustibles renovables en el sector marítimo? La inclusión de estos aspectos éticos y sociales a lo largo del estudio recalca la gran consciencia medioambiental actual.

Además de cifras económicas, los resultados y alternativas presentadas muestran las posibles implicaciones para la Armada y la sociedad en general. ¿Cómo afectaría esta transición a la seguridad nacional y a las capacidades operativas de la Armada? ¿Cuál sería el impacto en las empresas del sector, así como las actividades que prenden de estas? Estas preguntas resaltan, una vez más, la necesidad de considerar no solo el aspecto técnico y económico, sino también los aspectos éticos y sociales asociados a la implementación de combustibles renovables.

Finalmente, la sección de Discusión, consolida las reflexiones éticas y sociales planteadas a lo largo del documento, presentando los resultados de manera accesible para el lector. Por último, el punto correspondiente a “Conclusiones y líneas futuras” propone un escenario de reflexión ética continua al proponer futuras líneas de investigación, indicando la necesidad de un enfoque ético y social en futuros trabajos sobre este sector en constante evolución. En resumen, este estudio no solo representa un análisis tecno-económico sobre la transición hacia nuevos tipos de combustibles no fósiles, sino que también invita a la reflexión ética y social en un sector crucial para el desarrollo sostenible.