



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Propulsión naval sostenible: retos y desarrollos para su
implementación en buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Lara Llopis Valero
DIRECTOR: Rocío Maceiras Castro
CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Propulsión naval sostenible: retos y desarrollos para su
implementación en buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El cambio climático y la degradación ambiental son preocupaciones crecientes en la sociedad actual, lo que ha llevado a una mayor conciencia y responsabilidad en cuanto a la necesidad de adoptar prácticas sostenibles. La Unión Europea ha establecido el objetivo de lograr la neutralidad climática en 2050, lo que implica una significativa reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en todos los sectores, incluyendo el de la Defensa. Para alcanzar esta meta, se están promoviendo las energías renovables, la economía circular y la eficiencia energética. El ministerio de Defensa también está involucrado en este esfuerzo y está tomando medidas para reducir la huella de carbono en las operaciones militares y mejorar la sostenibilidad en la adquisición y mantenimiento de equipos.

El presente estudio tiene como objetivo identificar el combustible alternativo más prometedor entre los que se encuentran en desarrollo para su posible implementación en la Armada, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar sus capacidades. Para lograrlo, se empleará un método de toma de decisiones que permita determinar la opción de combustible más viable. Además, se realizará un análisis de los buques de la Armada para identificar la plataforma más adecuada en términos económicos de consumo de combustible, a fin de implementar el combustible seleccionado de manera efectiva.

PALABRAS CLAVE

Combustible, Armada, Propulsión, Hidrógeno, PAJ.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo incondicional durante estos seis años de formación. Especialmente quiero reconocer a mi abuelo Joaquín Valero Santo, Capitán de la marina mercante, quien ha sido mi principal inspiración en la vida marítima y mi motivación para seguir adelante en mi carrera. También agradezco a mi padre, quien siempre ha sido mi ejemplo a seguir por su perseverancia y trabajo duro, y espero poder parecerme a él en un futuro cercano.

Además, quiero agradecer a mi madre y a sus compañeros de la JAL que me han facilitado muchos datos importantes para este trabajo, y a mis hermanas por su paciencia y preocupación durante estos años, especialmente en los momentos más difíciles de mi formación. Su amor y apoyo incondicional han sido fundamentales para que pueda llegar hasta donde estoy ahora.

En segundo lugar, a mis dos promociones, la 422-152 y la 423-153, por enseñarme el verdadero significado del compañerismo, y por acogerme y acompañarme durante estos últimos años. Ha sido un honor para mí formar parte de dos promociones tan increíbles, y estos años juntos han estado llenos de aventuras y alegrías que han hecho de mí una persona más fuerte y valiente. Quiero agradecer en especial a mi amiga Rocío García Abad, quien me ha acompañado durante estos seis años y ha sido una persona indispensable para mí. Sin ella, mi experiencia no habría sido la misma.

Por último, a mi tutora, Rocío Maceiras Castro, por su apoyo constante y orientación durante todo el desarrollo de mi trabajo. Su motivación y guía fueron fundamentales para alcanzar los objetivos que me había propuesto. Asimismo, quiero agradecer a las profesoras María Álvarez Hernández y Débora Cores, cuya ayuda fue crucial para que pudiera descifrar el método matemático del Proceso Analítico Jerárquico. Sin ellas, no habría sido posible completar este trabajo con éxito.

CONTENIDO

Contenido.....	1
Índice de Figuras.....	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	8
1.1 Justificación y motivación.....	8
1.2 Objetivos.....	9
1.3 Estructura del proyecto.....	9
2 Estado del arte.....	10
2.1 Contextualización.....	10
2.2 Fuentes de energía.....	11
2.2.1 Combustibles alternativos.....	11
2.2.1.1 Ventajas e inconvenientes de combustibles alternativos.....	12
2.2.1.2 GNL.....	12
2.2.1.3 Hidrógeno.....	13
2.2.1.4 Amoníaco.....	15
2.2.1.5 Biocombustibles.....	15
2.2.2 Otras fuentes de energía renovables.....	17
2.3 Normativa en vigor.....	18
2.3.1 Convenio MARPOL.....	18
2.3.1.1 ANEXO VI.....	19
2.3.2 Eficiencia Energética.....	21
2.3.2.1 Adaptación del EEOI a la Armada.....	22
2.4 Sistemas de propulsión naval actuales.....	23
2.4.1 Antecedentes.....	23
2.4.2 Sistemas de propulsión.....	24
2.4.2.1 Propulsión diésel.....	25
2.4.2.2 Propulsión eléctrica.....	25
2.4.2.3 Turbina de gas.....	26
2.4.2.4 Propulsión nuclear.....	27
2.4.2.5 Propulsión combinada.....	28
2.4.2.5.1 Combined Diesel And Diesel (CODAD).....	28
2.4.2.5.2 Combined Diesel Or Gas (CODOG).....	29
2.4.2.5.3 Combined Diesel And Gas (CODAG).....	30

2.4.2.5.4 Combined Gas And Gas (COGAG).....	30
2.4.2.5.5 Combined Gas or Gas (COGOG).....	31
2.4.2.5.6 Combined Steam And Gas (COSAG).....	31
2.4.2.5.7 Combined Diésel Electric Or Gas (CODLOG).....	32
2.4.2.5.8 Combined Diesel Electric And Gas (CODLAG).....	32
2.4.2.5.9 Combined Diesel Or Electric (CODOE).....	33
3 Desarrollo del TFG.....	35
3.1 Comparación de combustibles alternativos.....	35
3.1.1 Seguridad.....	36
3.1.2 Disponibilidad a nivel global.....	38
3.1.3 Capacidad de suministro.....	39
3.1.4 Durabilidad.....	40
3.1.5 Adaptabilidad.....	41
3.1.6 Efecto en el rendimiento del motor.....	42
3.1.7 Efecto en las emisiones del motor.....	43
3.1.8 Enfoque económico.....	43
4 Resultados y discusión.....	45
4.1 Proceso Analítico Jerárquico.....	45
4.1.1 Jerarquía del problema.....	47
4.1.2 Matriz de comparaciones pareadas.....	48
4.1.3 Cálculo del vector propio y ponderación de las alternativas.....	48
4.1.1 Consistencia de las alternativas.....	49
4.1.1 Elección de alternativa óptima.....	51
4.2 Evaluación de combustibles alternativos.....	51
4.2.1 Selección de criterios de comparación.....	51
4.2.1 Investigación del combustible óptimo de la Armada.....	53
4.2.1.1 Disponibilidad en los buques de la Armada.....	58
4.2.1.1.1 Diesel Fuel Marine (F-76).....	60
4.2.1.1.2 Estudio económico del consumo.....	61
4.2.1.1.3 Méndez Núñez como plataforma óptima.....	64
5 Conclusiones y líneas futuras.....	66
5.1 Conclusiones.....	66
5.2 Líneas futuras.....	67
6 Bibliografía.....	68
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales.....	73

Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	74
Anexo III: Evaluación de criterios	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Pacto Verde Europeo con visión hacia un desarrollo sostenible (autoría propia).....	10
Figura 2-2 Reducción emisiones CO ₂ mediante combustibles alternativos (autoría propia)	11
Figura 2-3 Reducción de emisiones empleando GNL (autoría propia)	13
Figura 2-4 Rutas de producción del hidrógeno a partir de recursos energéticos (autoría propia) ...	14
Figura 2-5 Clasificación del hidrógeno (autoría propia).....	14
Figura 2-6 Combustibles derivados de fuentes fósiles (autoría propia basado en [3])	16
Figura 2-7 Biocombustibles empleados en combustión interna (autoría propia basado en [3]).....	17
Figura 2-8 Fuentes de energía renovables (autoría propia)	18
Figura 2-9 Emblema Organización Marítima Internacional	18
Figura 2-10 Anexos MARPOL.....	19
Figura 2-11 Zonas de Control de Emisiones a nivel mundial [18]	20
Figura 2-12 Límites emisiones SO _x basado en [19]	20
Figura 2-13 Límites de emisión NO _x [21].....	21
Figura 2-14 Medidas implantadas por la OMI.....	22
Figura 2-15 Pintura sobre papiro Antiguo Egipto [24]	23
Figura 2-16 Clermont, primer barco de vapor [25].....	24
Figura 2-17 Sistemas de propulsión marítima (autoría propia)	24
Figura 2-18 BAA Galicia L-51 (Armada Española) [28]	25
Figura 2-19 Fuentes de obtención de electricidad (autoría propia basado en [29]).....	25
Figura 2-20 ENRPO-CAZAMINAS Clase Segura (Armada Española) [31].....	26
Figura 2-21 Primera turbina de gas marina en el petrolero Auris, 1951 [32]	26
Figura 2-22 Fragata Clase Santa María, Victoria F-82 (Armada Española) [28].....	27
Figura 2-23 Pintura USS Nautilus (SSN-571 [36])	27
Figura 2-24 Distribución de propulsión por tipo de plataforma (autoría propia basado en [38])....	28
Figura 2-25 Esquema CODAD (autoría propia)	29
Figura 2-26 Esquema CODOG (autoría propia).....	29
Figura 2-27 Fragata Clase Álvaro de Bazán F-104 (Armada Española)	29
Figura 2-28 Esquema CODAG (autoría propia)	30
Figura 2-29 Esquema COGAG (autoría propia).....	30
Figura 2-30 Esquema COGOG (autoría propia).....	31
Figura 2-31 Esquema COSAG (autoría propia).....	31
Figura 2-32 Esquema CODLOG (autoría propia)	32
Figura 2-33 Esquema CODLAG (autoría propia)	32
Figura 2-34 F-110 (Armada Española) [40]	33

Figura 2-35 Esquema CODOE (autoría propia)	33
Figura 2-36 BAM Clase Meteoró P-41 (Armada Española) [28]	33
Figura 3-1 Propiedades de los combustibles alternativos (autoría propia)	36
Figura 3-2 Evaluación de seguridad combustibles alternativos	37
Figura 3-3 Buque de suministro Viking Energy alimentado con GNL [42]	38
Figura 3-4 Ferry de hidrógeno [45]	39
Figura 3-5 Disponibilidad global combustibles alternativos	39
Figura 3-6 Futuro buque de hidrógeno GAIA [48]	40
Figura 3-7 Valoración capacidad de suministro	40
Figura 3-8 Adaptabilidad de los combustibles alternativos	41
Figura 3-9 Evaluación combustibles alternativos en el rendimiento del motor	42
Figura 3-10 Efecto de los combustibles alternativos en la emisión del motor	43
Figura 3-11 Evaluación coste	44
Figura 4-1 Thomas L. Saaty	45
Figura 4-2 Diagrama de flujo método Proceso Analítico Jerárquico	47
Figura 4-3 Ejemplo modelo jerárquico para la toma de decisiones	47
Figura 4-4 Encuesta ranking criterios	51
Figura 4-5 Diagrama circular de ranking de criterios	52
Figura 4-6 Modelo jerárquico en la búsqueda del combustible óptimo	53
Figura 4-7 Conversión de colores a escala Saaty (Tabla 4-1)	54
Figura 4-8 Resultados evaluación criterio de seguridad	54
Figura 4-9 Dimensiones F-100 (autoría propia)	58
Figura 4-10 Dimensiones F-80 (autoría propia)	58
Figura 4-11 Dimensiones P-41 (autoría propia)	59
Figura 4-12 Propiedades buques de la Armada (autoría propia)	59
Figura 4-13 B.A.C “Cantabria” realizando aprovisionamiento triple [28]	60
Figura 4-14 Suministro F-76 [65]	61
Figura 4-15 Emblema fragata “Méndez Núñez” (F-104) [28]	61
Figura 4-16 Emblema fragata “Canarias” (F-86) [28]	62
Figura 4-17 Emblema BAM “Meteoró” (P-41) [28]	63
Figura 4-18 Análisis del consumo de combustible en una navegación de siete días	64
Figura 4-19 Progreso de la combustión dual de H ₂ - diésel convencional [69]	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas del amoníaco (autoría propia basado en [9]).....	15
Tabla 2-2 Emisiones NO _x (autoría propia basado en [20]).....	21
Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de turbinas de gas (autoría propia basado en [33])	27
Tabla 3-1 Propiedades de los combustibles estudiados (autoría propia basado en [11]).....	35
Tabla 3-2 Escala de evaluación de colores	36
Tabla 4-1 Escala fundamental de comparaciones pareadas (autoría propia basado en [59])	46
Tabla 4-2 Índice aleatorio basado en [59].....	50
Tabla 4-3 Valores máximos de la RC	50
Tabla 4-4 Ranking de criterios de comparación por oficiales de la Armada.....	52
Tabla 4-5 Notación alternativas	53
Tabla 4-6 Comparación pareada entre A1, A3 y A2 (autoría propia)	54
Tabla 4-7 Escala comparaciones pareadas (autoría propia basado en Tabla 4-1)	54
Tabla 4-8 Matriz de comparación pareada respecto al C1	55
Tabla 4-9 Matriz de comparación pareada respecto al C2.....	55
Tabla 4-10 Matriz de comparación pareada respecto al C3.....	55
Tabla 4-11 Matriz de comparación pareada respecto al C4.....	55
Tabla 4-12 Matriz de comparación pareada respecto al C5.....	55
Tabla 4-13 Matriz de comparación pareada respecto al C6.....	55
Tabla 4-14 Matriz de comparación pareada respecto al C7.....	55
Tabla 4-15 Matriz de comparación pareada respecto al C8.....	55
Tabla 4-16 Matriz pareada C	56
Tabla 4-17 C x C.....	56
Tabla 4-18 Matriz C normalizada	56
Tabla 4-19 Vector fila.....	56
Tabla 4-20 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C1	56
Tabla 4-21 Producto de ponderaciones final	57
Tabla 4-22 Combustible óptimo A3	57
Tabla 4-23 Consumo F-104 modo turbina.....	62
Tabla 4-24 Consumo F-104 modo diésel.....	62
Tabla 4-25 Consumo F-86	63
Tabla 4-26 Consumo modo diésel P-41	63
Tabla A3- 1 Matriz pareada C2	75
Tabla A3- 2 C2 x C2	75

Tabla A3- 3 Matriz C2 normalizada	75
Tabla A3- 4 Vector fila C2	75
Tabla A3- 5 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C2	75
Tabla A3- 6 Matriz pareada C3	76
Tabla A3- 7 C3 x C3	76
Tabla A3- 8 Matriz C3 normalizada	76
Tabla A3- 9 Vector fila C3	76
Tabla A3- 10 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C3	76
Tabla A3- 11 Matriz pareada C4	77
Tabla A3- 12 C4 x C4	77
Tabla A3- 13 Matriz C4 normalizada	77
Tabla A3- 14 Vector fila C4	77
Tabla A3- 15 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C4	77
Tabla A3- 16 Matriz pareada C5	78
Tabla A3- 17 C5 x C5	78
Tabla A3- 18 Matriz C5 normalizada	78
Tabla A3- 19 Vector fila C5	78
Tabla A3- 20 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C5	78
Tabla A3- 21 Matriz pareada C6	79
Tabla A3- 22 C6 x C6	79
Tabla A3- 23 Matriz C6 normalizada	79
Tabla A3- 24 Vector fila C6	79
Tabla A3- 25 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C6	79
Tabla A3- 26 Matriz pareada C7	80
Tabla A3- 27 C7 x C7	80
Tabla A3- 28 Matriz C7 normalizada	80
Tabla A3- 29 Vector firma C7	80
Tabla A3- 30 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C7	80
Tabla A3- 31 Matriz pareada C8	81
Tabla A3- 32 C8 x C8	81
Tabla A3- 33 Matriz C8 normalizada	81
Tabla A3- 34 Vector fila C8	81
Tabla A3- 35 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C8	81

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación y motivación

La Segunda Revolución Industrial iniciada en el S.XIX marcó el principio de la producción en masa de bienes de consumo, y ello fue posible gracias al descubrimiento y explotación de nuevos combustibles de origen fósil, como el carbón y el petróleo. Este hito para la Humanidad también ha tenido consecuencias negativas desde el punto de vista medioambiental, y la principal ha sido que durante más de dos siglos se ha producido un incremento exponencial de emisiones dañinas a la atmósfera terrestre, entre las que destacan los gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes procedentes de la actividad industrial.

El transporte marítimo es uno de los principales responsables del agotamiento de las fuentes de petróleo y de alrededor del 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero. El porcentaje de las emisiones globales de la industria naviera continúa incrementando debido a la aparición de nuevas rutas y enlaces comerciales [1]. En este contexto, el desarrollo de combustibles alternativos es primordial para conseguir reducir la contaminación.

Es por esa razón que es fundamental trabajar en el desarrollo de combustibles alternativos para reducir la contaminación y mitigar los efectos del cambio climático. Algunas de las alternativas más comunes son los biocombustibles, el gas natural licuado (GNL) y el hidrógeno verde. Estos combustibles reducen la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes que son perjudiciales para el medio ambiente. Además, el uso de estas alternativas también ayuda a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, que son recursos finitos y cada vez más costosos.

Es fundamental entender el concepto de sostenibilidad y buscar formas de equilibrar las necesidades actuales con la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas como dijo la Comisión Brundtland, en su informe *“El desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas”* [2].

La sostenibilidad no solo implica reducir la contaminación, sino también fomentar el uso responsable de los recursos naturales y garantizar el bienestar de las personas y las comunidades afectadas por la actividad industrial. Cada vez es más importante cumplir con la legislación y las regulaciones ambientales, así como fomentar la concienciación social sobre el cambio climático y la importancia de cuidar nuestro planeta para un futuro más sostenible.

Por consiguiente, la motivación de este proyecto es encontrar aquellas fuentes de energía que permitan reducir la emisión de dichos gases en los buques de la Armada Española y poder colaborar con la reducción del calentamiento global.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto consiste en identificar aquellos combustibles alternativos más prometedores y, de entre ellos, encontrar el más adecuado en términos de efectividad, rendimiento y sostenibilidad económica para su posible implementación en los buques de la Armada Española.

Para la consecución de este objetivo, se establecen los siguientes objetivos secundarios:

En primer lugar, se pretende estudiar una metodología que permita tomar decisiones complejas para determinar la opción de combustible más viable. Esta herramienta implicará el establecimiento de criterios y su posterior comparación para evaluar los diferentes tipos de combustible y garantizar una elección bien fundamentada.

Como segundo objetivo, se llevará a cabo un estudio comparativo del consumo de combustible y costes entre los diferentes buques de la Armada, enfocándose en uno en particular para una posible implementación en la plataforma que resulte más eficiente.

1.3 Estructura del proyecto

Con el propósito de simplificar la comprensión del estudio y obtener una perspectiva ordenada de los temas que se abordan en él, se ha organizado de la siguiente forma:

– Introducción y objetivos:

En esta sección se busca exponer los motivos que han impulsado la realización de este estudio, así como los objetivos que se persiguen alcanzar con él. Asimismo, se explica la estructura utilizada para facilitar la comprensión del mismo.

– Estado del arte:

Este apartado se abordarán las fuentes de energía y sistemas de propulsión naval actuales. Se contextualizará el tema, explorando diferentes fuentes de energía, analizando la normativa en vigor y se detallarán los sistemas de propulsión más utilizados, incluyendo sus ventajas e inconvenientes.

– Desarrollo del TFG:

En el próximo capítulo del desarrollo del TFG se llevará a cabo una comparación detallada de los combustibles alternativos, evaluando factores como su seguridad, disponibilidad a nivel global, capacidad de suministro, durabilidad, adaptabilidad, efecto en el rendimiento y emisiones del motor, y enfoque económico. También se analizará la disponibilidad de estos combustibles en los buques de la Armada, centrándose específicamente en el Diesel Fuel Marine (F-76), y se presentará un estudio económico del consumo.

– Resultados y discusión:

En el siguiente punto, se presentarán los resultados y discusión del proyecto. En primer lugar, se detallará el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) utilizado para la evaluación de los combustibles alternativos, describiendo la jerarquía del problema, la matriz de comparaciones y el cálculo del vector propio y ponderación de las alternativas, así como la evaluación de consistencia y la elección de la alternativa óptima. Luego, se presentará la evaluación de los combustibles alternativos, incluyendo la selección de criterios de comparación y la investigación del combustible óptimo de la Armada.

– Conclusiones y líneas futuras:

En este capítulo se presentarán las conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado, destacando las ideas principales que se han derivado del mismo. Además, se explorarán las posibles líneas de investigación futuras que puedan continuar en la misma dirección.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contextualización

La era industrial ha traído consigo un aumento en la quema de combustibles fósiles, liberando el carbono que había sido almacenado durante millones de años en forma de carbón, petróleo y gas natural.

El resultado es un impacto ambiental significativo, ya que la liberación de dióxido de carbono (CO₂) contribuye al efecto invernadero y causa el calentamiento global y cambios climáticos graves. A medida que el clima cambia, se producen cambios en los patrones meteorológicos, el aumento del nivel del mar y la extinción de especies. Es importante tomar medidas para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y adoptar fuentes de energía más sostenibles [3].

De esta manera, aparece el concepto de Desarrollo Sostenible (DS) como herramienta para ponerle solución. El DS es una idea compleja y en constante evolución, y que, en los últimos tiempos, está empezando a condicionar la acción de los gobiernos, que han tomado conciencia de su papel en la protección del bienestar general, impulsando iniciativas que sugieren la posibilidad de que se convierta en un principio legal internacional, lo que impondría obligaciones a los Estados y podría generar responsabilidades internacionales en caso de incumplimiento.

El término "sostenibilidad" fue introducido por primera vez en el famoso informe Brundtland, el cual establece su significado como *“aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas”* [4].



Figura 2-1 Pacto Verde Europeo con visión hacia un desarrollo sostenible (autoría propia)

Este informe [4], presentado en 1987, resaltó la importancia de considerar el impacto del crecimiento económico y la globalización en el medio ambiente y propuso medidas para mitigar estos efectos. Esta iniciativa tuvo un gran impacto y fue el origen de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la Agenda 2030, que busca lograr una sociedad más justa mediante metas de crecimiento y sostenibilidad. También hace hincapié en la necesidad de tratar el medio ambiente y el desarrollo de manera conjunta al tomar decisiones.

La Unión Europea se suma a este objetivo para combatir el cambio climático y alcanzar una economía de cero emisiones en 2050. Esto incluye el Pacto Verde Europeo, iniciativa presentada por la Comisión Europea en 2019 con el fin de promover una economía sostenible en la Unión Europea. La idea es abordar los desafíos ambientales y transformarlos en oportunidades en todos los sectores económicos, asegurando al mismo tiempo que la transición sea equitativa e incluyente. El plan contempla los recursos y herramientas financieros necesarios para llevar a cabo estas medidas [5].

El objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la resiliencia del clima en Europa, en línea con el acuerdo de París sobre el cambio climático.

2.2 Fuentes de energía

2.2.1 Combustibles alternativos

Los combustibles alternativos empleados en la propulsión de los barcos tienen como finalidad reducir e incluso eliminar el CO₂ de las emisiones dañinas para la atmósfera.

La siguiente Figura 2-2, muestra la reducción de las emisiones de CO₂ empleando diversas fuentes de energía y combustibles alternativos. Se puede apreciar que los biocombustibles son más efectivos en la reducción de emisiones, alcanzando una disminución del 60% en comparación con la energía solar que solo logra reducir un 6% [3].

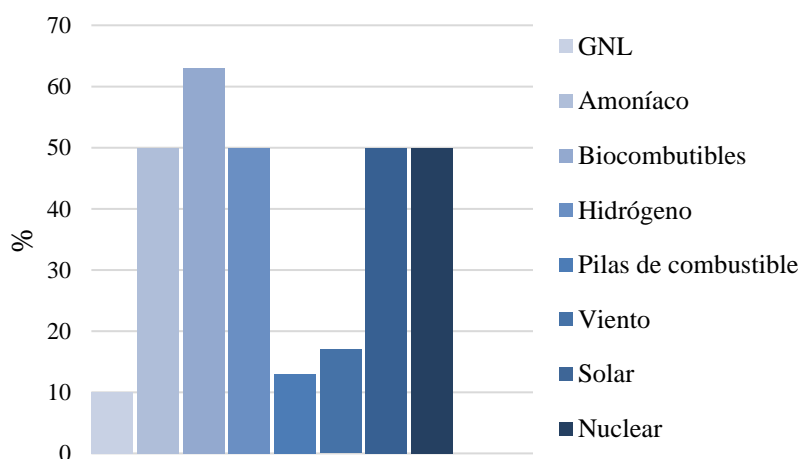


Figura 2-2 Reducción emisiones CO₂ mediante combustibles alternativos (autoría propia)

El gas natural licuado (GNL), el hidrógeno líquido, el amoníaco y el metanol, han sido objeto de un creciente interés en los últimos años debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo.

Además, tienen una densidad de energía volumétrica menor que el diésel. Esto significa que se requiere más volumen de combustible para obtener la misma cantidad de energía que con el diésel.

En comparación con él, el GNL tiene una densidad de energía volumétrica más cercana, seguido del amoníaco y el metanol, finalmente el hidrógeno líquido tiene la menor densidad de energía volumétrica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos combustibles alternativos tienen ventajas ambientales y de seguridad en comparación con el diésel.

2.2.1.1 *Ventajas e inconvenientes de combustibles alternativos*

Existen dos categorías de combustibles alternativos que se pueden utilizar en motores diésel marinos: los líquidos y los gaseosos.

En la categoría de los combustibles líquidos, encontramos el metanol, etanol, combustible biolíquido y biodiésel, mientras que en la categoría de los gaseosos se encuentran el propano, hidrógeno y GNL.

Uno de los principales inconvenientes de los combustibles alternativos líquidos es que no pueden sustituir al diésel o al aceite combustible debido a sus elevadas temperaturas de autoignición, calor latente de vaporización, y bajo índice de cetano.

Sin embargo, es posible utilizar estos combustibles en motores diésel de dos maneras diferentes. La primera es a través de una mezcla previa con diésel o aceite combustible. Este método puede requerir un mayor tiempo de procesamiento y puede ser más costoso que el uso de diésel puro.

La segunda forma es a través de un sistema de inyección directa en el motor. Este enfoque permite una mayor eficiencia y menores emisiones, ya que los alcoholes pueden quemarse de manera más completa que el diésel o el aceite combustible.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los sistemas de inyección directa pueden ser más costosos y requerir más mantenimiento que los sistemas de mezcla previa.

Aunque actualmente no se utiliza el etanol en barcos comerciales, hay estudios que lo han implementado en motores fuera borda de barcos de recreo [6]. Por otro lado, los estudios de metanol en barcos comerciales son más frecuentes y empresas como Stena Line, Wärtsilä y MAN B&W están explorando su uso en sus barcos o motores diésel.

2.2.1.2 *GNL*

El gas natural licuado (GNL) es uno de los combustibles marinos alternativos más prometedores debido a su baja emisión de CO₂ y óxidos de nitrógeno (NO_x). Es una forma líquida del gas natural que se obtiene por procesamiento de licuefacción.

Presenta una composición mayoritariamente de metano (98%) y pequeñas cantidades de nitrógeno, etano, propano y dióxido de carbono. Consiste en un gas inodoro, incoloro y no tóxico que se ha enfriado a temperaturas extremadamente bajas (-161 °C) para convertirse en un líquido mediante el proceso de licuefacción.

Este proceso de condensación permite su almacenamiento y transporte, que hace que el GNL sea el combustible clave para la propulsión naval en un futuro cercano.

Este combustible también es reconocido como la opción más ecológica frente a los convencionales, ya que cuando se quema, emite menos dióxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas que otros combustibles. Los barcos con este tipo de combustible cumplen con el Anexo VI del convenio MARPOL para prevenir la contaminación ambiental.

Como se puede apreciar en la Figura 2-3, el uso de motores de combustible dual con GNL permite la reducción del 100% de las emisiones SO_x, un 85% de las emisiones NO_x, siendo menos efectivo en la reducción de las emisiones de CO₂, reduciéndolas solo un 25% [7].

Sin embargo, su producción y transporte requieren una infraestructura especializada y también existe el riesgo potencial de fugas y explosiones. En general, el uso de GNL como combustible para el transporte marítimo es una alternativa en la búsqueda de energías más sostenibles y menos contaminantes.

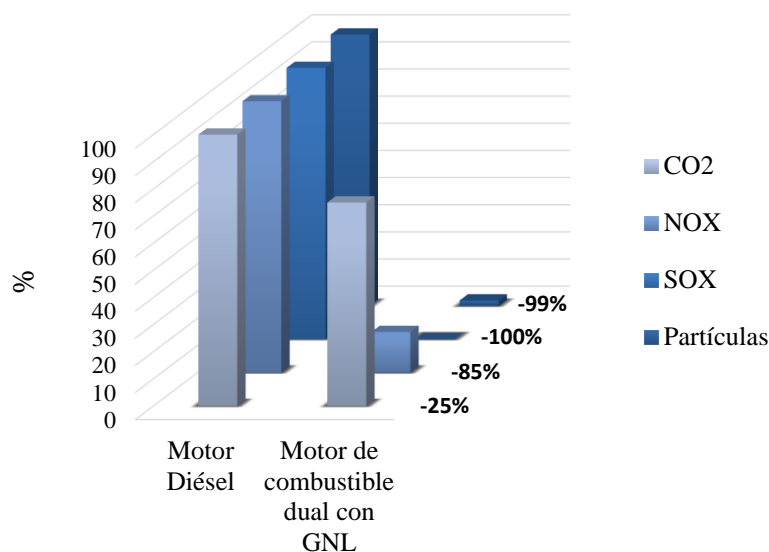


Figura 2-3 Reducción de emisiones empleando GNL (autoría propia)

Asia es el mayor consumidor de GNL en el mundo, responsable de 3/4 del comercio mundial y 1/3 total de gas natural. El suministro global de gas se cubre principalmente por Oriente Medio, Rusia, Australia y EE. UU. El probable aumento en el consumo mundial de energía se atribuye principalmente a los países asiáticos no miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), incluyendo China e India.

En el año 2019 se observó una tendencia hacia la igualdad en los precios del gas entre los diferentes mercados, lo que resultó en una disminución en las disparidades regionales. No obstante, la volatilidad en los precios sigue siendo una preocupación en Asia, pero el creciente comercio de GNL podría ayudar a estabilizar los precios. Por otro lado, la optimización de la capacidad de los oleoductos en Estados Unidos podría mantener bajos los precios del gas [1].

En Asia, la falta de una fuente fiable para establecer los precios del gas natural y una infraestructura adecuada pone a esta región en desventaja. Sin embargo, países como Japón, China y Singapur están investigando la posibilidad de crear un centro de comercio de GNL para estabilizar los precios. Estos países están estableciendo una base sólida para fijar los precios de forma efectiva y garantizar un suministro confiable y estable de gas natural.

2.2.1.3 Hidrógeno

El hidrógeno es un combustible alternativo atractivo como fuente de energía limpia con un gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo. Se caracteriza por su empleo en los sectores de transporte, construcción e industria. También destaca por ser un medio de almacenamiento para energía renovable intermitente. Sin embargo, su uso aún se ve limitado por la falta de infraestructura de producción y suministro a nivel mundial, así como por su desarrollo para superar los desafíos técnicos y económicos que impiden una economía basada en hidrógeno.

Aún no existe una solución económica viable para el almacenamiento criogénico de hidrógeno en barcos. El coste unitario de hidrógeno debe disminuir para ser más competitivo con otros combustibles, especialmente en el transporte y almacenamiento en grandes cantidades.

El H₂ puede obtenerse a partir de biomasa, agua y combustibles fósiles. Hay métodos disponibles, como el reformado, la electrólisis, la fotobiólisis y la gasificación, que permiten producir energía con emisiones reducidas o incluso neutrales de CO₂. La producción de energía con hidrógeno no tiene un

impacto negativo en el medioambiente. De acuerdo con lo que se muestra en la Figura 2-4, el hidrógeno se categoriza en tres tipos según su procedencia: verde, gris y azul (Figura 2-5).

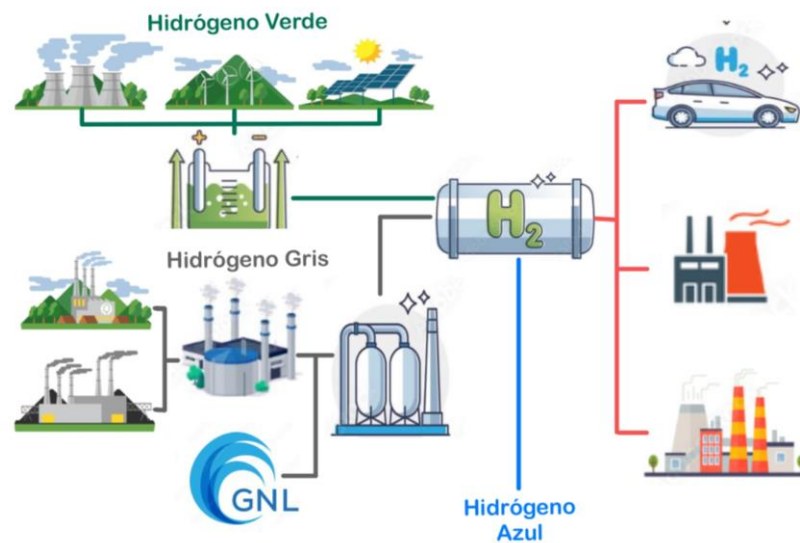


Figura 2-4 Rutas de producción del hidrógeno a partir de recursos energéticos (autoría propia)

Varios estudios afirman que, para conseguir un futuro sostenible, el hidrógeno debe ser “*accesible, confiable, seguro, limpio y eficiente*”. Sugieren una evaluación de su rendimiento con el modelo 3S (fuente-sistema-servicio) para elegir la fuente más sostenible. Mejorando su rendimiento junto a tecnologías, se puede reemplazar los combustibles fósiles en los sistemas energéticos.

Un futuro sostenible en energía requiere usar hidrógeno y otros combustibles limpios. El hidrógeno sólo es considerado limpio si la generación y consumo son limpios según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2006 [1].

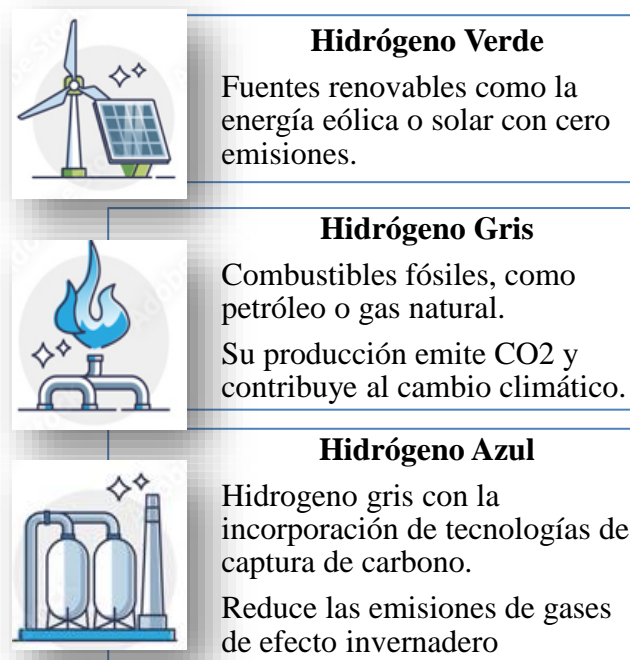


Figura 2-5 Clasificación del hidrógeno (autoría propia)

El hidrógeno verde podrá competir con los combustibles fósiles en 2040, según un informe elaborado por la empresa Wood Mackenzie. Además, reducirá el requerimiento de combustibles fósiles en un 64%. La clave serán medidas gubernamentales que potencien la inversión en desarrollo tecnológico, subsidios e investigación para agilizar la participación del hidrógeno verde en mercados económicos [8].

2.2.1.4 Amoníaco

El amoníaco (NH_3) es un compuesto tóxico formado por H_2 y N_2 utilizado en la industria de fertilizantes. También puede ser empleado como combustible alternativo en la navegación marítima debido a su alta energía de combustión y su facilidad de almacenamiento en estado líquido.

Puede ser convertido a estado líquido para su almacenamiento y transporte aumentando así su densidad. Para esto solo se requieren presiones de alrededor de 1 MPa o una temperatura de -33°C , mayor que la necesaria para convertir el hidrógeno a estado líquido.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el amoníaco es un compuesto tóxico categorizado por la Asociación Nacional de Protección contra Incendios de los Estados Unidos (NFPA) que requiere medidas de seguridad especiales en su manejo y almacenamiento.

El transporte de amoníaco puede ser económicamente viable tanto en estado líquido mediante licuefacción por baja temperatura como por compresión. También se emplea como vector energético para producir hidrógeno con un 17,6% de contenido, mayor que el del metanol [9].

Ventajas	Desventajas
Elevado valor de densidad energética volumétrica y gravimétrica	Elevada toxicidad
Inexistencia de pérdidas de energía durante su almacenamiento y transporte	Gasto energético en la producción de Hidrógeno
Condensación bajo presión moderada de 9 bar o a 33°C a presión atmosférica	Medidas costosas con respecto a la seguridad, transporte y almacenamiento

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas del amoníaco (autoría propia basado en [9])

EE. UU. es el principal importador de amoníaco, abarcando entre el 35% y el 40% del comercio global. Europa también importa una gran cantidad, alrededor del 25% del comercio global. Se espera que Asia tenga un gran crecimiento en las importaciones debido a su demanda industrial.

Se está considerando el uso de amoníaco verde como una alternativa sostenible de combustible. La central eléctrica NUON-Magnum en Eemshaven, Países Bajos, se transformará en una planta verde que utilizará amoníaco como fuente de energía [1].

Con una capacidad suficiente para satisfacer las necesidades de 2 millones de hogares holandeses, este proyecto incluye la conversión de una de sus unidades a hidrógeno, lo que la convertirá en la primera instalación de energía 100% libre de carbono del mundo alimentada por hidrógeno, prevista para ser finalizada en 2023.

2.2.1.5 Biocombustibles

El uso de combustibles basados en energías renovables, como los biocombustibles, es esencial para reducir las emisiones de CO_2 en la atmósfera. Aunque estos combustibles no emiten CO_2 al quemarlos, es importante tener en cuenta las emisiones asociadas a su producción.

La clave para hacer una elección sostenible es determinar si un combustible proviene de fuentes fósiles o renovables. Esto es crucial para contribuir a la lucha contra el cambio climático y proteger el

medio ambiente. En la siguiente Figura 2-6, se presentan los combustibles obtenidos a partir de fuentes fósiles:

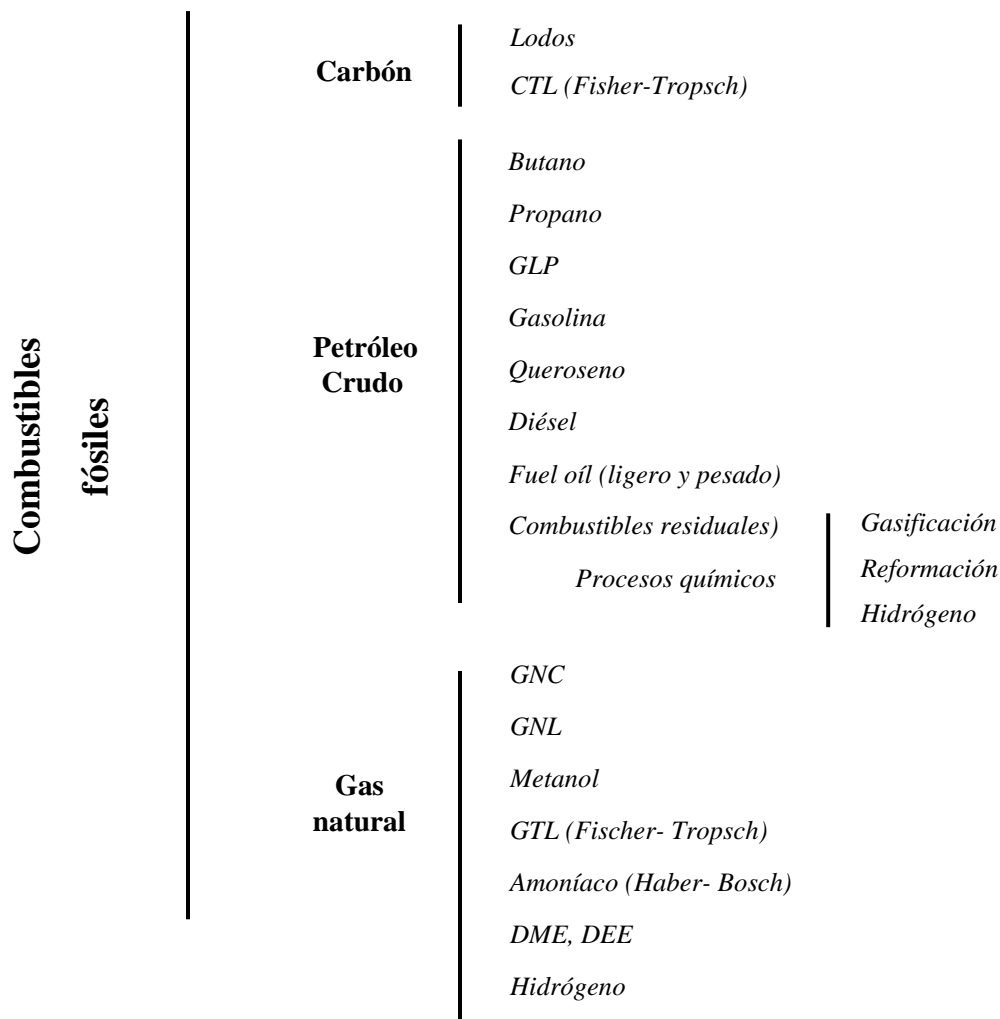


Figura 2-6 Combustibles derivados de fuentes fósiles (autoría propia basado en [3])

Los biocombustibles, como se puede observar en la Figura 2-7, se dividen en varias categorías según su proceso y materia prima. La biomasa lignocelulósica es esencial para producir biocombustibles de segunda generación, ya que es la única fuente renovable con carbono e hidrógeno disponible en gran cantidad y bajo coste. Se obtiene de residuos y cultivos lignocelulósicos forestales, agrícolas, industriales y urbanos [10]. Hay varios métodos para generar energía y combustibles utilizando biomasa lignocelulósica, estos incluyen: procesos térmicos, químicos y biológicos.

Los procesos termoquímicos son una forma de producir energía y combustibles a partir de biomasa lignocelulósica. Incluyen combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción. Estos tratamientos pueden producir diferentes vectores energéticos, químicos y combustibles líquidos de alta calidad mediante la síntesis de Fischer-Tropsch.

La transformación de biomasa mediante la técnica de pirólisis genera principalmente bioaceites que posteriormente pueden ser utilizados para fabricar bioproductos químicos y biocombustibles. La licuefacción emplea solventes a temperaturas variadas y presiones moderadas para obtener componentes

valiosos de la biomasa, los cuales son empleados en la fabricación de combustibles y productos químicos [11].

En términos de procesos biológicos, la fermentación y digestión son los más comunes que emplean diferentes bacterias y microorganismos. Un ejemplo sería la obtención de bioetanol a partir de la transformación de azúcares por medio de fermentación, o biogás mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos o lignocelulósicos.

En los procesos químicos se usan tanto técnicas enzimáticas como catalíticas. Por ejemplo, la producción de biodiesel por medio de transesterificación de aceites de origen vegetal o animal, la transformación directa de aceites para producir HVO, y la separación de componentes de la biomasa (lignina, celulosa y hemicelulosa) por hidrólisis ácida para su utilización en productos intermedios y finales como los bioaceites.

El metanol y el etanol son distintos tipos de alcoholes producidos a partir de fuentes renovables y productos agrícolas. También pueden ser obtenidos a partir del proceso de reformación de gas natural y gas de carbón. Tienen baja viscosidad, alto contenido de oxígeno, son libres de azufre y emiten poca contaminación a la atmósfera. Aumentan su eficiencia volumétrica durante la combustión. Sin embargo, también son tóxicos y corrosivos y su volumen es el doble del aceite diésel marino.

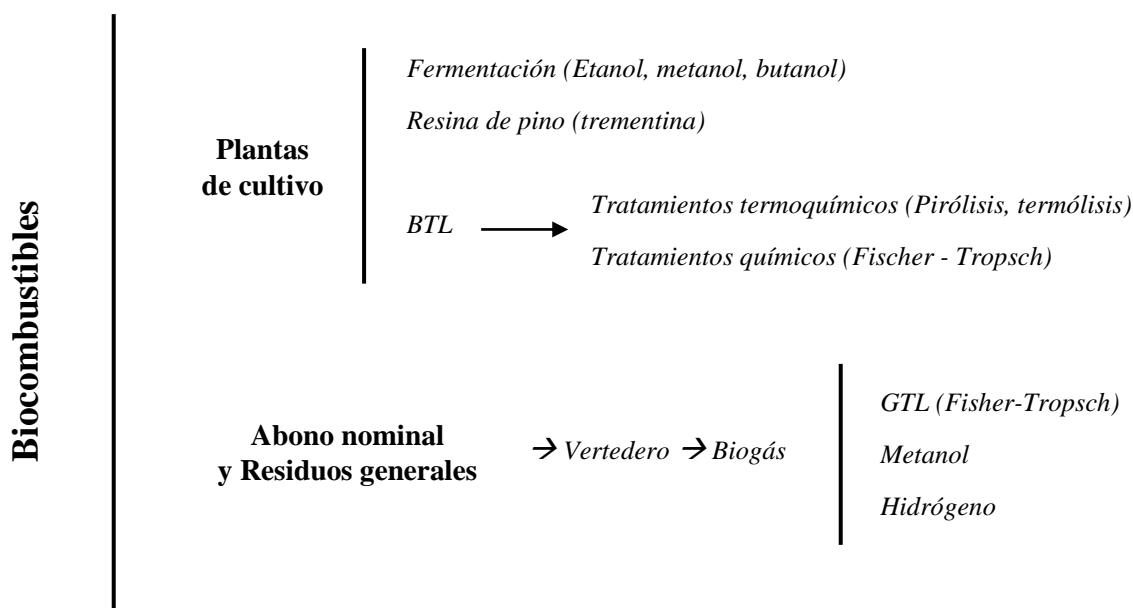


Figura 2-7 Biocombustibles empleados en combustión interna (autoría propia basado en [3])

2.2.2 Otras fuentes de energía renovables

Mejorar la eficiencia energética de los buques es un tema que se está investigando de manera exhaustiva. Se han propuesto soluciones como la integración de baterías para almacenar energía y sistemas inteligentes para optimizar su distribución [1].

La energía eólica también se ha identificado como una fuente renovable y abundante que podría utilizarse para su propulsión. Sin embargo, su uso en la industria naviera todavía es limitado. Se cree que la propulsión eólica marítima es más efectiva que en tierra debido a una menor fricción. Por lo tanto, su uso podría dar lugar a una significativa reducción de combustible y emisiones en comparación con opciones convencionales.

Debido al elevado precio de los combustibles fósiles, se está investigando la posibilidad de utilizar la energía eólica como una fuente adicional de energía para los barcos. Esto se llama "sistemas de propulsión de barcos asistidos por el viento".

El uso de energías renovables (Figura 2-8) como la eólica y solar conlleva desafíos, como la incertidumbre en la cantidad de energía generada debido a las condiciones climáticas variables.



Figura 2-8 Fuentes de energía renovables (autoría propia)

2.3 Normativa en vigor

2.3.1 Convenio MARPOL

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano celebrada en 1972 en Estocolmo sentó las bases para la cooperación internacional en temas ambientales, impulsando la creación de acuerdos y tratados internacionales para proteger el medio ambiente [12]. Uno de los acuerdos más importantes fue el Protocolo de Montreal de 1987, que estableció medidas para reducir la emisión de sustancias que agotan la capa de ozono, y que ha tenido un gran impacto en la recuperación de la capa de ozono [13].

Los efectos perjudiciales de las emisiones en el medio ambiente y en la salud humana llevaron a los países industrializados a regular estas emisiones creando las Conferencias de las Partes (CP) anuales. Estas son reuniones que se llevan a cabo en el marco de varios acuerdos ambientales internacionales, incluido el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Su objetivo es revisar y supervisar el progreso en la implementación de los acuerdos ambientales y toma de decisiones sobre el futuro de la dirección y acción necesaria.

El Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los buques (MARPOL), es un tratado mundialmente aceptado para prevenir la contaminación del medioambiente marino. Fue aprobado en 1973 por la OMI (Organización Marítima Internacional, Figura 2-9 [14]), y en 1978 se adoptó el protocolo como consecuencia de gran cantidad de incidentes náuticos. El protocolo de 1978 reemplazó al Convenio original, y entró en vigor en 1983. En 1997, se introdujeron enmiendas y se agregó el Anexo VI, el cual se activó en mayo de 2005 [15].



Figura 2-9 Emblema Organización Marítima Internacional

La Figura 2-10 ilustra los seis anexos que conforman el convenio MARPOL, los cuales han sido diseñados para prevenir la contaminación originada por diversas fuentes:

ANEXO I: Hidrocarburos (2007)

ANEXO II: Sustancias nocivas líquidas transportadas a granel (1983)

ANEXO III: Sustancias perjudiciales transportadas por bultos (1992)

ANEXO IV: Aguas sucias (2003)

ANEXO V: Basuras (1988)

ANEXO VI: Polución atmosférica (2005)

Figura 2-10 Anexos MARPOL

El cumplimiento de este convenio es crucial para asegurar la protección y conservación del medio ambiente marino y la vida acuática. El Anexo VI será de gran importancia en este estudio, dado que se centra en las regulaciones para reducir la contaminación atmosférica, y contempla las Zonas de Control de Emisiones (ECA), las cuales se analizarán con mayor detalle.

2.3.1.1 ANEXO VI

El Convenio MARPOL, por su parte, incluye en su anexo VI, los límites de emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno, así como la prohibición de emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono, es un paso importante en la lucha contra la contaminación marina y la mejora de la calidad del aire.

Este Anexo establece en su Capítulo 3 “Prescripciones para el control de las emisiones de los buques”, las reglas 12, 13 y 14 las cuales están enfocadas a la reducción de emisiones de sustancias contaminantes en el transporte marítimo [16] y se definen de la siguiente manera:

- **Regla 12:** sustancias que agotan la capa de ozono y establece medidas para controlar y reducir su uso en el transporte marítimo.
- **Regla 13:** reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x) en el escape de los motores de los buques y establece límites para las emisiones de NO_x en función de la potencia del motor y la velocidad del buque.
- **Regla 14:** relación con los óxidos de azufre (SO_x) en las zonas de control de emisiones (ECA) y establece límites más estrictos para las emisiones de SO_x en las áreas designadas como zonas de control de emisiones.

Las ECAS (Emission Control Areas) se definen como “zonas en la que es necesario adoptar medidas especiales de carácter obligatorio para prevenir, reducir y contener la contaminación atmosférica por NO_x o SO_x y materia particulada, o los tres tipos de emisiones, y sus consiguientes efectos negativos en la salud de los seres humanos y el medio ambiente” [17].

Como muestra la Figura 2-11, las áreas designadas como ECA’s son varias, y entre ellas se encuentran: la Zona del Mar Báltico, que se limita exclusivamente a la reducción de emisiones de SO_x y la Zona del Mar del Norte, que también se enfoca en la reducción de emisiones de SO_x; la Zona de Norteamérica, que aborda la reducción de emisiones de SO_x, NO_x y PM (material particulado); y la

Zona del Mar Caribe de los Estados Unidos, que también se enfoca en la reducción de emisiones de SO_x , NO_x y PM [15].

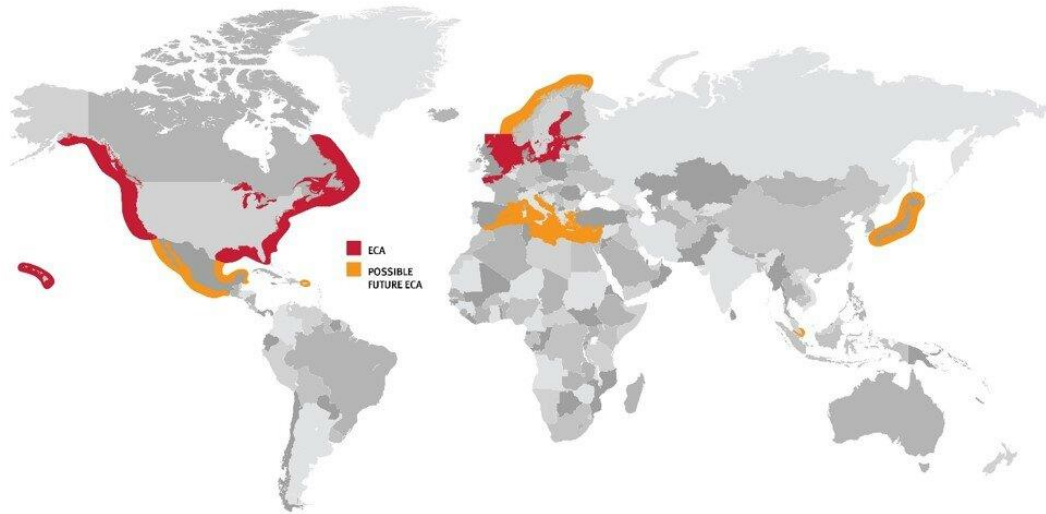


Figura 2-11 Zonas de Control de Emisiones a nivel mundial [18]

Las ECA's han ido evolucionando a lo largo de los últimos años en respuesta a la creciente preocupación por la contaminación atmosférica y su impacto en la salud humana y en el medio ambiente. A partir de enero de 2015 se implementaron los límites a las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) en las Zonas de Control de Emisiones de Óxidos de Azufre (SECA, por sus siglas en inglés) en el Mar del Norte y el Mar Báltico, y en 2020 se establecieron límites a nivel global.

El 1 de enero de 2020, entró en vigor la regulación global conocida como "IMO 2020", la cual tiene como objetivo reducir significativamente las emisiones de óxidos de azufre (SO_x) dañinas procedentes de los buques, y traer beneficios para la salud humana y el medio ambiente. Esta regulación reduce el límite superior global en contenido de azufre del combustible de los barcos al 0,50% (anteriormente era 4,5 %), lo que implica una reducción del 89% en las emisiones totales de SO_x .

Esta información se representa gráficamente en la Figura 2-12, que ilustra la cantidad máxima permitida de SO_x en el fuel oil de los barcos expresado en términos de peso en % m/m, donde "m" se refiere a la masa. Este límite es obligatorio para todos los buques que operen fuera de ciertas Áreas de Control de Emisiones designadas, donde el límite ya es del 0,10%. Además, la regulación también ayudará a prevenir la lluvia ácida y la acidificación del océano, beneficiando a los cultivos, los bosques y las especies acuáticas. Refinerías, armadores y otros organismos han trabajado arduamente para prepararse y garantizar una transición sin problemas [15].

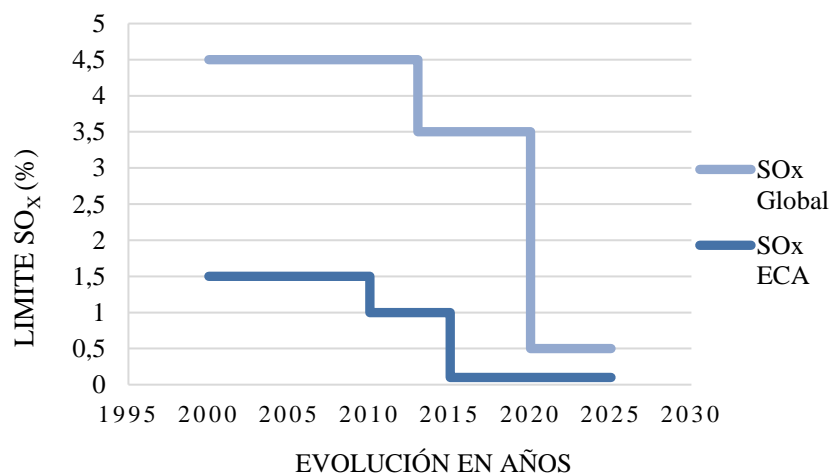


Figura 2-12 Límites emisiones SO_x basado en [19]

En relación con las limitaciones en cuanto a las emisiones de óxidos de nitrógeno, las zonas NECA (áreas de control de emisiones de NO_x) imponen regulaciones que establecen tres niveles o “Tiers” para los buques que poseen un motor de propulsión de 130 kW de potencia y cuya instalación se haya realizado después del año 2000. Estos niveles regulan las emisiones de acuerdo con la fecha de construcción del buque, comenzando a contar a partir del 1 de enero. Como se puede observar en la Tabla 2-2, las emisiones se miden en gramos de emisiones producidas por cada kilovatio-hora de energía generada por el motor (g/kWh).

AÑO DE CONTRUCCIÓN		
2000	2011	2016
TIER I	TIER II	TIER III
n < 130 rpm → 17	n < 130 rpm → 14,4	n < 130 rpm → 3,4
130 < n < 2000 rpm → 12,1	130 < n < 2000 rpm → 9,7	130 < n < 2000 rpm → 2,4
n > 2000 rpm → 9,8	n > 2000 rpm → 7,7	n > 2000 rpm → 2

Tabla 2-2 Emisiones NO_x (autoría propia basado en [20])

El primer nivel, conocido como “Tier” I, se aplica a los buques construidos a partir del año 2000, mientras que el segundo nivel se aplica a aquellos construidos a partir de 2011. Finalmente, el tercer nivel, que entró en vigor el 1 de enero de 2016, es el más estricto y según la Figura 2-13, las emisiones producidas por motores con una potencia menor a 130 kW deben ser de 3,4 g/kWh, y disminuyen a medida que aumentan las revoluciones por minuto.

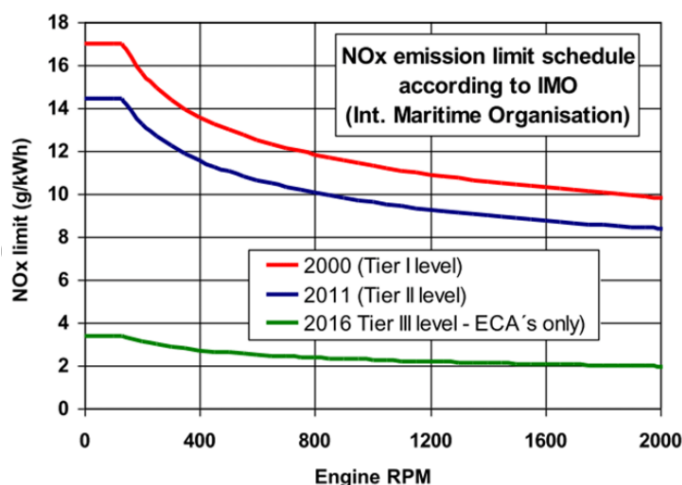


Figura 2-13 Límites de emisión NO_x [21]

2.3.2 Eficiencia Energética

El enfoque del Anexo VI del Convenio MARPOL se centra en la reducción de los gases nocivos a través de medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética.

La eficiencia energética (EE) tiene como objetivo minimizar el consumo innecesario de energía y maximizar la producción de energía a partir de fuentes renovables y limpias, lo que se traduce en una menor huella de carbono y un impacto ambiental más reducido.

En julio de 2011, la Organización Marítima Internacional (OMI) introdujo una serie de medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética de los buques y reducir las emisiones de gases de efecto

invernadero (GEI), las cuales son de cumplimiento obligatorio para los nuevos buques y deben satisfacer ciertos estándares de eficiencia energética. Entre estas medidas se incluían:

EDDI: Índice de Eficiencia Energética de Proyecto

EEOI: Indicador Operacional Eficiencia Energética

SEEMP: Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque

Figura 2-14 Medidas implantadas por la OMI

Sin embargo, la Unión Europea (UE) considera que estas medidas son insuficientes para cumplir el objetivo global de limitar el aumento de la temperatura media del planeta a 2 °C. Por lo tanto, la UE ha establecido su propio objetivo de reducción de emisiones de gases en un 40% en comparación con los niveles de 1990 para el año 2030.

Para lograr este objetivo, la UE está implementando una serie de medidas mayores a las adoptadas por la OMI, como la inclusión del sector marítimo en el Sistema de Comercio de Emisiones de la UE y la introducción de regulaciones más estrictas sobre las emisiones de los buques en los puertos de la UE. Estas medidas se suman a otras iniciativas globales para reducir las emisiones del transporte marítimo, como un sistema de Seguimiento, Notificación y Verificación (SNV) de las emisiones de CO₂ basado en el consumo de combustible de los buques, la Estrategia de Reducción de Emisiones de la OMI para 2030 y la transición hacia combustibles más limpios y tecnologías más eficientes en la industria marítima [22].

2.3.2.1 Adaptación del EEOI a la Armada

El Indicador de Eficiencia Energética Operacional (EEOI) permite cuantificar el consumo eficiente de combustible de una embarcación en relación al trabajo realizado en el transporte de carga, de manera que se podrá conocer de forma precisa si las medidas implementadas para reducir el consumo están dando resultados.

Los buques de la Armada española tienen requisitos energéticos más elevados que los buques mercantes debido a su equipamiento especial, como la artillería y los radares. Sin embargo, en general, su consumo de energía es similar al de los buques mercantes y pesqueros.

A pesar de que se prioriza la operatividad en el diseño de los buques militares, se pueden hacer mejoras en la eficiencia energética tanto pasiva como operativa. El EEOI es aplicable a los buques militares para estimar su eficiencia energética y reducir su consumo y emisiones.

Para adaptarlo a los buques de guerra, se necesita definir una nueva unidad de carga debido a que estos buques no se utilizan principalmente para el transporte de mercancías. La solución encontrada es el concepto de "presencia naval", que se cuantifica en términos de los costes asociados con el desplazamiento del buque, el número de personas en la dotación y el desplazamiento del navío. *“La ecuación genérica del EEOI para cualquier buque militar se puede calcular utilizando las unidades de miligramos de CO₂ por kilómetro de navegación y por tonelada métrica desplazada”* [22].

De esta forma, este parámetro se puede expresar mediante la siguiente ecuación para todos los barcos militares. Para medir la EEOI se utilizarán las unidades de miligramos de dióxido de carbono por kilómetro de navegación y tonelada métrica desplazada:

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

En primer lugar, "D" se refiere al desplazamiento del barco, es decir, al volumen de agua desplazado por el buque gracias a su flotabilidad. Este factor permite tener una idea de las dimensiones del buque y

de la cantidad de propulsión necesaria para moverlo. Por otro lado, "d" se refiere a la dotación de personas a bordo, mientras que "p" hace referencia al desplazamiento total del buque. Se estipula que cada persona de la dotación tiene un peso de 100 kg, incluyendo los equipos habituales.

2.4 Sistemas de propulsión naval actuales

2.4.1 Antecedentes

Es cierto que la Tierra está cubierta en su mayoría por agua (70%), por lo que, desde hace mucho tiempo, el ser humano ha buscado formas de navegar en ella. El objetivo era poder explorar nuevos territorios, establecer comercio y expandir sus dominios. Esto dio lugar a la invención del barco, que ha evolucionado a lo largo del tiempo y ha sido fundamental en la historia humana.

Desde troncos flotantes hasta barcos con tecnología avanzada, los barcos han permitido a los humanos navegar y explorar los mares y océanos, y han sido un medio esencial de transporte en el comercio y la exploración.

Su historia comienza hace alrededor de 4000 años en Mesopotamia (Figura 2-15), donde los primeros barcos eran simples troncos flotantes usados para cruzar ríos tranquilos y aguas poco profundas. Con el tiempo, se añadió un motor infinito: la vela, impulsada por el viento. De esta manera, surgió la invención del barco.

Durante la Edad Antigua, los barcos eran utilizados con frecuencia por los antiguos griegos, romanos y egipcios. Estos, se caracterizaban por ser más sofisticados y estaban diseñados para navegar en aguas más profundas y enfrentar marejadas. Además, también se utilizaban para fines comerciales y militares [23].



Figura 2-15 Pintura sobre papiro Antigo Egipto [24]

La construcción de las carabelas en la época de Cristóbal Colón marcó un hito en la historia de la navegación, permitiendo a los europeos explorar nuevos horizontes y descubrir América en 1492. Durante los siglos XV y XVI, el transporte marítimo se basaba en la vela y la fuerza humana. Sin embargo, con el surgimiento de la Revolución Industrial en el siglo XVIII, se introdujeron nuevas tecnologías en la industria naval, incluyendo la máquina de vapor.

En 1807, Robert Fulton diseñó el primer barco de vapor, el "Clermont" (Figura 2-16), que revolucionó la forma en que se realizaba el transporte marítimo. Este barco utilizaba un motor de vapor para moverse, lo que lo hacía mucho más rápido y eficiente que los barcos a vela. Durante los siglos XIX y principios del XX, el barco de vapor se convirtió en la forma dominante de transporte marítimo, siendo ampliamente utilizado en el comercio y el transporte de pasajeros [25].



Figura 2-16 Clermont, primer barco de vapor [25]

Sin embargo, hacia finales del siglo XIX surgieron nuevas formas de propulsión, como el motor diésel, que pronto se convirtió en la norma en la industria naval. Este, ofrecía mayor eficiencia y flexibilidad que el motor de vapor, y rápidamente lo reemplazó convirtiéndose en forma dominante de transporte marítimo.

A lo largo de la historia, la tecnología de los barcos ha avanzado y mejorado, permitiendo a los humanos viajar más lejos y navegar en condiciones más adversas. Con el tiempo, los barcos se han convertido en un medio de transporte esencial para el comercio, la exploración y la guerra.

2.4.2 Sistemas de propulsión

La propulsión de un barco es una fuente importante de demanda de energía a bordo. Antes, la configuración de los sistemas de energía de los barcos era sencilla, pero actualmente se está buscando mejorar la eficiencia energética mediante la integración de los sistemas de energía.

Hay múltiples opciones de propulsión disponibles, incluyendo motores de combustible, turbina de gas, celda de combustible, turbina de vapor, eólica, por chorro de agua, solar y nuclear (Figura 2-17). También existen sistemas híbridos que utilizan baterías para almacenar electricidad y reducir las emisiones [1].



Figura 2-17 Sistemas de propulsión marítima (autoría propia)

2.4.2.1 Propulsión diésel

Actualmente los motores diésel marinos son la forma de propulsión más común en los barcos. Fueron inventados por Rudolf Diesel a finales del siglo XIX, consisten en un motor diésel acoplado a un engranaje reductor que disminuye las revoluciones para ajustarlas a la hélice.

La eficiencia del sistema oscila entre el 95% y el 98% y la potencia se transmite a través de un sistema de transmisión que conecta el eje a la hélice. La eficiencia total depende de la configuración específica de cada buque y puede alcanzar hasta un 95% [26].

Existen dos tipos de motores para barcos de baja y alta velocidad. Los motores de baja velocidad son mayoritariamente empleados en buques de gran tonelaje, como petroleros, cargueros y portacontenedores, y se conectan directamente al eje sin necesidad de engranajes reductores, capaces de proporcionar hasta 50.000 CV.

Por otro lado, a diferencia de los motores de baja velocidad, los de alta, requieren una reducción de velocidad para conectarse al eje y proporcionan potencia entre 100 y 10.000 CV. Se usan en barcos recreacionales, cruceros, mercantes y buques de guerra [27].

Un ejemplo de este sistema de propulsión aplicado a la Armada sería el Buque de Asalto Anfibio Galicia, el cual dispone de dos motores diésel de 22.000 CV (Figura 2-18).



Figura 2-18 BAA Galicia L-51 (Armada Española) [28]

2.4.2.2 Propulsión eléctrica

Los Sistemas de Propulsión Eléctrica (S.P.E.) son aquellos que permiten a un buque navegar basándose, principalmente, en la energía eléctrica y en su aplicación. Esto se logra a través de la utilización de motores eléctricos, que transforman la energía eléctrica en movimiento mecánico para impulsar el barco. La electricidad puede ser generada a partir de diversas fuentes, tales como baterías, paneles solares o generadores a combustión, tal como se ilustra en la Figura 2-19.

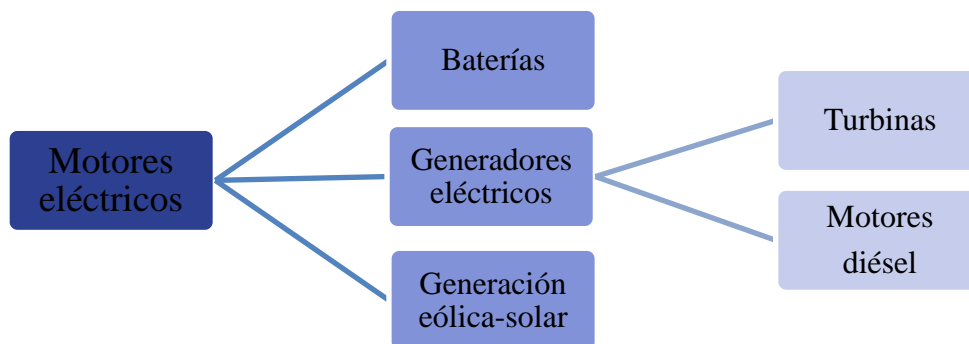


Figura 2-19 Fuentes de obtención de electricidad (autoría propia basado en [29])

Estos sistemas ofrecen diversas características y ventajas, tales como: menos ruidos y vibraciones en comparación con los sistemas de propulsión convencionales, lo que los hace ideales para cumplir con los requisitos medioambientales actuales. Menos emisiones contaminantes, y una mayor maniobrabilidad del buque, lo que aumenta su eficiencia y agilidad en la navegación.

Sin embargo, también existen desventajas asociadas a estos sistemas, como un mayor coste de inversión inicial y mantenimiento en comparación con los sistemas de propulsión convencionales como motores diésel y turbinas de gas [30].

Los SPE se han convertido en una alternativa casi indispensable para buques especializados, como los rompehielos y militares (Figura 2-20), submarinos y remolcadores que requieren un posicionamiento preciso. Además, también son una opción atractiva para barcos de recreo en aguas protegidas, veleros y yates [29].



Figura 2-20 ENRPO-CAZAMINAS Clase Segura (Armada Española) [31]

2.4.2.3 Turbina de gas

Durante la Segunda Guerra Mundial, el avance en materiales capaces de soportar elevadas temperaturas y velocidades permitió el desarrollo de las turbinas de gas. La primera turbina de gas desarrollada por Estados Unidos fue de General Electric en 1941 para la aviación (Figura 2-21).



Figura 2-21 Primera turbina de gas marina en el petrolero Auris, 1951 [32]

La turbina de gas funciona según el ciclo de Brayton, donde el gas es comprimido y calentado en una cámara de combustión, luego se expande en una turbina para producir trabajo. Se trata de una máquina simple y fácil de operar, reparar e inspeccionar.

Son muy comunes en los buques de guerra gracias a su excelente relación potencia-peso. Sin embargo, su uso en la marina mercante ha disminuido debido a las crisis petroleras en comparación con los motores diésel, ya que estos, consumen menos energía promedio (135 g/CV.hora) en comparación con la turbina de gas (180 g/CV.hora) [27].

En la Armada las fragatas clase Santa María cuentan con dos turbinas de gas LM-2500 de 40.000 CV cada una (Figura 2-22).



Figura 2-22 Fragata Clase Santa María, Victoria F-82 (Armada Española) [28]

Ventajas	Desventajas
Elevada eficiencia en términos de potencia y peso	Componentes sujetos a grandes esfuerzos
Suavidad de funcionamiento por movimiento rotativo	Requieren mantenimiento crítico
Ausencia de vibraciones, reduciendo el ruido	Necesidad de filtrar el aire de admisión para evitar averías
Económicas en su instalación inicial	Sistemas de control complejo con supervisión
Idóneas para lucha antisubmarina	Cámaras especiales para reducir el ruido

Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de turbinas de gas (autoría propia basado en [33])

2.4.2.4 Propulsión nuclear

La propulsión nuclear se distingue por estar dotada de un reactor nuclear. Los estudios sobre la propulsión nuclear marina comenzaron en los años 40 y en 1953 se puso en marcha el primer reactor experimental en los Estados Unidos. El USS Nautilus (Figura 2-23), lanzado en 1955, fue el primer submarino impulsado por energía nuclear. Las embarcaciones de guerra impulsadas por energía nuclear ofrecen beneficios estratégicos y tácticos como la capacidad de resistir a altas velocidades, independencia del reabastecimiento en el mar, flexibilidad operativa y sigilo submarino a cualquier velocidad.

Actualmente, la Armada de los Estados Unidos cuenta con una flota nuclear que está compuesta por 11 portaaviones en servicio (más 2 en proceso de construcción) y 70 submarinos en servicio (más 3 en proceso de construcción). Es importante destacar que más del 45% de los buques de guerra de la Armada de los Estados Unidos están impulsados por energía nuclear [34]. Un aspecto fundamental para considerar es que los submarinos nucleares no requieren de oxígeno como las centrales eléctricas convencionales, lo que les otorga una larga resistencia o capacidad de misión antes de la necesidad de reabastecerse de combustible, limitados únicamente por la cantidad de suministros de alimentos y aire purificado disponibles a bordo [35].



Figura 2-23 Pintura USS Nautilus (SSN-571 [36])

Durante la Segunda Guerra Mundial, los submarinos se propulsaban con motores diésel que solo podían funcionar en la superficie, mientras que sus baterías eléctricas se agotaban durante la inmersión, lo que los obligaba a salir a la superficie y exponerse a la detección. Aunque se desarrollaron sistemas de snorkel para permitir la recarga de aire del submarino mientras permanecía sumergido, el uso de un reactor nuclear proporciona una capacidad de inmersión prácticamente ilimitada. Además, la alta densidad energética del combustible nuclear elimina la necesidad de frecuentes reaprovisionamientos por parte de petroleros, lo que reduce la vulnerabilidad de las flotas navales. En lugar de ello, un solo suministro de combustible nuclear es suficiente para largos períodos de tiempo [37]

2.4.2.5 Propulsión combinada

La propulsión combinada se traduce en el ámbito naval como la combinación dos fuentes de energía diferentes para impulsar un buque a través de un solo eje de hélice. Este sistema utiliza un sistema de transmisión y embragues que permiten acoplar ambos sistemas propulsores de manera independiente o simultánea al eje de hélice. De esta manera, se puede optimizar la eficiencia y la flexibilidad en la propulsión, permitiendo ajustar la combinación de fuentes de energía en función de las condiciones climáticas y de las necesidades de propulsión.

Los distintos tipos de propulsión combinada se utilizan en una amplia variedad de barcos militares, desde pequeñas embarcaciones como patrulleros y corbetas hasta barcos de mayor tamaño como destructores, fragatas y portaviones (Figura 2-24). La proporción de instalación de estas plantas combinadas sigue un patrón específico, y se puede ver cómo la combinación de motores diésel y turbinas de gas es la más popular, superando ampliamente a las demás opciones.

A continuación, se describirán diferentes formas de propulsión combinada, enfatizando las más utilizadas en la Armada. Estas incluyen los siguientes sistemas de propulsión: CODOG (Combined Diesel Or Gas) para las fragatas clase “Álvaro de Bazán”, CODLAG (Combined Diesel Electric And Gas) para las futuras fragatas F110 y CODOE (Combined Diesel or Electric) para los Buques de Acción Marítima clase “Meteoro”.

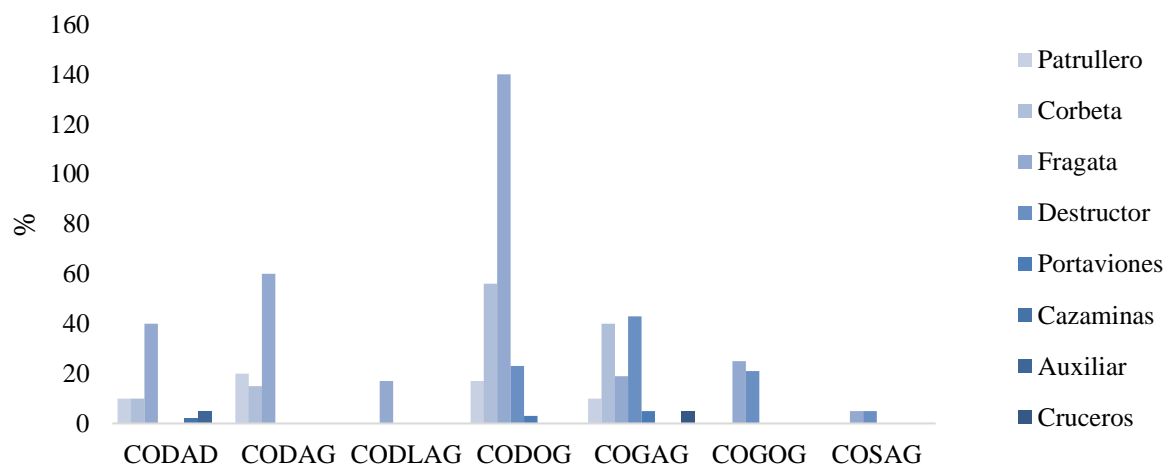


Figura 2-24 Distribución de propulsión por tipo de plataforma (autoría propia basado en [38])

2.4.2.5.1 Combined Diesel And Diesel (CODAD)

Sistema de propulsión naval conocido como “Propulsión de dos hélices alternas”, en el que se utilizan dos motores diésel para impulsar un único eje de hélice. Cuenta con un sistema de transmisión y embragues que permiten acoplar los dos motores de manera independiente o simultánea al eje de hélice (Figura 2-25). Esto brinda mayor flexibilidad y eficiencia en la propulsión, así como una mejor estabilidad y seguridad en situaciones de maniobra y fallo de los motores.

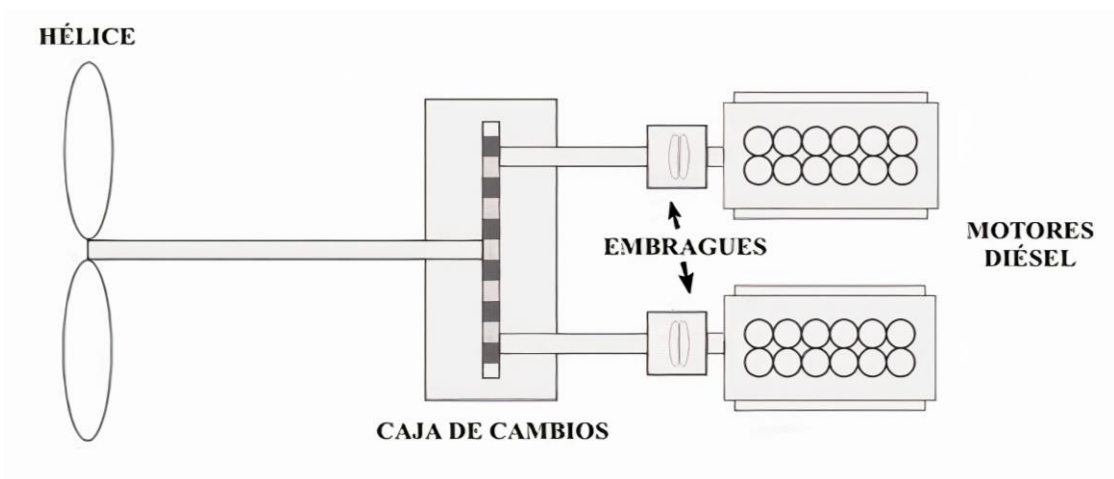


Figura 2-25 Esquema CODAD (autoría propia)

2.4.2.5.2 Combined Diesel Or Gas (CODOG)

Sistema en el que dos motores, generalmente diésel, impulsan dos hélices en serie en un solo eje (Figura 2-26). Permite una mayor eficiencia en la propulsión y una mayor flexibilidad en la maniobra, así como una mejor estabilidad, seguridad y mayor fiabilidad en caso de fallo de uno de los motores. Es una solución común para buques que requieren una velocidad máxima considerablemente mayor que su velocidad de crucero, especialmente para buques de guerra como fragatas o corbetas modernas.

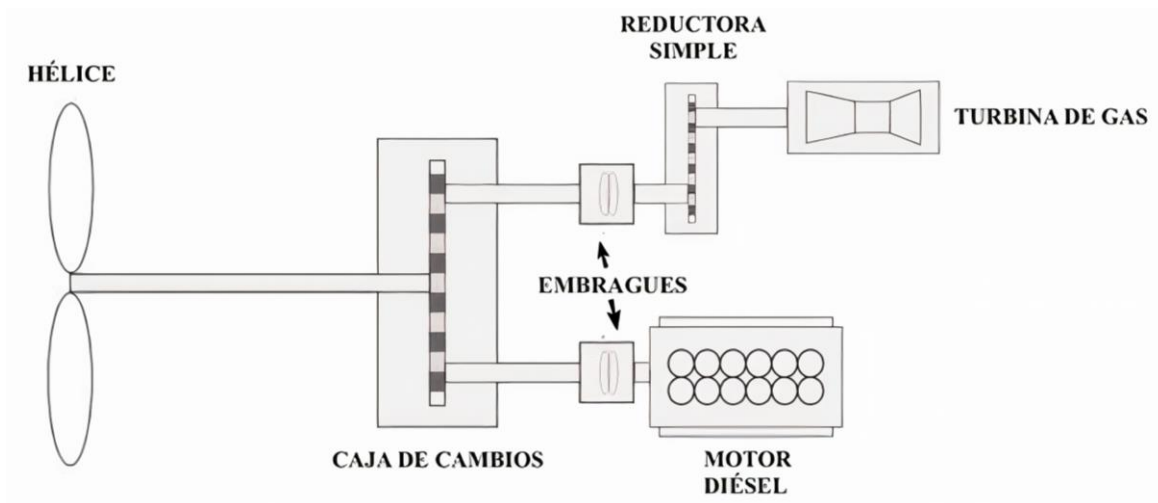


Figura 2-26 Esquema CODOG (autoría propia)

Este sistema se incorpora a las fragatas clase “Álvaro de Bazán” (Figura 2-27) de la Armada Española. Cuentan con dos turbinas de gas GE LM-2500 y dos motores diésel BAZAN CATERPILLAR.



Figura 2-27 Fragata Clase Álvaro de Bazán F-104 (Armada Española)

2.4.2.5.3 Combined Diesel And Gas (CODAG)

"Propulsión de dos hélices en paralelo", se caracteriza por tener dos motores, generalmente diésel, impulsan dos hélices en paralelo en un solo eje (Figura 2-28). Es utilizado en buques que requieren una combinación de velocidad y eficiencia en la propulsión, como navíos de guerra como las fragatas y corbetas modernas.

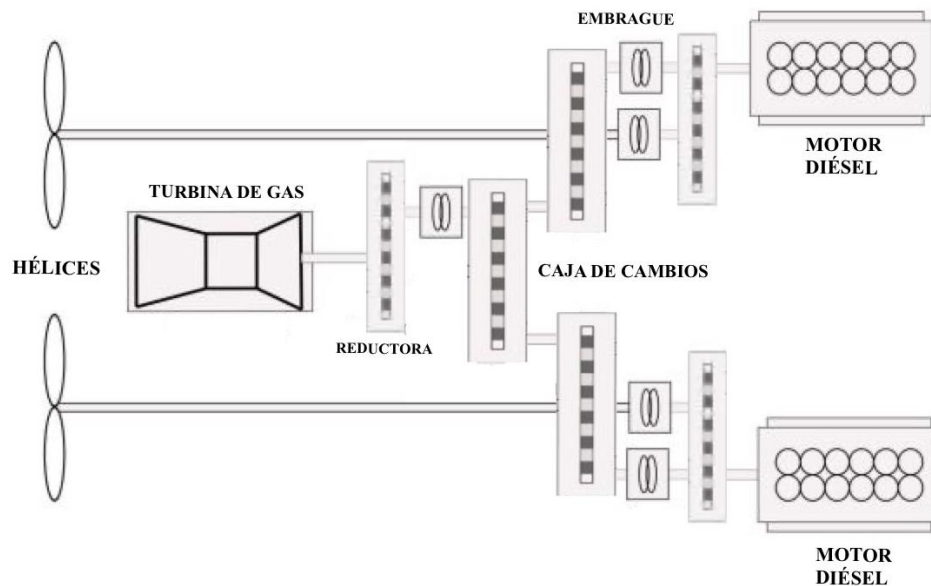


Figura 2-28 Esquema CODAG (autoría propia)

2.4.2.5.4 Combined Gas And Gas (COGAG)

Sistema que presenta dos turbinas de gas vinculadas a un solo eje de hélice (Figura 2-29). Esto permite una mayor flexibilidad en la gestión de la potencia y una mayor fiabilidad en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales con una sola turbina.

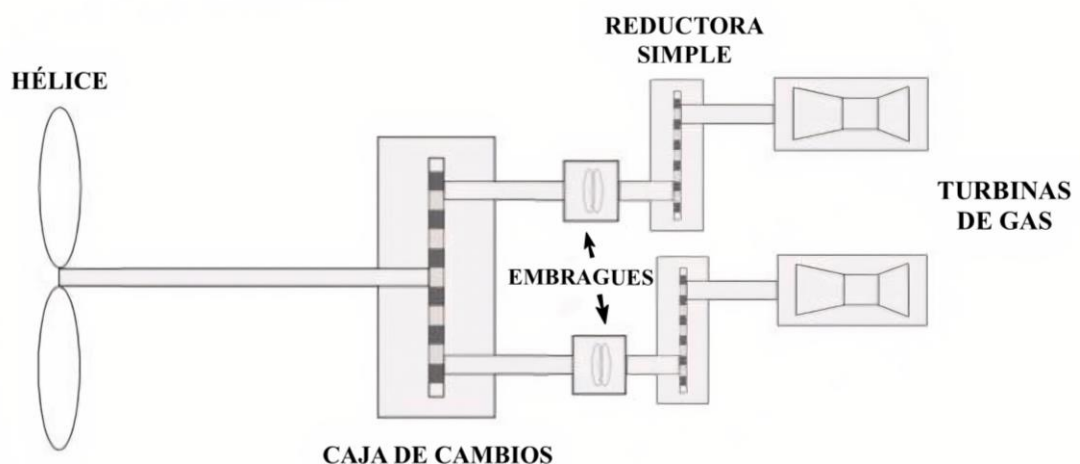


Figura 2-29 Esquema COGAG (autoría propia)

Este tipo de propulsión se encuentra en las fragatas clase Santa María (Figura 2-22) que cuentan con dos turbinas de gas LM-2500 de 40.000 CV cada una, con un árbol hélice.

2.4.2.5.5 *Combined Gas or Gas (COGOG)*

Sistema de embragues, en el que se utilizan dos turbinas de gas vinculadas a un solo eje de hélice (Figura 2-30). Proporciona una mayor flexibilidad en la gestión de la potencia y una mayor fiabilidad en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales con una sola turbina. Sin embargo, no permite que ambas turbinas funcionen simultáneamente para impulsar el eje de hélice.

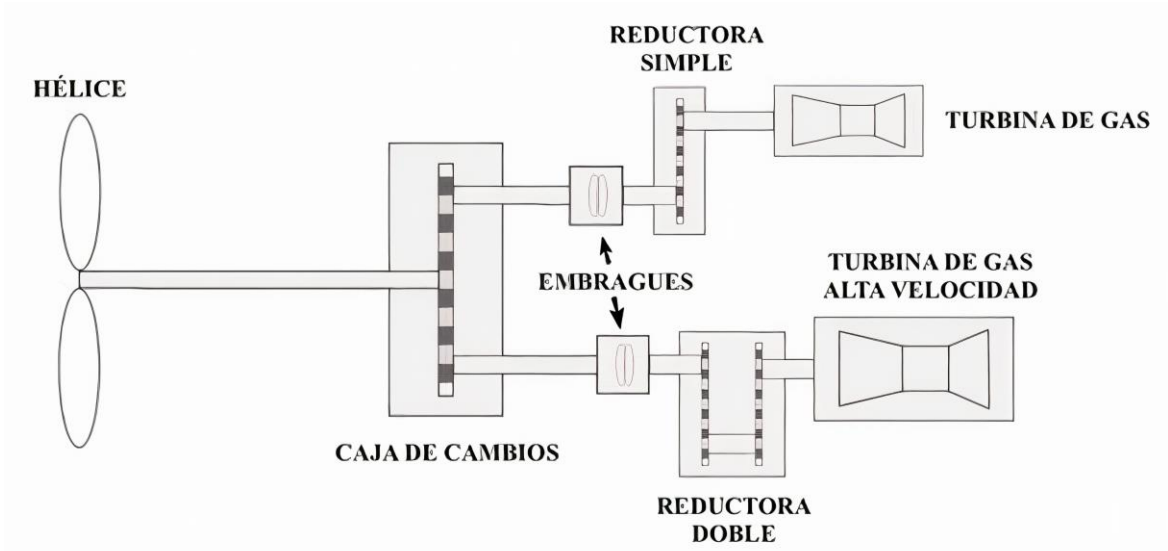


Figura 2-30 Esquema COGOG (autoría propia)

2.4.2.5.6 *Combined Steam And Gas (COSAG)*

Combina una turbina de vapor y una turbina de gas para impulsar los ejes de las hélices (Figura 2-31). Ambos sistemas pueden funcionar juntos o de manera separada, lo que brinda una mayor flexibilidad en la gestión de la potencia y una mayor fiabilidad en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales con un solo tipo de turbina. Esta combinación de tecnologías permite una mejor adaptación a diferentes demandas de potencia y una mayor seguridad en operaciones de alta intensidad.

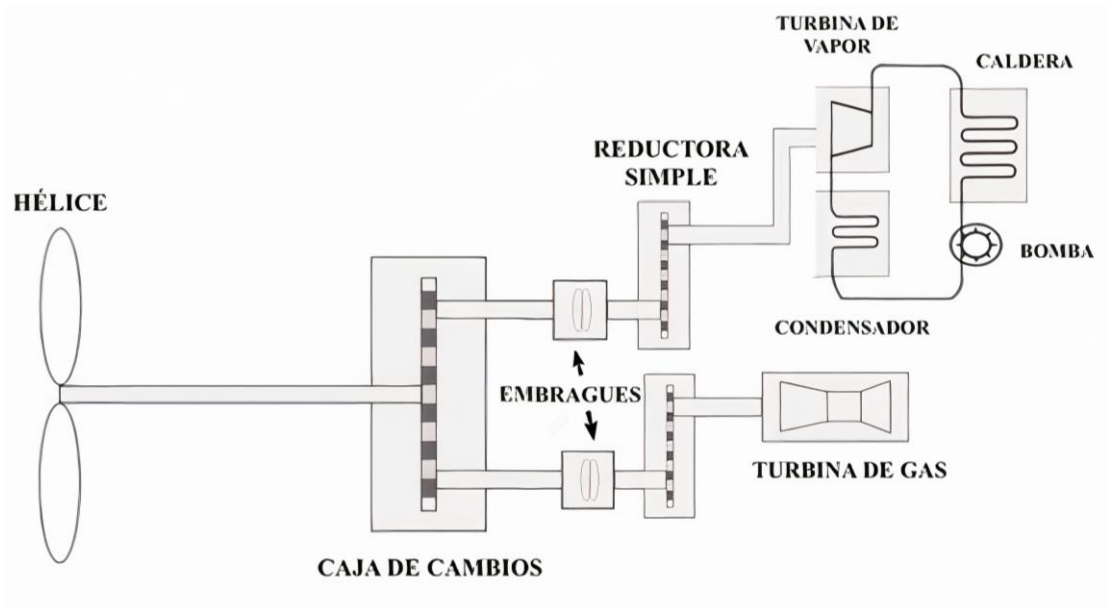


Figura 2-31 Esquema COSAG (autoría propia)

2.4.2.5.7 Combined Diésel Electric Or Gas (CODLOG)

Tiene los mismos componentes fundamentales que CODLAG, sin embargo, no es posible utilizar las fuentes de energía alternativas de forma concurrente. Puede alcanzar velocidades de hasta 16 nudos solo con sus motores eléctricos, y la electricidad que necesitan proviene de los generadores diésel. En estas condiciones, el sistema de transmisión de la turbina se desconecta mediante el uso de embragues (Figura 2-32). Sin embargo, para lograr velocidades más altas de hasta 27 nudos, una turbina de gas impulsa mecánicamente los árboles a través de una caja de transmisión.

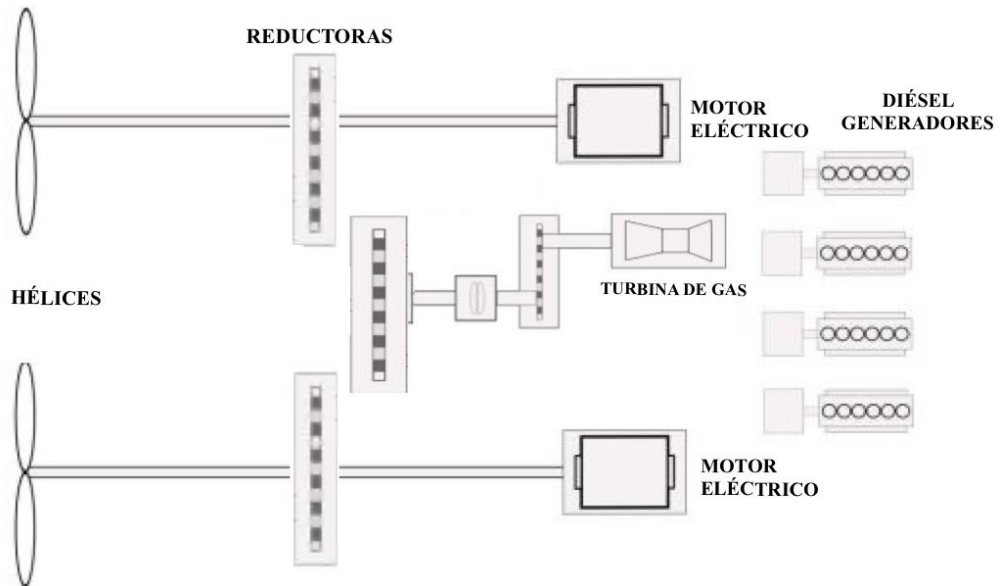


Figura 2-32 Esquema CODLOG (autoría propia)

2.4.2.5.8 Combined Diesel Electric And Gas (CODLAG)

Versión mejorada del sistema CODAG. Utiliza motores eléctricos que impulsan las hélices, los cuales son alimentados por generadores diésel en velocidades bajas a medianas (Figura 2-33). Para velocidades altas, se utiliza una turbina de gas.

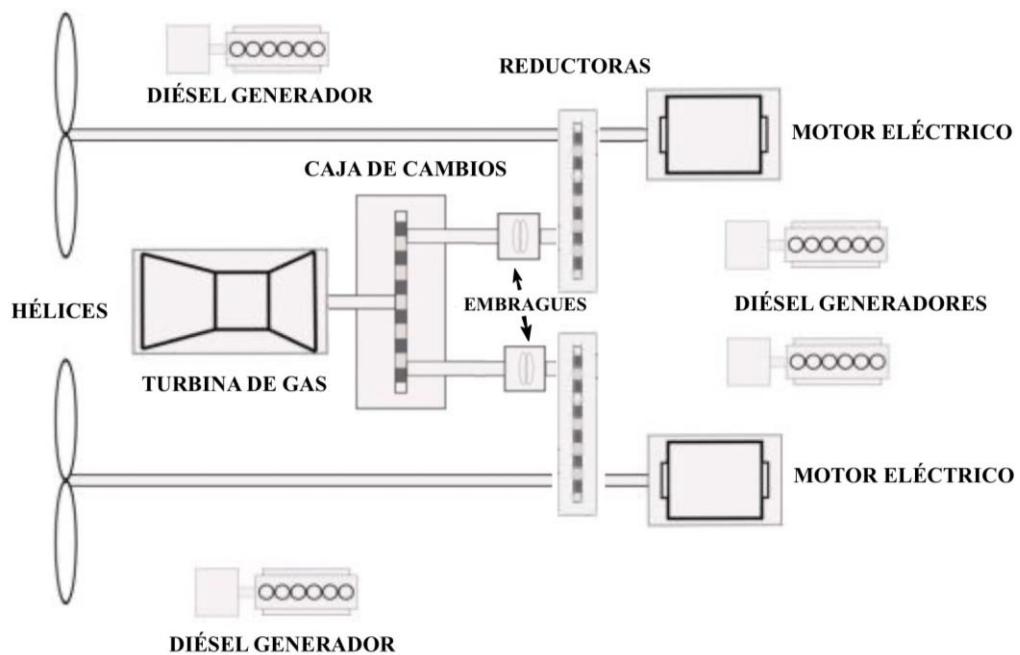


Figura 2-33 Esquema CODLAG (autoría propia)

La Armada está adoptando una nueva forma de propulsión para sus futuras fragatas F110 (Figura 2-34). Estas, contarán con una turbina de gas GE LM2500 y cuatro motores diésel que les permitirá alcanzar una velocidad máxima superior a 25 nudos [39].



Figura 2-34 F-110 (Armada Española) [40]

2.4.2.5.9 Combined Diesel Or Electric (CODOE)

Combina dos motores, ya sea diésel o eléctricos, para proporcionar potencia a una sola hélice (Figura 2-35). Un sistema de transmisión y embragues permite conectar de manera intercambiable los motores al árbol de hélices.

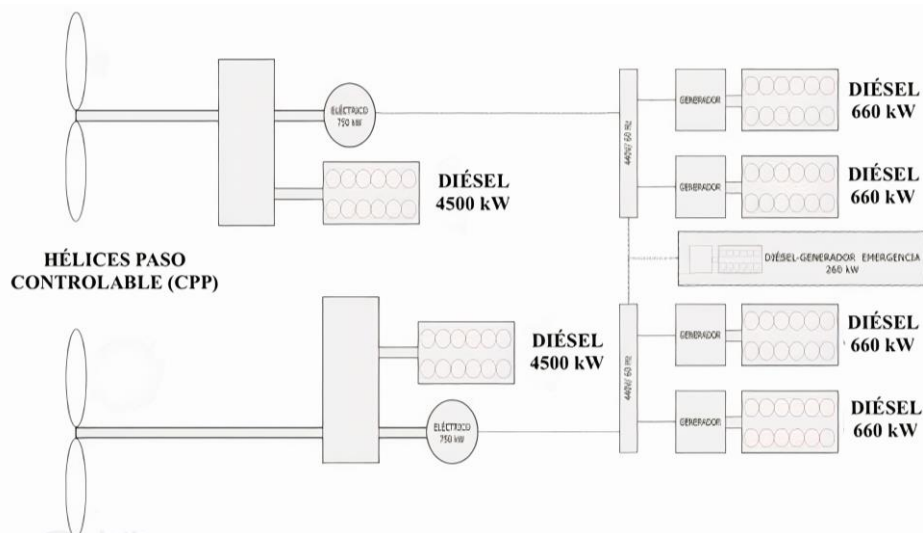


Figura 2-35 Esquema CODOE (autoría propia)

En la Armada, se puede encontrar este sistema de propulsión aplicado a los Buques de Acción Marítima clase “Meteoro” (Figura 2-36), que cuenta con dos motores diésel de 12.000 CV y dos motores eléctricos con una capacidad de 2.000 CV cada uno.



Figura 2-36 BAM Clase Meteoro P-41 (Armada Española) [28]

Tras analizar detalladamente los diferentes aspectos de los distintos tipos de propulsión combinada, se ha determinado que la combinación de motores diésel y turbinas es la más popular en los buques militares. En consecuencia, se procederá a analizar los combustibles alternativos para evaluar su posible implementación en los buques de la Armada que cuenten con este tipo de propulsión.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Comparación de combustibles alternativos

En este proyecto, se pretende investigar la viabilidad de emplear combustibles alternativos compatibles con los motores diésel marinos. Para ello, se van a establecer unos criterios de comparación y se van a analizar mediante un método comparativo para identificar la mejor opción de combustible alternativo.

Como se mencionó previamente (2.2.1.1), los combustibles se separan en dos categorías en base a su forma física. En este estudio nos centraremos en el metanol y etanol como combustibles líquidos y en el GNL e hidrógeno como los gaseosos.

Propiedades	Diesel	Metanol	Etanol	GNL	Hidrógeno
Densidad (kg m ³)	857	798	794	450	0,0838
Temperatura de autoignición (K a 1 bar)	530	743	635	810	858
Límites de inflamabilidad (vol. % aire)	0,7-5	6-36	3-19	4-16	4-75
Relación estequiométrica aire- combustible en base de masa	14,5	6,5	9,1	17,2	34,3
Valor calorífico neto (MJ/kg)	42,5	20,1	27	46-50,2	119,9
Velocidad de llama (cm/s)	30	50	41	380	265-325
Temperatura de llama (K a 1 bar)	2327	2163	2193	2233	2318
Número de octano	30	109	109	120	130
Número de cetano	40-55	<5	8	-10	-
Contenido de C (% peso)	85	38	52	75	0
Contenido de H ₂ (% peso)	15	12	13	25	100
Contenido de O ₂ (% peso)	0	50	35	0	0
Contenido de S (% peso)	<0,05	0	0	0	0

Tabla 3-1 Propiedades de los combustibles estudiados (autoría propia basado en [11])

Para comparar dichos combustibles se analizarán tanto sus propiedades (Tabla 3-1), como otros factores relacionados con la seguridad, disponibilidad a nivel global, capacidad de suministro, durabilidad, adaptabilidad, el efecto en el rendimiento del motor, el impacto en las emisiones y el coste. Estos criterios han sido escogidos por su relevancia en la evaluación y comparación de los combustibles en cuanto a su efectividad, rendimiento y sostenibilidad económica.

Con el objetivo de evaluar cada uno de los combustibles, se ha creado una tabla de evaluación para los criterios de comparación siguiendo un criterio de colores de mejor a peor, siendo el verde la mejor calificación, seguido por azul que representa una valoración bastante buena, amarillo que indica moderado, naranja malo y en color rojo la peor evaluación.

Escala de evaluación	Designación
Mejor	
Bastante bueno	
Moderado	
Malo	
Peor	

Tabla 3-2 Escala de evaluación de colores

3.1.1 Seguridad

La seguridad en el mar y en los barcos es un factor esencial y se tiene en cuenta al evaluar las nuevas tecnologías navales. En los combustibles alternativos, la seguridad, se puede determinar a través de diversos factores, como su densidad, temperatura de autoignición, propensión a la inflamabilidad, proporción de aire y combustible, y números de octano y cetano.

La Tabla 3-1 proporciona la información necesaria sobre las medidas de seguridad requeridas para su evaluación.

La densidad es un factor crítico en cuanto a la seguridad, y en caso de una filtración en un tanque de almacenamiento, el hidrógeno se disipará rápidamente debido a su baja densidad, mientras que el metanol y el etanol permanecerán debido a su densidad más elevada (Figura 3-1).

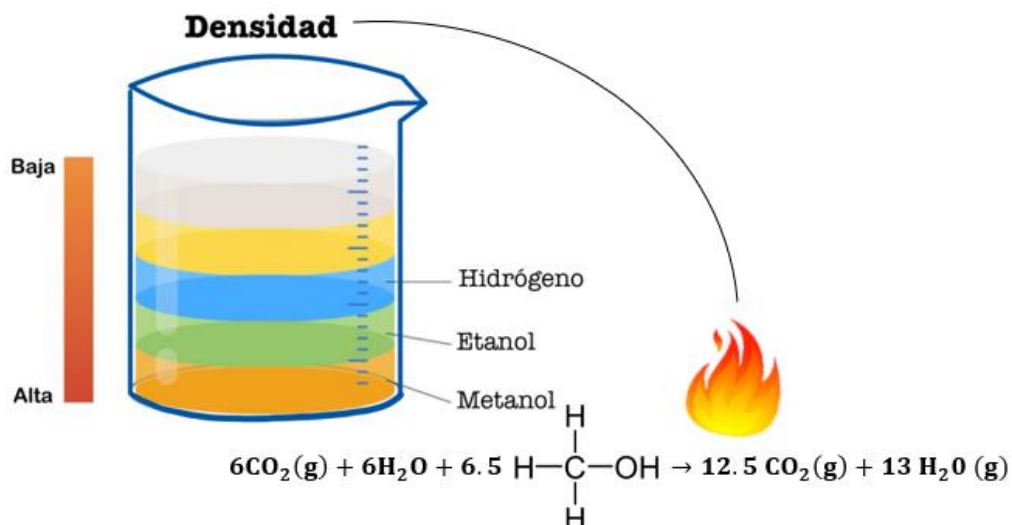
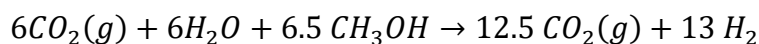


Figura 3-1 Propiedades de los combustibles alternativos (autoría propia)

Otra característica crucial para el ámbito de protección es la temperatura de autoignición, el hidrógeno tiene la más elevada, seguida por el GNL, el metanol y finalmente el etanol. Para su autoignición, el H₂ requiere de la temperatura ambiental más alta, alcanzando los 858 K. En contraste, el etanol necesita la temperatura más baja, que es de 635 K.

Los requisitos mínimos y máximos de los combustibles para explotar se conocen como los límites de inflamabilidad. La cantidad exacta de combustible necesaria en relación con el volumen de aire es un indicador de los límites de inflamabilidad. En comparación, el GNL tiene los límites más restrictivos, variando del 4 al 16%, mientras que el etanol varía del 3 al 19%, el metanol del 6 al 36% y el hidrógeno posee los límites más amplios, variando del 4 al 75%.

La capacidad de inflamación del hidrógeno es elevada debido a su fácil combustibilidad con diferentes mezclas de aire y combustible. La proporción óptima de aire y combustible para quemar completamente el combustible varía entre los diferentes tipos de combustible. El metanol requiere la menor cantidad de aire para quemarse completamente, mientras que el hidrógeno necesita la más alta. Esto se puede medir a través de la relación estequiométrica, la cual es de 6.5 para metanol, 9.1 para etanol, 17.2 para GNL y 34.3 para hidrógeno.



El número octano se refiere a la capacidad de un combustible de resistir la autoignición y los golpes, mientras que el número cetano mide el tiempo de retardo en la ignición y la eficiencia de la combustión. El hidrógeno tiene un número octano de 130, el más alto, pero no tiene un número cetano. En cambio, el gas natural licuado tiene un número octano de 120 y un número cetano de -10.

Por su parte, el etanol y el metanol tienen números octano de 109 y números cetano de 8 y menos de 5, respectivamente. Esto significa que el hidrógeno es el más difícil de auto encender, mientras que el metanol es el más propenso a hacerlo.

En términos de contenido de carbono, es importante destacar que el hidrógeno no tiene ningún contenido, lo que resulta en una menor huella ambiental, ya que emitirá menos gases y generará menos residuos de carbono después de quemarse. Por otro lado, el GNL es el peor en términos de impacto ambiental, ya que contiene un porcentaje del 75%. (Tabla 3-1).

La complejidad de distinguir ciertas propiedades hace imposible la evaluación de estos criterios utilizando la escala de cinco colores mencionada previamente (Tabla 3-2), por lo tanto, se utiliza una comparación entre ellas y se les asigna una evaluación basada en tres colores.

Basándose en la evaluación de seguridad, se ha otorgado al hidrógeno la puntuación más alta, lo que corresponde al color verde en la escala de evaluación de cinco colores. En cambio, el GNL ha recibido una puntuación moderada que se representa con el color amarillo. Por último, tanto el metanol como el etanol han sido clasificados con la puntuación más baja, lo que se indica con el color rojo, lo que significa la peor evaluación de seguridad (Figura 3-2).

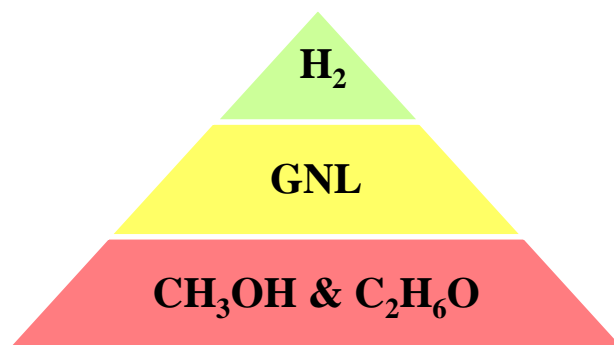


Figura 3-2 Evaluación de seguridad combustibles alternativos

3.1.2 Disponibilidad a nivel global

La disponibilidad a nivel global se refiere a la facilidad y popularidad de uso a nivel global. Es importante señalar que el GNL es una tendencia en la actualidad y sus áreas de suministro están aumentando (2.2.1.2).

La creciente confianza en el uso del GNL como combustible ha resultado en la construcción de 73 barcos propulsados por este combustible, junto con otros 80 que ya han sido ordenados y que se espera que se entreguen en un futuro cercano.

En un estudio de mercado [41], realizado en el buque Viking Energy (Figura 3-3), se encontró que el consumo diario de GNL era menor que el diésel tradicional, lo que podría generar un ahorro anual significativo en combustible.

A medida que la demanda de ahorro de combustible aumente, habrá más incentivos para utilizar GNL en lugar de combustibles convencionales. Aunque se espera que el precio del GNL siga siendo más bajo que el del fueloil, su mayor coste de construcción y los tiempos de amortización más largos siguen siendo un desafío para su adopción a gran escala.



Figura 3-3 Buque de suministro Viking Energy alimentado con GNL [42]

Actualmente se están utilizando sistemas de propulsión a base de gas natural licuado en distintos ámbitos marítimos, como por ejemplo en el transporte de vehículos entre Europa y América del Norte mediante dos cargueros de Volkswagen desde el año 2019.

También se ha firmado un contrato entre Navantia y Fred Olsen para transformar buques en sistemas propulsados por gas, siendo el primero de ellos un buque ropax de alta velocidad capaz de transportar pasajeros y mercancías. Existen otros proyectos españoles que apuestan por la construcción de unidades marítimas propulsadas por GNL en distintos sectores [41].

Por otro lado, la utilización de metanol y etanol en los motores diésel es una tecnología reciente, lo cual también incide en su aplicación en las embarcaciones. El metanol se perfila como un combustible atractivo para la industria marina, especialmente por su bajo contenido de azufre y un notable incremento en su eficiencia (2.2.1.1). A pesar de que su almacenamiento en condiciones normales es sencillo, se requiere alrededor del doble de espacio en tanques en comparación con los combustibles convencionales. [43].

“El metanol se considera cada vez más uno de los combustibles candidatos a ser utilizados en la descarbonización del transporte marítimo. Ya se utiliza como combustible marino en buques cisterna, buques de carga, transbordadores y embarcaciones portuarias” [44].

El empleo de la electrólisis alcalina del hidrógeno (2.2.1.3) no exige de amplias áreas o abastecimiento de combustible, y ha sido implementado por algunas empresas (Figura 3-4) en sus embarcaciones que transitan por las vías navegables interiores británicas. Aunque se trata de una tecnología probada y utilizada por muchos años en instalaciones terrestres y vehículos, su utilización en los barcos no ha sido lo suficientemente extendida [6].



Figura 3-4 Ferry de hidrógeno [45]

Podría afirmarse que el GNL se considera una tendencia y goza de múltiples aplicaciones para los barcos, lo que lo posiciona con un nivel "azul" (bastante bueno) de disponibilidad global. En cambio, el hidrógeno se clasifica como "amarillo" (moderado) debido a que es una tecnología ya probada, aunque reciente, pues se está empezando a implementar en embarcaciones. Por último, el metanol y etanol son tecnologías nuevas, con una aplicación marítima limitada, lo que las sitúa en el nivel "rojo" (peor) de disponibilidad (Figura 3-5).

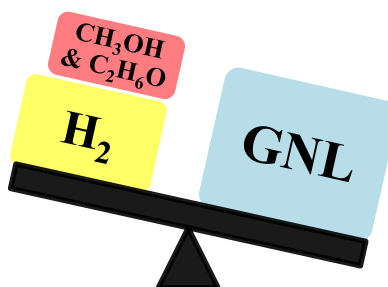


Figura 3-5 Disponibilidad global combustibles alternativos

3.1.3 Capacidad de suministro

La capacidad de suministro de combustible se encuentra estrechamente relacionada con la disponibilidad a nivel global (3.1.2). Esto se debe a que, en caso de que un gran número de barcos requieran un tipo particular de combustible, la capacidad de suministro para dicho combustible será elevada.

La capacidad de suministro de combustible de metanol y etanol en el entorno marítimo se encuentra restringida, lo cual afecta negativamente a la disponibilidad de estos combustibles. En contraste, se observa un aumento en la demanda del gas natural licuado (GNL), lo que a su vez impacta en su capacidad de suministro a nivel mundial.

A pesar de los esfuerzos por desarrollar la capacidad de suministro de GNL, ésta aún no resulta suficiente para atender la red global de suministro. Por fortuna, existen algunos puertos de suministro disponibles como Incheon (Corea), Buenos Aires (Argentina), Damietta e Idku (Egipto) y varios puertos en Europa [46].

El empleo de hidrógeno mediante un sistema de electrólisis alcalina prescinde de la necesidad de contar con suministro externo de hidrógeno, pues este se produce de forma autónoma. No obstante, dicho sistema requiere de agua pura para su funcionamiento. En caso de que la embarcación cuente con un generador de agua dulce a bordo (Figura 3-6), no se requerirá suministro externo de agua pura. Por otro

lado, si el barco no cuenta con un generador de agua dulce, el suministro de agua pura puede llevarse a cabo en cualquier puerto [47].



Figura 3-6 Futuro buque de hidrógeno GAIA [48]

La valoración de la capacidad de suministro del hidrógeno obtendría una calificación de nivel "azul" (bastante buena), ya que su única desventaja es la necesidad de agua dulce. En el caso del GNL, sería clasificado con un nivel "amarillo" (moderado) debido a la existencia de áreas de suministro, aunque estas no resultan adecuadas para satisfacer la demanda en su totalidad. Por último, el metanol y etanol se ubicarían en el nivel "rojo" (peor), debido a su capacidad limitada de suministro de combustible (Figura 3-7).

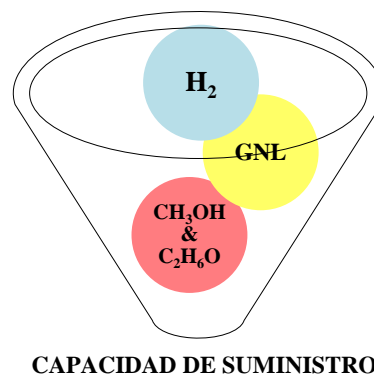


Figura 3-7 Valoración capacidad de suministro

3.1.4 Durabilidad

En este estudio, el término durabilidad se refiere a la capacidad de un combustible alternativo para ser utilizado a largo plazo. Esto está relacionado con las reservas globales de combustibles, la disponibilidad a nivel mundial, la capacidad de suministro de combustible y las tendencias futuras.

Las principales fuentes de las reservas mundiales de metanol y etanol son los combustibles fósiles, como el gas natural y el carbón, así como la biomasa, que es la fuente de producción de estos combustibles.

En consecuencia, la producción de metanol y etanol está íntimamente ligada a la disponibilidad de reservas globales de gas natural y carbón, así como a la tasa de producción de biomasa. En 2014, las reservas comprobadas de gas natural alcanzaron los 246.250 billones de metros cúbicos, según el EIA (Energy Information Administration) [49].

La cantidad de reservas de gas natural a nivel mundial es considerable, lo que garantiza su disponibilidad durante varias décadas, incluso si se toma en cuenta el consumo anual de este combustible. Según el EIA, estas reservas podrían ser suficientes para abastecer la demanda global de

gas natural por más de 50 años. La existencia de reservas globales de combustibles fósiles tiene un efecto positivo en la durabilidad de otros combustibles, como el metanol, etanol y GNL, cuya producción también depende de estos recursos.

En el caso del hidrógeno, la producción a través de un sistema de electrólisis alcalina es una alternativa que solo requiere agua pura como materia prima. Sin embargo, la disponibilidad de agua pura no suele ser un problema relacionado con las reservas, ya que se trata de un recurso renovable y abundante en la mayoría de las regiones del mundo (3.1.2).

3.1.5 Adaptabilidad

La viabilidad de adaptar sistemas de combustible alternativos a nuevos buques es mayor que la de aplicarlos a buques existentes, debido a la limitación de espacio y a las modificaciones necesarias en el motor principal.

En el caso de los sistemas de combustible de metanol y etanol, se necesita instalar tanques de combustible adicionales o convertir los tanques de lastre existentes a bordo en tanques de combustible. También es necesario disponer de espacio para salas separadas de bombas de transferencia y bombas de alta presión.

Para suministrar combustible al motor principal se requieren tuberías de doble pared además de inyectores de combustible adicionales y bombas de combustible en el motor principal para asegurar la entrega de combustible a los cilindros [50].

Los buques propulsados por gas natural licuado necesitan tanques especiales, así como espacio de conexión del tanque para acondicionar el GNL en el tanque y proporcionar la entrega al motor principal. También necesitan espacio de ventilación de gas, tuberías de gas de doble pared, estaciones de bunkering especialmente protegidas, separación del motor principal de la sala de máquinas por paredes y un espacio de maquinaria seguro para el gas [51].

El uso de hidrógeno por medio de un sistema de electrólisis alcalina no requiere un tanque para agua pura si el barco tiene un generador de agua dulce, pero se puede utilizar un tanque de agua dulce para el almacenamiento de agua pura si el barco no lo tiene. Se necesita espacio en la sala de máquinas para las células de electrólisis alcalina y las unidades de control. Se requiere tubería de doble pared y pequeñas modificaciones en el turbocargador del motor principal para aplicarlo a un buque. Además de este equipo de seguridad del sistema, se necesitan alarmas y ventilación adecuada [52].

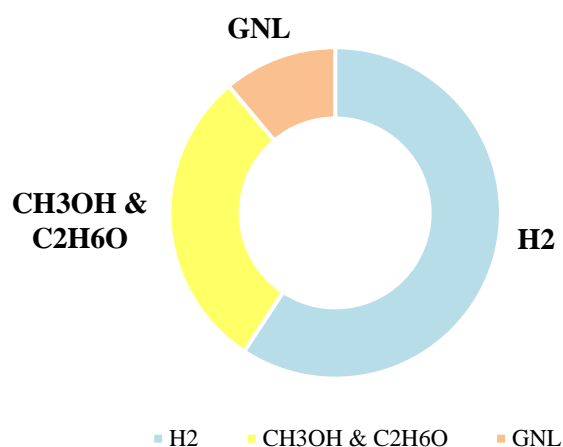


Figura 3-8 Adaptabilidad de los combustibles alternativos

Si analizamos los distintos sistemas, se puede notar que el uso de GNL requiere especificaciones más rigurosas en comparación con los sistemas que utilizan metanol, etanol o hidrógeno. De todas las opciones, el hidrógeno es el que presenta los requerimientos más accesibles para adaptarse a un barco ya existente, aunque todavía son necesarias algunas medidas previas (Figura 3-8).

Debido a estas consideraciones, se le otorga al hidrógeno una calificación de color azul (bastante buena). Por su parte, tanto el metanol como el etanol son clasificados con un color amarillo (moderado), en virtud de que requieren modificaciones de cierta magnitud.

El GNL, en cambio, obtiene una calificación de color naranja, aunque no llega a la peor calificación, ya que se requieren cambios significativos en los buques existentes para poder adaptarlo. Es importante mencionar que este sistema puede ser aplicado a un barco de nueva construcción con un plan preliminar.

3.1.6 Efecto en el rendimiento del motor

El rendimiento del motor puede verse afectado de manera positiva o negativa por el uso de combustibles alternativos. Es importante entender el concepto de BTE (Brake Thermal Efficiency) que consiste en la proporción de energía térmica liberada en la combustión de un combustible convirtiéndose en energía mecánica útil en el eje del motor. Se trata de la eficiencia con la que el motor convierte la energía química contenida en el combustible en energía mecánica.

Por otro lado, el BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) es una medida que evalúa la eficiencia del motor en cuanto a la cantidad de combustible necesario para producir un trabajo mecánico determinado. Se trata de una herramienta para medir la eficiencia del motor en términos de consumo de combustible [6].

El metanol y el etanol son comúnmente usados como combustibles en motores de combustión interna. Sin embargo, estos combustibles disminuyen el BTE debido a su contenido energético inferior al de la gasolina, ya que contienen oxígeno en su composición. Además, su relación de compresión es diferente a la requerida por la gasolina, lo que puede disminuir aún más su eficiencia térmica.

Otro factor importante es su elevado calor latente de vaporización, lo que significa que requieren más calor para vaporizarse y mezclarse adecuadamente con el aire antes de la combustión (Tabla 3-1). Por otro lado, el metanol y etanol aumentan el BSFC debido a su valor calorífico neto menor [53].

De manera distinta, la adición de GNL e hidrógeno en el motor diésel puede mejorar la BTE y disminuir el BSFC. Esto se debe a que tienen mayor poder calorífico y mejores características de combustión que el combustible diésel convencional ([54] y [55]).

Como conclusión se otorga la calificación más alta de color verde al GNL y al hidrógeno, debido a su impacto positivo en el rendimiento del motor, mientras que el metanol y etanol reciben la peor calificación de color rojo por su impacto negativo. No obstante, al no existir estudios que comparen directamente el efecto de estos combustibles alternativos en el rendimiento del motor, no es posible establecer su importancia relativa de forma precisa (Figura 3-9).

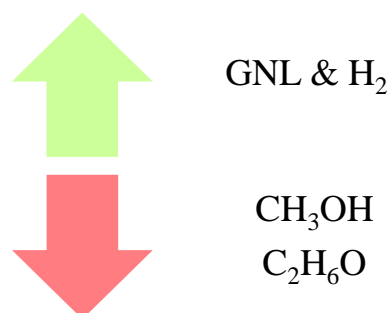


Figura 3-9 Evaluación combustibles alternativos en el rendimiento del motor

3.1.7 Efecto en las emisiones del motor

El objetivo principal de emplear combustibles alternativos a bordo de los barcos es disminuir las emisiones generadas por el transporte marítimo, las cuales pueden diferir en función del tipo de combustible utilizado.

La siguiente gráfica (Figura 3-10), muestra el efecto de los combustibles alternativos en las emisiones del motor con respecto a los combustibles fósiles. Como se puede observar, el metanol y etanol disminuyen la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y partículas menores (PM), mientras que incrementan la emisión de dióxido y monóxido de carbono (CO₂ y CO). El GNL disminuye las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y PM, aunque aumenta la emisión de CO.

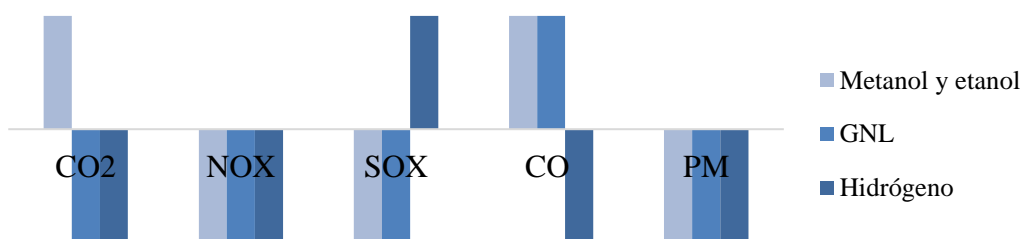


Figura 3-10 Efecto de los combustibles alternativos en la emisión del motor

Sin embargo, al utilizar GNL como combustible, se produce un fenómeno conocido como "escape de metano" que anula el efecto de reducción de las emisiones de CO₂. Este fenómeno ha sido eliminado en los motores diésel de dos tiempos, y reducido a niveles mínimos en los motores diésel de cuatro tiempos gracias al desarrollo tecnológico. Debido a esto, al realizar la evaluación, se pasa por alto la liberación de metano. [56]

Por otro lado, el hidrógeno, ayuda a reducir las emisiones de CO₂, CO, y PM, aunque su impacto en las emisiones de NO_x varía según las condiciones de operación del motor.

Los estándares internacionales de emisiones están vinculados a la regulación global MARPOL, que establece límites para las emisiones que están cubiertas por esta regulación (Figura 2-12 y Figura 2-13).

3.1.8 Enfoque económico

A lo largo de este estudio se ha podido comprobar que el hidrógeno tiene un gran potencial como combustible prometedor debido a su alta densidad energética y capacidad de carga rápida, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de transporte pesado o de larga distancia. Sin embargo, su desventaja principal es el coste de transporte y almacenamiento, debido al almacenamiento criogénico que supone un problema económico [1]. Para ser una opción de combustible competitiva en términos económicos, se necesita reducir su coste, especialmente en su transporte y almacenamiento.

Aunque la producción de hidrógeno es costosa en comparación con otros combustibles, su precio puede volverse más competitivo a medida que se desarrollen nuevas tecnologías de producción y se logren economías de escala. En el corto plazo, se espera que el hidrógeno sea más caro que el gas natural, pero su precio puede mejorar en el futuro [57].

Por otra parte, el gas natural licuado (GNL) puede ayudar a cerrar la brecha entre la economía actual basada en los combustibles fósiles y la futura economía basada en el hidrógeno. Además, es posible crear una mezcla de hidrógeno y gas natural y permitir que se transmita a través de los sistemas de gasoductos existentes [1].

El GNL tiene un coste de producción relativamente bajo ya que se extrae de reservas de gas natural. En comparación con otros combustibles alternativos, tiene una ventaja en términos de infraestructura, ya que los vehículos que funcionan con GNL pueden usar la misma red de suministro que los vehículos diésel. No obstante, el coste de infraestructura para instalar estaciones de suministro de GNL puede ser alto.

El etanol y el metanol son biocombustibles que se pueden producir a partir de fuentes renovables como maíz, caña de azúcar, biomasa y residuos agrícolas. El coste de producción de estos biocombustibles depende en gran medida de la materia prima utilizada y la tecnología de producción empleada.

En general, el etanol es más económico de producir que el metanol. Sin embargo, la producción de biocombustibles también puede tener efectos negativos en la disponibilidad de alimentos y en el uso de la tierra, lo que puede aumentar el coste total del combustible [10].

La evaluación final otorga una calificación amarilla tanto al GNL como al etanol y metanol. El gas natural licuado es relativamente barato de producir gracias a la disponibilidad de gas natural y la infraestructura existente, mientras que el coste del etanol y metanol depende en gran medida de la materia prima y la tecnología utilizada, siendo el etanol más económico que el metanol.

En contraste, el hidrógeno es calificado con la puntuación más baja, de color "rojo", ya que su producción es la más costosa en comparación con otros combustibles debido a su elevado precio. Sin embargo, se espera que esta situación cambie en un futuro cercano con la posibilidad de reducir su precio (Figura 3-11).

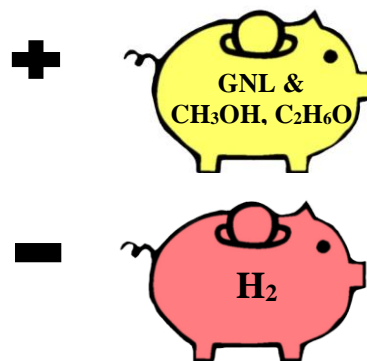


Figura 3-11 Evaluación coste

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Proceso Analítico Jerárquico

El objetivo de este estudio es identificar el combustible alternativo más apropiado para ser utilizado en los buques de la Armada. Para este propósito, se realiza una evaluación detallada de los criterios y alternativas relacionados con los combustibles previamente mencionados.

Se ha llevado a cabo una evaluación minuciosa utilizando la herramienta PAJ (Proceso Analítico Jerárquico) para determinar el peso de las alternativas, que en este caso serán los combustibles que se van a estudiar: hidrógeno, GNL, etanol y metanol.

En 1980, el profesor matemático y economista Thomas L. Saaty (Figura 4-1) de la universidad de Pittsburgh, desarrolló una herramienta matemática y psicológica llamada Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), o Analytic Hierarchy Process (AHP) en inglés.



Figura 4-1 Thomas L. Saaty

Antes de su ingreso a la universidad, Saaty trabajó en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, donde desarrolló este método como una solución para analizar cómo podría haber mejorado el proceso de toma de decisiones en dicha entidad gubernamental.

Este método se emplea para tomar decisiones complejas en situaciones en las que hay poca información o es difícil la evaluación de los datos disponibles. El PAJ ofrece soluciones que satisfacen las necesidades y comprensión del problema y se aplica ampliamente en diversos campos, incluyendo

la empresa, la economía y la investigación [58]. Esta herramienta se caracteriza por su gran rigurosidad académica, dado que se basa en fundamentos psicológicos, matemáticos y cuenta con diversas comprobaciones empíricas.

Dentro de los fundamentos psicológicos, el profesor Saaty, apoyándose en los estudios de psicólogos eminentes de finales del siglo XIX y principios del XX, sostiene que la mente humana tiene fortalezas y debilidades específicas, siendo una de sus debilidades las comparaciones globales, mientras que una de sus fortalezas es la capacidad para hacer comparaciones por pares de elementos.

Propone una escala numérica (Tabla 4-1) para cuantificar estas comparaciones pareadas, asignando una puntuación de 1 cuando dos elementos son igual de importantes, una puntuación de 3 cuando uno es moderadamente más importante, 5 cuando un elemento es significativamente más importante, una puntuación de 7 cuando es mucho más importante y una puntuación de 9 cuando es extremadamente más importante. Cabe señalar que esta escala se utiliza para evitar comparaciones globales que pueden resultar imprecisas.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Ambos componentes tienen una contribución equitativa en la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa otorgan una ventaja a un elemento en comparación con el otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa confieren una ventaja significativa a un elemento en comparación con el otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento ejerce un dominio significativo. Su superioridad ha sido demostrada en la práctica.
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento prevalece sobre el otro con el máximo nivel de magnitud posible.
2,4,6 y 8	Valores intermedios cuando se requiere clarificar	

Tabla 4-1 Escala fundamental de comparaciones pareadas (autoría propia basado en [59])

En efecto, la Ley de Weber-Fechner afirma que: “*el menor cambio perceptible en la magnitud de un estímulo es directamente proporcional a la magnitud del propio estímulo*” [60]. Debido a que la relación entre la magnitud del estímulo y su percepción se rige por una escala logarítmica, lo que significa que cuando la magnitud del estímulo se incrementa en una progresión geométrica, la percepción aumenta en una progresión aritmética. Es por esta razón que el PAJ utiliza una escala elemental que va de 1 a 9, la cual ha sido probada en numerosas situaciones empíricas en el mundo real y ha demostrado ser eficaz.

Para explicar el método PAJ, se seguirá el siguiente diagrama de flujo (Figura 4-2), teniendo en cuenta que este proceso se repetirá las mismas veces que criterios se analicen.

Además, se explicará cómo obtener las ponderaciones de las alternativas para el método de decisión, mientras que la ponderación de los criterios se realizará mediante encuestas que se explicarán más adelante.

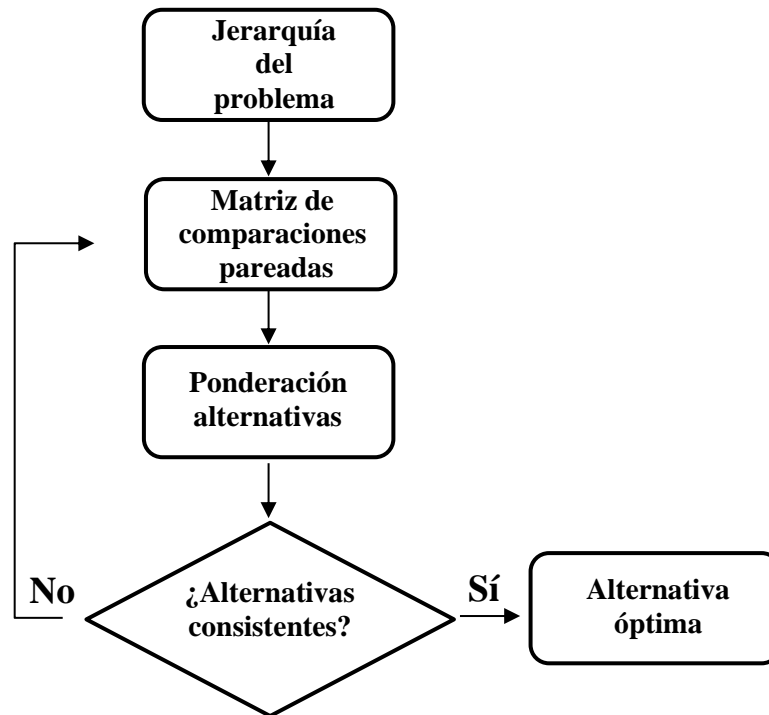


Figura 4-2 Diagrama de flujo método Proceso Analítico Jerárquico

4.1.1 Jerarquía del problema

En primer lugar, se elabora una estructura jerárquica en la que se sitúa en la parte superior el objetivo a conseguir y en la parte inferior los criterios y alternativas (Figura 4-3).

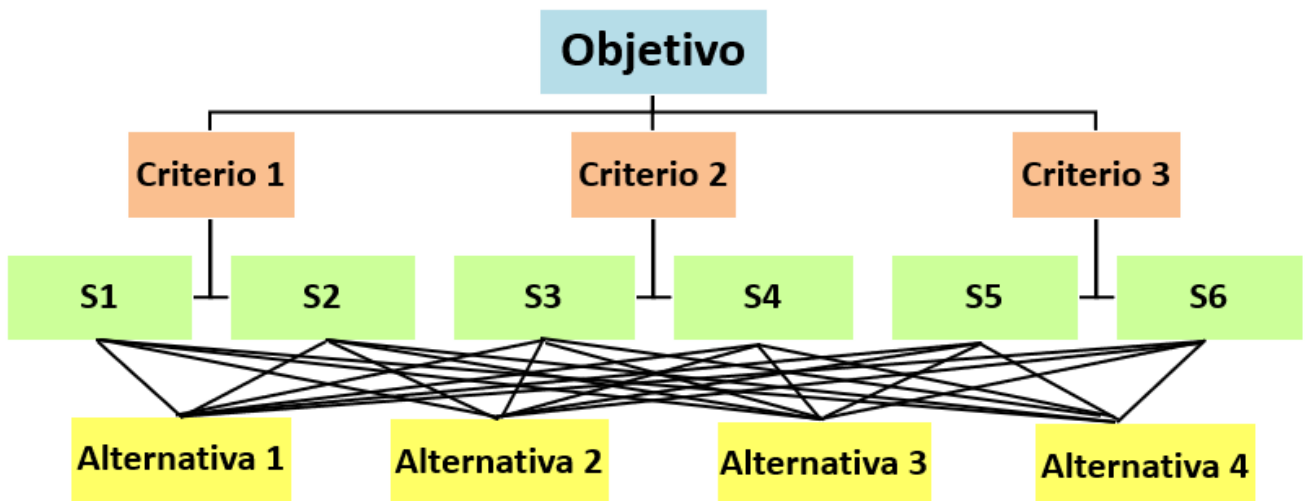


Figura 4-3 Ejemplo modelo jerárquico para la toma de decisiones

Esta técnica emplea múltiples criterios o variables organizados en una jerarquía. El objetivo principal se encuentra en la parte superior, mientras que los criterios y subcriterios se ubican en los niveles inferiores. Además, permite manejar posibles contradicciones entre ellos, para llegar a una decisión más objetiva y clara.

4.1.2 Matriz de comparaciones pareadas

En segundo lugar, se crea una matriz de decisión que se llamará "matriz de comparación pareada". Esta matriz determina la importancia de los criterios o alternativas, es decir, proporciona una comparación entre ellos.

Para determinar la importancia, se comparan las alternativas entre sí y se les asigna un número correspondiente. El procedimiento será el siguiente: primero, se le asigna un valor de 1 a la alternativa que se considera menos importante en comparación con la otra. Luego, utilizando la escala de comparación pareada de Saaty (Tabla 4-1), se evalúa cuanto más importante es la alternativa en comparación con la otra. De esta manera, se puede establecer un ranking de importancia para cada alternativa y facilitar la toma de decisiones. Es crucial ser claro y preciso en la asignación de puntuaciones para asegurar que los resultados sean confiables y útiles.

Es importante tener en cuenta que la diagonal principal de la matriz es igual a uno, ya que se está comparando cada alternativa consigo misma. Además, solo es necesario realizar las comparaciones que se encuentran por encima de la diagonal principal, ya que las comparaciones que se encuentran por debajo son simplemente la inversa de estas.

Este proceso se lleva a cabo de forma individual para cada una de las alternativas. De este modo, se construye una matriz C de tamaño $n \times n$ donde " a_{ij} es el elemento (i, j) de A , para $i = 1, 2, \dots, n$ y $j = 1, 2, \dots, n$ siendo n el número de alternativas a utilizar, donde cada elemento de la matriz es la medida de preferencia de la alternativa de la fila i en comparación con la alternativa de la columna j " [61].

Es importante destacar que cuando se compara una alternativa consigo misma ($i = j$), el valor del elemento a_{ij} será siempre igual a 1, debido a que no hay preferencia entre alternativas.

$$C = \begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad \text{se verifica : } c_{ij} \times c_{ji} = \frac{1}{c} = \begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ \frac{1}{c_{12}} & 1 & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{c_{1n}} & \frac{1}{c_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

En consecuencia, la matriz C cumple con los requisitos de reciprocidad, homogeneidad y consistencia, que se definen de la siguiente manera:

- **Reciprocidad:** Si $c_{ij} = x$, entonces $c_{ji} = \frac{1}{x}$, con $1/2 \leq x \leq 2$
- **Homogeneidad:** Si los elementos i y j son considerados igual de importantes entonces

$$c_{ij} = c_{ji} = 1 \text{ además } c_{ii} = 1 \text{ para todo } i$$

- **Consistencia:** Se satisface que $c_k \cdot c_{kj} = c_{ij}$ para todo $1 \leq i, j, k \leq q$

4.1.3 Cálculo del vector propio y ponderación de las alternativas

Una vez obtenida la matriz de comparación pareada, se llevan a cabo los siguientes pasos para determinar el peso de cada una de las alternativas, lo que se denominará vector propio:

Paso 1

Se realiza la multiplicación de la matriz C por sí misma obteniéndose la matriz D ($D = C \times C$)

$$C = \begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}; \quad D = C \times C = \begin{pmatrix} 1 & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 1 & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

A continuación, se suman los valores de cada columna, de esta manera se obtienen los siguientes resultados:

$$p_1, p_2, \dots, p_n = \sum_1^n c_i$$

Paso 2

Una vez calculada la suma, se normaliza la matriz D, dividiendo cada término de la matriz por la suma de cada columna:

$$E = D_{\text{normalizada}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{p_1} & \frac{d_{12}}{p_2} & \dots & \frac{d_{1n}}{p_n} \\ \frac{d_{21}}{p_1} & \frac{1}{p_2} & \dots & \frac{d_{2n}}{p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d_{n1}}{p_1} & \frac{d_{n2}}{p_2} & \dots & \frac{1}{p_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \dots & e_{nn} \end{pmatrix}$$

Paso 3

A continuación, se procede a calcular la media de cada fila, la cual nos proporciona el peso o ponderación de cada alternativa, lo que se llamará vector propio (V). Este, se representará en una escala de 0 a 1.

$$V = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_1^n e_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_1^n e_{2j} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_1^n e_{nj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

4.1.1 Consistencia de las alternativas

La consistencia es muy importante para contrastar la opinión de especialistas en una disciplina particular y la información proporcionada. El método nos dice que, si la consistencia es aceptable, el proceso de toma de decisiones puede avanzar. En caso contrario, el individuo responsable de la toma de decisiones deberá revisar las evaluaciones de las comparaciones pareadas antes de proseguir con el análisis. Cuando la consistencia es igual a cero, se puede afirmar que la consistencia es total.

A continuación, se detallan los pasos necesarios para determinar la consistencia de la matriz:

Paso 1

Se multiplica la matriz original C por el vector propio (V), que se describe en la sección anterior. Este producto recibe el nombre de vector fila total (T):

$$T = \begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix}$$

Paso 2

Se divide cada valor del vector fila total entre el correspondiente valor del vector propio, obteniéndose así lo que se llamará cociente (Q):

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{t_1}{v_1} \\ \vdots \\ \frac{t_n}{v_n} \end{pmatrix}$$

Paso 3

Después de obtener los cocientes correspondientes, se calcula la media de dichos valores para determinar el valor máximo de lambda.

$$\lambda_{\max} = \frac{\left(\frac{t_1}{v_1} + \dots + \frac{t_n}{v_n}\right)}{n}$$

Paso 4

El valor λ_{\max} nos permitirá conocer el Índice de Consistencia (IC) mediante la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

Paso 5

Se calcula la Razón de Consistencia o RC, dividiendo el IC entre el Índice Aleatorio (IA) que muestra la Tabla 4-2. Estos valores se obtienen a partir de un gran número de matrices recíprocas positivas de orden n generadas de manera aleatoria.

$$CR = \frac{IC}{IA}$$

Tamaño matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabla 4-2 Índice aleatorio basado en [59]

Para que una matriz sea considerada consistente, la razón de consistencia (RC) no debe superar los valores de la Tabla 4-3. En caso de que esto suceda, no se podrá continuar con el proceso de toma de decisiones, y será necesario volver a la matriz de comparación pareada original para revisar la importancia de las alternativas (4.1.2). Por otro lado, si la RC se encuentra dentro de los valores permitidos, se podrá continuar con el método para obtener la mejor alternativa.

Tamaño matriz (n)	Razón de consistencia
3	5%
4	9%
≤5	10%

Tabla 4-3 Valores máximos de la RC

4.1.1 Elección de alternativa óptima

En caso de que la matriz en cuestión resulte ser consistente, se podrá proseguir con el proceso para determinar la mejor alternativa. El método PAJ posibilita la toma de decisiones teniendo en cuenta la importancia de las alternativas y criterios establecidos.

Para la elección de la alternativa óptima, se debe multiplicar la ponderación de cada alternativa (obtenida a partir del vector propio de cada matriz de consistencia) por la ponderación de los criterios, que se representa mediante el vector S.

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}$$

La siguiente sección explicará con más detalle el vector S y cómo se obtiene (4.2.1).

$$\text{Alternativa óptima} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}$$

4.2 Evaluación de combustibles alternativos

4.2.1 Selección de criterios de comparación

En este estudio se ha aplicado el método PAJ para identificar el combustible alternativo más apropiado para implementar en la Armada. Para ello, es necesario establecer unos criterios que permitan obtener la ponderación o valor de cada uno de ellos para evaluar las alternativas.

Con el fin de establecer unos criterios que resultaran fiables, se han realizado diversas encuestas (Figura 4-4) a los oficiales destinados en el servicio de máquinas de los buques anteriormente citados. La encuesta solicita que se clasifiquen los criterios para la implementación de combustibles alternativos en los buques de la Armada, en orden de importancia de mayor a menor.

Propulsión sostenible

Ranking de mayor a menor importancia (1 al 8) de los siguientes criterios

Por favor, ordene los siguientes criterios de mayor a menor importancia para implementar combustibles alternativos en los buques de la Armada *

	1	2	3	4	5	6	7	8
Seguridad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disponibilidad a nivel global	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Capacidad de suministro	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durabilidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Adaptabilidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Efecto en el rendimiento del motor	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Efecto en las emisiones	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Coste	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 4-4 Encuesta ranking criterios

Además, es necesario determinar el peso de cada criterio, de modo que se pueda obtener una clasificación en cuanto a su importancia en el ámbito marítimo. Esta categorización se realiza a través de las encuestas en las que los oficiales asignan una puntuación, estableciendo así un ranking del 1 al 8. Los resultados obtenidos de dicha encuesta se presentan en la Figura 4-5. En ella se muestra la seguridad como criterio más importante, con el 80% de las votaciones, lo que indica que es un factor crucial para determinar el combustible óptimo. La disponibilidad del efecto en el rendimiento del motor sigue en segundo lugar con un 72%, seguido por el efecto en las emisiones con un 64% y un 51% para el coste. Esto coloca a la seguridad en el primer lugar de la clasificación y a la durabilidad, con un 12%, en el último lugar según las respuestas de los oficiales.

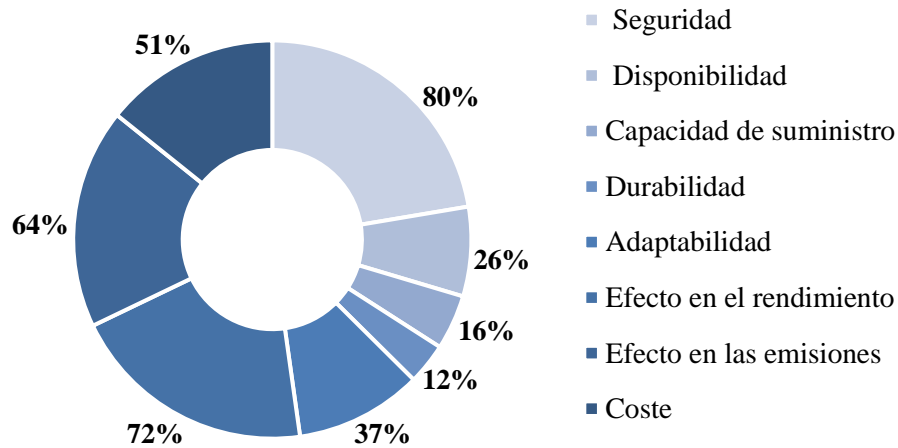


Figura 4-5 Diagrama circular de ranking de criterios

De esta manera se genera un ranking a través las votaciones, el cual se presenta en la Tabla 4-4. Para que las puntuaciones sumen uno, se han normalizado los valores dividiendo cada posición en el ranking entre su suma total. El valor normalizado obtenido representa el peso de cada criterio basado en las respuestas obtenidas en las encuestas, y se denomina vector S (S = valor normalizado).

Notación	Criterios de comparación	Ranking	Valor normalizado
C1	Seguridad	1	$1/36 = 0,0278$
C2	Disponibilidad a nivel global	6	$6/36 = 0,1667$
C3	Capacidad de suministro	7	$7/36 = 0,1944$
C4	Durabilidad	8	$8/36 = 0,2222$
C5	Adaptabilidad	5	$5/36 = 0,1389$
C6	Efecto en el rendimiento del motor	2	$2/36 = 0,0556$
C7	Efecto en las emisiones del motor	3	$3/36 = 0,0833$
C8	Coste	4	$4/36 = 0,1111$
SUMA		36	1

Tabla 4-4 Ranking de criterios de comparación por oficiales de la Armada

4.2.1 Investigación del combustible óptimo de la Armada

Después de haber explicado el método del Proceso Analítico Jerárquico (4.1) en la sección anterior, se aplicará a la investigación para encontrar el combustible óptimo que podría ser implementado en la Armada en un futuro.

Se seguirán los mismos pasos que se presentaron en el diagrama de flujo de la Figura 4-2. Dado que este proceso se debe aplicar a cada uno de los criterios (en este caso son ocho), se explicará con detalle solamente para el criterio de seguridad estudiado en la sección 3.1.1:

Jerarquía del problema

Se elabora una estructura jerárquica (Figura 4-6) en la que el objetivo de encontrar el combustible óptimo se sitúa en el nivel más alto, seguido de los criterios mencionados previamente y las alternativas en el nivel inferior.

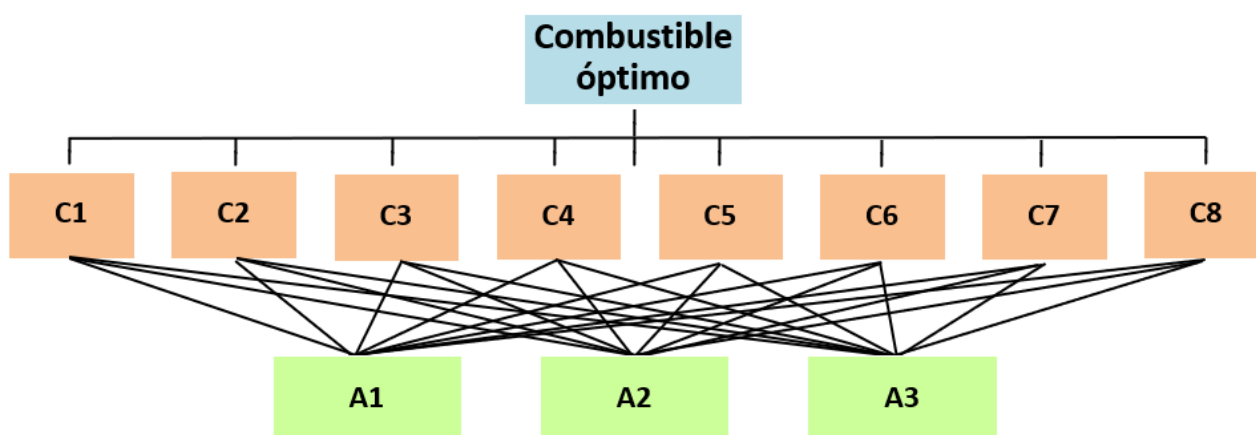


Figura 4-6 Modelo jerárquico en la búsqueda del combustible óptimo

Entre las alternativas se incluyen el metanol y etanol, gas natural licuado e hidrógeno, las cuales se han ido valorando a lo largo del estudio y se identifican según la nomenclatura establecida en la Tabla 4-5.

Notación	Alternativas
A1	Etanol y metanol
A2	GNL
A3	Hidrógeno

Tabla 4-5 Notación alternativas

Para clarificar, se ha llevado a cabo una conversión de los resultados previos de cada criterio, los cuales se presentaban en una escala de colores, a una puntuación utilizando la escala de Saaty (Tabla 4-1).

En la Figura 4-7, se puede interpretar que, al comparar el verde con una alternativa de color rojo, se le ha asignado una puntuación de 9. Al comparar el verde con el naranja, se le ha asignado una puntuación de 4. Finalmente, al comparar el verde con el amarillo, se le ha asignado una puntuación de 3. A partir de estos datos, se pueden generar todas las matrices de comparación pareada para los ocho criterios.

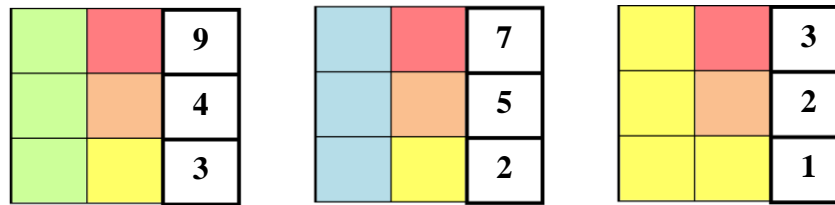


Figura 4-7 Conversión de colores a escala Saaty (Tabla 4-1)

Matriz de comparaciones pareadas

Se construye la matriz de comparaciones pareadas. Para ello se utiliza la información obtenida de la evaluación del criterio de seguridad. En dicha evaluación se determinó que la mejor alternativa era el hidrógeno (A3), seguido del GNL(A2), mientras que en el último lugar se encontraban el etanol y el metanol(A1).

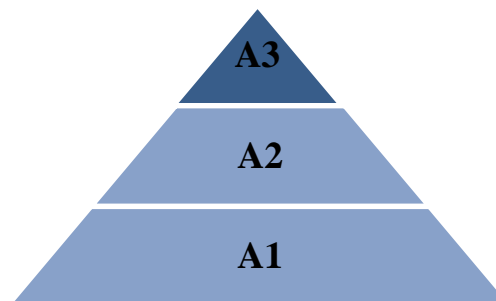


Figura 4-8 Resultados evaluación criterio de seguridad

Con el fin de facilitar la comprensión de esta metodología, se presenta un ejemplo específico en la (Figura 4-6). En ella, se puede apreciar que se le otorga una puntuación de 1 a la alternativa A1, lo que indica que es la peor opción en comparación con A3. Asimismo, de acuerdo con la escala de comparación pareada de Saaty (Tabla 4-7), se califica a la alternativa A3 con un valor de 9, lo que indica que esta alternativa prevalece de manera extrema sobre A1.

A1	A3	A2
1	9	3

Tabla 4-6 Comparación pareada entre A1, A3 y A2 (autoría propia)

En contraste, la alternativa dos tiene una puntuación de 3 en relación con A1, lo que significa que tiene una ventaja moderada sobre ella. De esta manera, se pueden establecer claramente las diferencias de importancia entre las alternativas.

Igual	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
1	3	5	7	9

Tabla 4-7 Escala comparaciones pareadas (autoría propia basado en Tabla 4-1)

A continuación, se presentan las matrices pareadas correspondientes a cada uno de los criterios evaluados. Es importante destacar que la diagonal principal tiene valor de uno y los valores por encima de ella son la inversa de los de por debajo, tal y como se mencionó anteriormente.

• **C1 (Seguridad):**

	A1	A2	A3
A1		1/3	1/9
A2	3/1		1/3
A3	9/1	3/1	

Tabla 4-8 Matriz de comparación pareada respecto al C1

• **C5 (Adaptabilidad):**

	A1	A2	A3
A1		2/1	1/2
A2	1/2		1/5
A3	2/1	5/1	

Tabla 4-12 Matriz de comparación pareada respecto al C5

• **C2 (Disponibilidad a nivel global):**

	A1	A2	A3
A1		1/8	1/3
A2	8/1		2/1
A3	3/1	1/2	

Tabla 4-9 Matriz de comparación pareada respecto al C2

• **C6 (Efecto en el rendimiento del motor):**

	A1	A2	A3
A1		1/9	1/9
A2	9/1		1
A3	9/1	1	

Tabla 4-13 Matriz de comparación pareada respecto al C6

• **C3 (Capacidad de suministro):**

	A1	A2	A3
A1		1/3	1/8
A2	3/1		1/2
A3	8/1	2/1	

Tabla 4-10 Matriz de comparación pareada respecto al C3

• **C7 (Efecto en las emisiones del motor):**

	A1	A2	A3
A1		1/3	1/9
A2	3/1		1/3
A3	9/1	3/1	

Tabla 4-14 Matriz de comparación pareada respecto al C7

• **C4 (Durabilidad):**

	A1	A2	A3
A1		1/2	1/4
A2	2/1		1/3
A3	4/1	3/1	

Tabla 4-11 Matriz de comparación pareada respecto al C4

• **C8 (Coste):**

	A1	A2	A3
A1		1	3/1
A2	1		3/1
A3	1/3	1/3	

Tabla 4-15 Matriz de comparación pareada respecto al C8

Cálculo del vector propio y ponderación de las alternativas

Para calcular el vector propio de cada alternativa, se siguen los pasos explicados en el apartado 4.1.3.

	A1	A2	A3
A1	1,0	0,3	0,1
A2	3,0	1,0	0,3
A3	9,0	3,0	1,0

Tabla 4-16 Matriz pareada C

	A1	A2	A3
A1	3,0	1,0	0,3
A2	9,0	3,0	1,0
A3	27,0	9,0	3,0
SUMA	39,0	13,0	4,3

Tabla 4-17 C x C

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,1	0,1	0,1	0,07692308
A2	0,2	0,2	0,2	0,23076923
A3	0,7	0,7	0,7	0,69230769

Tabla 4-18 Matriz C normalizada

Consistencia de las alternativas

Se comprueba la consistencia de la matriz:

	A1	A2	A3	x	VECTOR PROPIO	=	VECTOR FILA TOTAL		
A1	1,0	0,3	0,1					0,07692308	0,2307692
A2	3,0	1,0	0,3					0,23076923	0,6923077
A3	9,0	3,0	1,0					0,69230769	2,0769231

Tabla 4-19 Vector fila

COCIENTE		CI	0,0000
	3,0000000		
	3,0000000		
	3,0000000		
λ_{max}	3,0000	CR	0,0000

Tabla 4-20 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C1

Para calcular la razón de consistencia (RC) se utiliza un índice aleatorio (IA) de 0,58, que corresponde a una matriz de tamaño 3, según se indica en la Tabla 4-2.

Como se mencionó anteriormente para que la matriz sea consistente la RC no debe superar los valores de la Tabla 4-3. En este caso, al ser una matriz de tamaño 3, los valores tendrán que estar alrededor del 5%.

La Tabla 4-20 muestra que estos valores son óptimos, ya que son cero. Al contar con una consistencia total, el criterio uno (en este caso, la seguridad), puede continuar con el proceso de toma de decisiones.

Elección de alternativa óptima

Se procede a determinar el mejor combustible, para ello se multiplican las ponderaciones de las alternativas (lo que se denominó vector propio) y pesos de los criterios (vector S).

Así se lleva a cabo la multiplicación de dos matrices: la primera contiene el vector propio de las alternativas según cada criterio, de tamaño 3×8 (3 filas y 8 columnas), mientras que el segundo vector, llamado S, tiene 8 filas y 1 columna. El resultado de este producto será un nuevo vector de tamaño 3×1 (3 filas y 1 columna).

Vector propio									x	Vector S
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8		
A1	0,0769	0,0864	0,0864	0,1365	0,3090	0,0526	0,0769	0,4286	0,0278	
A2	0,2308	0,6282	0,2854	0,2385	0,1095	0,4737	0,2308	0,4286	0,1667	
A3	0,6923	0,2854	0,6282	0,6250	0,5816	0,4737	0,6923	0,1429	0,1944	
									0,2222	
									0,1389	
									0,0556	
									0,0833	
									0,1111	

Tabla 4-21 Producto de ponderaciones final

Al final de este proceso, se observa la ponderación final de los criterios y de las alternativas. Por lo tanto, se concluye que, las decisiones finales varían dependiendo del criterio escogido.

Por ejemplo, para el primer criterio, la tercera alternativa (A3) obtendría la puntuación más alta, con un valor de 0,6923, como se muestra en la matriz de la Tabla 4-21.

Sin embargo, este patrón no se repite para el criterio dos, donde el GNL (siendo este A2) tiene mayor peso con un valor de 0,6282. Los criterios tercero, cuarto y quinto siguen el mismo patrón que el primero, siendo la tercera alternativa (hidrógeno) la mejor calificada. A partir del sexto criterio, se produce un empate entre las alternativas 2 y 3 (GNL e hidrógeno), ambas con un peso de 0,4737. El criterio séptimo sigue la misma tendencia que el tercero, otorgando la mayor puntuación al hidrógeno. Finalmente, en el último criterio (C8), hay un empate entre las alternativas 1 y 2 por un valor de 0,4286.

Tras realizar la multiplicación del vector propio por el vector S, se obtiene como resultado que el combustible óptimo para su uso en los buques de la Armada sería el hidrógeno (A3) con una ponderación de 0,5085. Le sigue en segundo lugar el GNL (A2), mientras que en tercer lugar se encuentran el etanol y metanol (A1), con una ponderación de 0,1636 (Tabla 4-22).

Este resultado es coherente con los criterios previamente analizados. Todos señalaban que el hidrógeno iba a ser la mejor opción pues, frente a los demás combustibles, obtuvo una mayor calificación durante el estudio de evaluación.

A1	0,1636
A2	0,3280
A3	0,5085

Tabla 4-22 Combustible óptimo A3

4.2.1.1 Disponibilidad en los buques de la Armada

Se llevará a cabo una investigación comparativa entre distintos buques de la Armada con el propósito de identificar la plataforma más adecuada para implementar combustibles alternativos en el futuro.

Actualmente la Armada cuenta con 91 buques en activo y 49 unidades auxiliares como refleja el documento “Lista Oficial de Buques de la Armada” [62], firmado por el Almirante Jefe Del Estado Mayor de la Armada en enero de 2023, Don Antonio Martorell Lacave.

En vista de lo comentado anteriormente, las fragatas españolas cuentan con sistemas de propulsión combinados (2.4.2.5). Por tanto, se va a realizar un estudio comparativo entre las fragatas clase “Álvaro de Bazán” (F-100), las fragatas clase “Santa María” (F-80), y los Buques de Acción Marítima clase “Meteoro” (P-41).

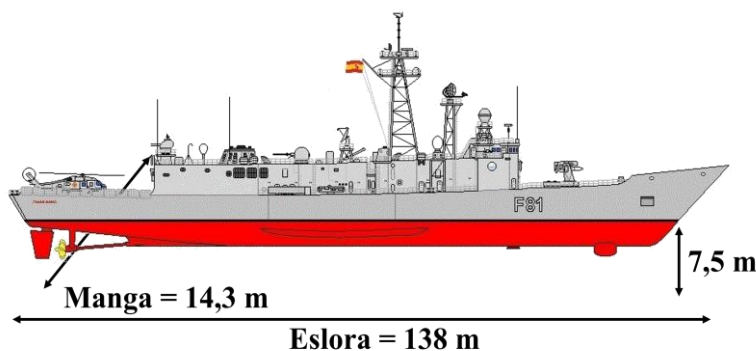
Las fragatas clase “Álvaro de Bazán” incorporan el sistema de propulsión combinado CODOG (2.4.2.5.3) idóneo para alcanzar velocidades máximas y cuentan con dos turbinas LM-2500 y dos motores diésel Bazán Bravo. Se va a abordar el estudio de la fragata Méndez Núñez (F-104) en particular, siendo este el cuarto buque de esta clase con las siguientes características:



- Desplazamiento: 5853 toneladas
- Eslora: 147 m
- Manga: 18,6 m
- Calado: 8 m
- Velocidad máxima: 28 nudos
- Autonomía: 4500 millas a 18 nudos
- Dotación: 205 personas
- Botadura: 21 de marzo 2006
- Astillero: Navantia

Figura 4-9 Dimensiones F-100 (autoría propia)

Las fragatas clase “Santa María” (F-80) cuentan con dos turbinas de gas General Electric LM-2500 con solo un árbol hélice. Se va a realizar un estudio de la fragata Canarias (F-86), sexta fragata de su clase que cuenta con el sistema de propulsión COGAG (2.4.2.5.4). De igual forma, se distingue por las siguientes características:



- Desplazamiento: 3900 toneladas
- Eslora: 138 m
- Manga: 14,3 m
- Calado: 7,5 m
- Velocidad máxima: 29 nudos
- Autonomía: 5300 millas a 12 nudos
- Dotación: 226 personas
- Botadura: 21 de junio 1994
- Astillero: Empresa Nacional Bazán de Construcciones Navales Militares

Figura 4-10 Dimensiones F-80 (autoría propia)

Los Buques de Acción Marítima “BAM”, están equipados con el sistema de propulsión CODOE (2.4.2.5.9), el cual consta de dos motores diésel Bazán Bravo y dos motores eléctricos. Se va a analizar el BAM “Meteoro” (P-41) (Figura 2-36), primero de la serie, que cuenta con las siguientes características:



- Desplazamiento: 2500 toneladas
- Eslora: 94 m
- Manga: 14,3 m
- Calado: 4,25 m
- Velocidad máxima: 22 nudos
- Autonomía: 8700 millas a 10 nudos
- Dotación: 52 personas
- Botadura: 16 de octubre 2009
- Astillero: Navantia

Figura 4-11 Dimensiones P-41 (autoría propia)

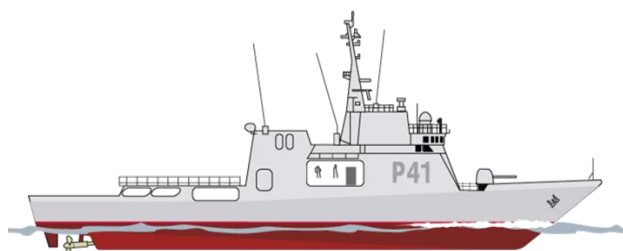
La siguiente Figura 4-14 resume las características y propiedades de los sistemas de propulsión empleados por los barcos descritos.



MÉNDEZ NÚÑEZ	
Eslora (m)	147
Manga (m)	18,5
Sistema de propulsión	CODOG
Potencia (kW)	Motor diésel (4625) Turbina de gas (17500)



CANARIAS	
Eslora (m)	138
Manga (m)	14,3
Sistema de propulsión	COGAG
Potencia (kW)	Turbina de gas (17500)



METEORO	
Eslora (m)	94
Manga (m)	14,3
Sistema de propulsión	CODOE
Potencia (kW)	Motor diésel (4625) Motor eléctrico (750)

Figura 4-12 Propiedades buques de la Armada (autoría propia)

4.2.1.1.1 Diesel Fuel Marine (F-76)

La Armada estadounidense está explorando opciones de combustibles alternativos para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar la seguridad energética, especialmente en relación con el diésel marino OTAN F-76. Se están evaluando combustibles alternativos que puedan ser utilizados como sustitutos directos sin necesidad de modificar los equipos y sistemas existentes de manejo y transporte de combustible [63].

El F-76, también conocido como Diesel Fuel Marine o DFM, es el combustible de propulsión destilado principal utilizado por los barcos de la Marina. Este combustible se almacena en las terminales de combustible del Departamento de Defensa (DFSP) y se entrega a los barcos a través de los buques cisterna, así como por petroleros de la MSC (Military Sealift Command), agencia estadounidense encargada del transporte y apoyo logístico de las fuerzas militares de EE. UU. en todo el mundo [64].

Este combustible requiere de condiciones de estabilidad más estrictas que los combustibles comerciales. El F-76 se fabrica a partir de la destilación del petróleo crudo y también contiene aditivos de estabilidad que no se encuentran en otros combustibles. Debido a que el DFSP almacena combustible durante periodos prolongados, el DFM necesita una estabilidad adecuada para su uso a largo plazo.



Figura 4-13 B.A.C “Cantabria” realizando aprovisionamiento triple [28]

Otra diferencia significativa entre el F-76 y el diésel marino comercial es que, su punto mínimo de inflamación es de 60 °C, el cual se especifica con fines de seguridad en su empleo a bordo de embarcaciones. Además, el F-76 presenta límites en cuanto a partículas, agua, cenizas y corrosividad, a fin de garantizar la protección de los motores durante el uso prolongado.

El F-76 es empleado por la mayoría de los buques de la Armada española, además su fuente de obtención determina la variación del precio. Es importante destacar que la calidad del producto puede variar significativamente en función de la zona de operaciones, como en el caso de África y Sudamérica. A continuación, se detallan las fuentes de obtención de la Armada:

La United States Navy (USN) provee el 33,8% del suministro de combustible, mientras que las marinas extranjeras el 8,35% (en el mar de países pertenecientes a la OTAN). Por otro lado, la agencia de la OTAN, NSPA (NATO Support and Procurement Agency), es la encargada de suministrar el combustible en todos los puertos extranjeros del mundo que no estén incluidos en las opciones anteriores citadas. Repsol es el encargado de suministrar el 14,26% del combustible en todos los puertos nacionales, mientras que los depósitos de los arsenales proveen un 16,39%.

La Figura 4-14 adjunta, extraída de un artículo de defensa, muestra que se concedió un acuerdo marco a la empresa granadina Secicar para el suministro de F-76 en 2021. La licitación incluía detalles sobre el volumen y la frecuencia estimada de suministro, así como los plazos para la entrega del combustible.

25 millones de litros de combustible diésel naval para la Armada española

José M^a Navarro García, 12 de mayo de 2021



Figura 4-14 Suministro F-76 [65]

4.2.1.1.2 Estudio económico del consumo

A continuación, se realizará un estudio sobre el consumo de combustible F-76 de los buques de la Armada previamente explicados durante una navegación de siete días. Para ello, se ha considerado la velocidad media alcanzada durante una semana de maniobras. Es importante destacar que los datos se obtuvieron de los registros del servicio de máquinas de cada buque respectivo y del precio del combustible Diesel Fuel Marine por la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL), que ronda los 0,89 euros por litro.

- **Fragata Méndez Núñez**

En primer lugar, se analizará el consumo de la fragata Méndez Núñez (Figura 4-15), comentada anteriormente, la cual es idónea para alcanzar elevadas velocidades e incorpora el sistema de propulsión combinado CODOG (2.4.2.5.2).



Figura 4-15 Emblema fragata “Méndez Núñez” (F-104) [28]

La Tabla 4-23 presenta los consumos de combustible en modo turbina, donde la velocidad se expresa en nudos (milla náutica por hora), mientras que los consumos de combustible se miden en litros, y el precio en euros.

Se ha estimado el consumo en modo turbina considerando una velocidad media de 15 nudos, que es la que se utiliza habitualmente en navegaciones con maniobras. Además, también se ha tenido en cuenta el empleo de ambas turbinas (expresado en "X 2").

Las fragatas F-100 suelen navegar en modo turbina cuando las exigencias operativas de la navegación son máximas y lo requieran. Es importante destacar que, de los 4 generadores diésel que dispone, siempre se llevan en funcionamiento dos (los cuales consumen un total de 7.200 litros por día).

	Velocidad (kts)	Consumo (L/h)	X 2	Consumo (L/día)	Consumo (L/7 días)
MODO TURBINA	15	1.500	3000	72000	504000
DIESEL GENERADORES	-	3.600	7200	172800	1209600
Consumo total (L)					1.713.600
Precio (€)					1.525.104

Tabla 4-23 Consumo F-104 modo turbina

Por otro lado, se ha calculado el consumo en modo diésel considerando una velocidad promedio de 13 nudos, ya que esta velocidad representa el punto ideal en el que se maximiza el rendimiento del consumo de combustible. Se han tenido en cuenta ambos motores diésel para el cálculo (Tabla 4-24).

	Velocidad (kts)	Consumo (L/h)	X 2	Consumo (L/día)	Consumo (L/7 días)
MODO DIÉSEL	13	496	992	23808	166656
DIESEL GENERADORES	-	3.600	7200	172800	1209600
Consumo total (L)					1.376.256
Precio (€)					1.224.868

Tabla 4-24 Consumo F-104 modo diésel

- **Fragata Canarias**

La fragata Canarias (Figura 4-16), cuenta con el sistema de propulsión COGAG y dos turbinas de gas que proporcionan energía al sistema de propulsión mediante un solo eje y una hélice. Además, dispone de 4 generadores diésel para la generación de energía eléctrica y 2 unidades auxiliares de propulsión (UPAS) para el caso de que se requiera una fuente de energía adicional.



Figura 4-16 Emblema fragata "Canarias" (F-86) [28]

Se ha llevado a cabo el estudio con dos generadores diésel que consumen 3600 litros por hora. Se ha considerado una velocidad de 14 nudos (Tabla 4-25), lo que resulta en la necesidad de reabastecer cada 6 días.

	Velocidad (kts)	Consumo (L/h)	X 2	Consumo (L/día)	Consumo (L/7 días)
MODO TURBINA	14	1812	3624	86976	608832
DIESEL GENERADORES	-	3.600	7200	172800	1209600
Consumo total (L)					1.818.432
Precio (€)					1.618.404

Tabla 4-25 Consumo F-86

- **BAM Meteor**

En contraste, el BAM Meteor (Figura 4-17), cuenta con el sistema de propulsión CODOE el cual combina dos motores diésel o eléctricos para proporcionar potencia. En términos de capacidad en Plena Carga, es importante destacar que la cantidad de combustible disponible asciende a unas 438,8 toneladas.



Figura 4-17 Emblema BAM “Meteor” (P-41) [28]

El sistema de propulsión eléctrica permite mantener una velocidad constante de patrulla de 6 nudos y alcanzar velocidades máximas entre 10 y 12 nudos, respectivamente, para velocidades máximas y sostenidas.

Al operar en modo diésel, puede alcanzar una velocidad de hasta 20,5 nudos, aunque para un mayor ahorro de combustible se recomienda mantener una velocidad entre 12 y 15 nudos, utilizando la configuración de propulsión que resulte en el menor consumo de combustible por milla navegada. En este sentido, se ha considerado una velocidad de 12 nudos para los cálculos (Tabla 4-26).

Además, cuenta con cuatro generadores diésel y uno de emergencia, de los cuales se suelen utilizar dos en modo diésel y tres en modo eléctrico. Cada generador consume 90 litros por hora.

	Velocidad (Kts)	Consumo (L/h)	X 2	Consumo (L/día)	Consumo (L/7 días)
MODO DIÉSEL	12	265	530	12720	89040
DIESEL GENERADORES	-	90	180	4320	30240
Consumo total (L)					119.280
Precio (€)					106.159

Tabla 4-26 Consumo modo diésel P-41

De acuerdo con lo que se observa en la Figura 4-18, la fragata Canarias (F-86) es el buque que más combustible consume durante una navegación de siete días, seguida de la Méndez Núñez (F-104) en modo turbina, lo cual es comprensible debido a que ambas fragatas consumen más combustible cuando

están en modo turbina para generar la misma cantidad de energía que el motor diésel. En contraste, el Meteoro (P-41) consume significativamente menos en comparación debido a su menor tamaño. Cabe señalar que, dadas las diferencias en las dimensiones de los buques, los resultados del Meteoro no son tan relevantes para la comparación.

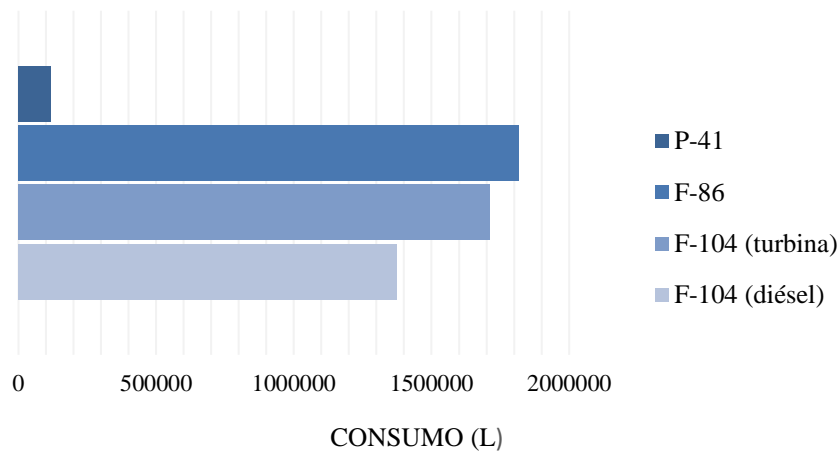


Figura 4-18 Análisis del consumo de combustible en una navegación de siete días

En consecuencia, se puede concluir que la fragata Méndez Núñez resulta ser la plataforma más adecuada como base para una posible implementación de combustibles alternativos en la Armada en un futuro, en virtud de su eficiencia en el consumo de combustible y coste, teniendo en cuenta su tamaño y características similares a la fragata Canarias.

4.2.1.1.3 Méndez Núñez como plataforma óptima

Después de realizar una comparativa entre los distintos buques de la Armada, la fragata Méndez Núñez ha resultado ser la mejor opción como posible plataforma para implementar un combustible alternativo debido a su menor consumo de combustible y precio.

Además, utilizando el método de Proceso Analítico Jerárquico, se ha determinado que el hidrógeno es la alternativa de combustible más adecuada para una futura implementación en los buques de la Armada. Por consiguiente, se realizará un estudio para analizar la viabilidad de la implementación del hidrógeno como combustible en la fragata Méndez Núñez.

Esta propuesta podría llevarse a cabo mezclando el hidrógeno en estado gaseoso con el F-76 (Diésel Fuel Marine) para crear lo que se conoce como “hidrógeno diésel”. El objetivo de esta mezcla es utilizar el hidrogeno como un aditivo que mejore la eficiencia del diésel, lo que resultaría en una reducción en el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes [66].

Para hacer uso de esta mezcla, se requeriría de un motor capaz de operar en modo dual diésel-hidrógeno. Este tipo de motor permitiría combinar el combustible fósil con el combustible verde. El motor adecuado sería del tipo MEC (Motor de Encendido por Compresión), en el que la ignición ocurre de manera espontánea cuando el combustible se inyecta en la cámara, después de que el aire ha sido comprimido a alta presión y temperatura [67].

En un estudio de revisión que evaluó el impacto de agregar hidrógeno al combustible diésel en el uso de MEC [68], se encontró que es viable utilizar un motor diésel en modo dual sin necesidad de modificar el motor diésel convencional. Esto se logra al emplear hidrógeno como combustible principal y diésel como combustible piloto.

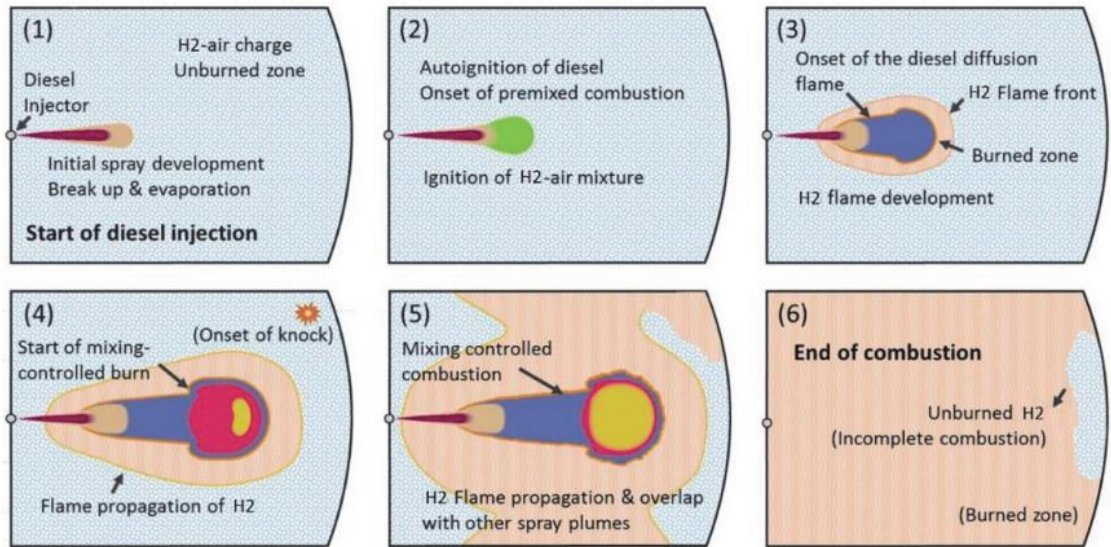


Figura 4-19 Progreso de la combustión dual de H₂- diésel convencional [69]

Sin embargo, es importante señalar que la mezcla de hidrógeno con el F-76 requiere de modificaciones en el motor y sistemas de combustión del barco para garantizar su correcto funcionamiento y evitar problemas como la detonación o el sobrecalentamiento del motor [70].

Algunas de las modificaciones que se podrían requerir incluyen ajustar la relación de mezcla de combustible, modificar el sistema de inyección de combustible, ajustar la cámara de combustión, modificar el sistema de enfriamiento del motor y ajustar el sistema de escape del barco [71].

Estas modificaciones pueden variar según el tipo de motor y el tamaño del buque, y también se necesitaría infraestructura para el almacenamiento seguro del hidrógeno en el buque y su distribución y manipulación.

Por lo tanto, la incorporación del hidrógeno como aditivo en el F-76 requeriría una inversión significativa en la infraestructura y la tecnología necesarias para hacerlo posible. El estudio de las transformaciones que habría que implementar en la fragata Méndez Núñez no se tratará en este estudio, dejándolo para futuras líneas.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En esta sección, se expondrán las principales conclusiones derivadas de este estudio y se llevará a cabo un análisis sobre el grado de cumplimiento de los objetivos establecidos. Posteriormente, se presentarán posibles líneas de desarrollo futuras para continuar avanzando en la investigación de los combustibles alternativos.

5.1 Conclusiones

Después de haber analizado las propiedades de varios combustibles alternativos, tales como metanol, etanol, gas natural licuado (GNL) e hidrógeno, y haber evaluado ciertos criterios en términos de efectividad, rendimiento y sostenibilidad económica; se puede concluir que el hidrógeno es el combustible alternativo más adecuado para una posible implementación en los buques de la Armada, y por ello ha sido seleccionado como la alternativa más viable en comparación con las otras opciones. La evaluación se llevó a cabo utilizando el método de Proceso Analítico Jerárquico, el cual permitió establecer criterios específicos para comparar y evaluar los diferentes tipos de combustibles.

Durante todo el estudio, quedó evidente que el hidrógeno era el mejor combustible en comparación con los demás, debido a diversos factores como la seguridad, capacidad de suministro, durabilidad, adaptabilidad, rendimiento en el motor y el efecto en las emisiones del motor. Sin embargo, tiene como desventaja principal su alto coste de transporte y almacenamiento, debido al almacenamiento criogénico, lo que lo hace menos competitivo económicamente como combustible.

Además, el estudio tenía como objetivo identificar la plataforma más adecuada para implementar eficientemente este combustible, teniendo en cuenta tanto el consumo como el coste del mismo. Con este fin, se llevó a cabo una comparación de varios buques de la Armada, incluyendo la fragata Méndez Núñez, la fragata Canarias y el patrullero Meteoro. Los resultados del estudio indicaron que, en relación con su tamaño, la fragata Méndez Núñez era la opción más adecuada en comparación con los demás buques evaluados.

Se ha planteado la posibilidad de incorporar hidrógeno en forma gaseosa dicha fragata, mediante la combinación con F-76 (Diésel Fuel Marine) para generar lo que se denomina "hidrógeno diésel". El propósito de esta fusión es aprovechar el hidrógeno como aditivo para optimizar el rendimiento del diésel, lo que se traduciría en una disminución en el consumo de combustible y la emisión de gases perjudiciales para el medio ambiente.

En relación al análisis de los objetivos, se ha logrado exitosamente identificar el combustible alternativo más prometedor entre aquellos que se encuentran en desarrollo, con el fin de poder implementarlo en la Armada y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como mejorar sus capacidades. Se empleó el método de toma de decisiones PAJ para determinar la mejor opción de combustible.

También se ha cumplido con el segundo objetivo de realizar una comparación entre los buques de la Armada y encontrar uno que tenga un mejor y más económico consumo de combustible.

5.2 Líneas futuras

Durante la elaboración y desempeño del trabajo, han surgido diversas áreas de investigación que no se han explorado en profundidad en este estudio. Por lo tanto, y para dar continuidad a la línea de investigación del proyecto, se presentan a continuación algunas sugerencias de posibles líneas futuras de investigación:

- Estudiar detalladamente la utilización de alternativas de energía renovable, tales como sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y fuentes de energía solar y eólica como opciones viables para diversificar y complementar el suministro energético.
- Investigar de manera más profunda el empleo de gas natural licuado (GNL) como combustible alternativo y su posible aplicación en los buques de la Armada. Específicamente, profundizando en las diferentes configuraciones de motores diésel marinos que se han adaptado al gas.
- Estudiar la viabilidad de implementar el hidrógeno-diésel en la fragata Méndez Núñez, considerando las posibles modificaciones requeridas en el motor y el tamaño, así como la infraestructura necesaria para el almacenamiento seguro del hidrógeno, su distribución y manipulación.
- Analizar de manera exhaustiva la reducción de firmas de los buques y optimizar la eficiencia a bordo, con el objetivo de mejorar las plataformas militares.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ahad Al-Enazi, and Tareq Al-Ansari, «A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation,» *Energy Reports*, 2021.
- [2] Darias Trujillo, Vladimir, and María Sebastián López, «Adquisición de competencias específicas a través del estudio del cambio climático,» 2020.
- [3] Mohamad Issa, Adrian Ilinca, and Fahed Martini, «Ship Energy Efficiency and Maritime Sector Initiatives to Reduce Carbon Emissions,» *Energies*, 2022.
- [4] Lara Pereda, and Lucía Luisa, «Servicios de interés general y objetivos de desarrollo sostenible: hacia una revisión del nuevo concepto europeo de servicio público,» 2022.
- [5] Europe Direct, «Pacto verde europeo,» 2020.
- [6] Deniz, Cengiz, and Burak Zincir, «Environmental and economical assessment of alternative marine fuels,» *Journal of Cleaner Production* 113, 2016.
- [7] Norberto Sánchez, «Máquinas de Barcos,» *Emisiones*, 2015.
- [8] Ruiz Graus, Karla, and Anderson Sánchez Sánchez, «Hidrógeno, el futuro de la sostenibilidad, una revisión sistemática de la realidad internacional en la última década,» *Repositorio Digital Institucional*, 2021.
- [9] José Luis Castillo Muñoz, «Evaluación de alternativas de transporte marítimo de hidrógeno en estanques hacia mercados energéticos,» 2022.
- [10] Campos Martín, José Miguel, and García Tomás, «Biocombustibles,» *Grupo Español del Carbón*, 2020.
- [11] Botero Gutiérrez, Restrepo Serna, and Cardona Alzate, «A comprehensive review on the implementation of the biorefinery concept in biodiesel production plants,» *Biofuel Research Journal*, 2017.
- [12] Naciones Unidas, «Conferencias, medio ambiente y desarrollo sostenible,» [En línea]. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [13] Naciones Unidas, «Convención Marco de las Naciones Unidas,» 1992.

- [14] SOLAS, «IMO (International Maritime Organization),» Consolidated Edition, 2018.
- [15] Organización Marítima Internacional, [En línea]. Available: <https://www.imo.org/es>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [16] Green Marine Associates and Astrid Dispert, «Análisis cláusula del Anexo VI del Convenio MARPOL,» 2022.
- [17] Álvaro Pérez, «Análisis de la Aplicación del Anexo VI,» Diplomatura Navegación Marítima, 2014.
- [18] Blunox, «Why NOx reduction? NOx reduction is important in both marine and stationary applications».
- [19] OMI, Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL), 2021-2022.
- [20] Medina Mosegues, and Óscar Alberto, «Área de control de emisiones,» [En línea]. Available: https://hmong.es/wiki/Emission_Control_Area. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [21] Noor, and Che Wan Mohd, «Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences,» 2021.
- [22] Pérez Antonio Liarte, and Pedro Carrasco Pena, «Traslación y aplicación de la normativa de eficiencia energética en la marina mercante al ámbito naval».
- [23] Harrington and Galvez, «Historia de la Navegación,» *Revista Sucesos*, 2001.
- [24] Strouhal, Eugen, and Werner Forman, «Life in Ancient Egypt».
- [25] Abrego, and Jorge Alberto Ortiz, «El transporte marítimo en el comercio,» 2014.
- [26] Baquero, Oscar Raúl García, and Wilmer Enrique Castro Reyes, «Evaluación de las implicaciones de los sistemas de propulsión diésel-eléctrico».
- [27] Rodríguez Ponce, and José Adrián, «Sistemas de propulsión y clasificación de buques,» 2015.
- [28] Armada Española, [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [29] Casanova Rivas, «Máquinas para la propulsión de buques,» 2001.
- [30] Wartsila, «Ship Electrification».
- [31] Manzarredo Beutel, «Evolución de la propulsión naval mecánica,» Fondo editorial de ingeniería naval.
- [32] Rodriguez, Carlos, «Primer buque propulsado por Turbinas de Gas, el Petrolero Auris,» 2013. [En línea]. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [33] Monografías ENM, «Principios básicos de las turbinas de gas navales.,» Publicación 2602.
- [34] United States Naval Nuclear Propulsion Program, «Operating Naval Nuclear Propulsion Plants and Shipping,» 2017.
- [35] Ragheb, Magdi, «Nuclear Naval Propulsion».

- [36] Albert Howard, and Jimmy Hayes, «Naval History and Heritage Command,» [En línea]. Available: <https://www.history.navy.mil/>.
- [37] News Network, «Marine insight,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.marineinsight.com/>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [38] Socorro García Cascales, Teresa Lamata Jiménez, and Eduardo Ruiz Delgado, «Aproximación al problema de toma de decisión de las plantas propulsoras combinadas en buques militares.,» 2006.
- [39] Sanz, Julio Maíz, «Fragatas F-110: el futuro de la Armada española,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [40] The Shephard News Team, «Spanish F110-class frigates to be equipped with iXblue navigation systems,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.shephardmedia.com/>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [41] Caro, Raúl Villa, «Buques impulsados por Gas Natural Licuado.Entrada en vigor del código IGF».
- [42] LNG World News, «Equinor y Eidesvik probarán combustible de amoníaco en PSV alimentado con GNL,» *World Energy Trade*, 2020.
- [43] Alonso, Álvaro Argüelles, «Estudio sobre la situación actual del metanol como combustible en la industria marina,» Universidad de Cantabria, 2021.
- [44] Register, Lloyd's, «Guía sobre el bunkering de metanol,» 2020.
- [45] Caro, Raúl Villa, «Revolución en el ámbito naval: posibilidades del buque propulsado por hidrógeno u otros electro-combustibles,» 2022.
- [46] Svanberg, Martin, Joanne Ellis, Joakim Lundgren, and Ingvar Landälv, «Renewable methanol as a fuel for the shipping industry,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [47] Gilbert, Paul, Conor Walsh, Michael Traut, Uchenna Kesieme, Kayvan Pazouki, and Alan Murphy, «Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels,» *Journal of Cleaner Production*, 2018.
- [48] Híbridos y eléctricos, «C-Job Naval Architects presentó buque cisterna con capacidad para suministrar hidrógeno a 400.000 coches de pila de combustible,» *La plataforma multimedia de Hidrógeno Verde*, 2022.
- [49] Troderman, Jimmy, «Renewable identification number prices for ethanol and biomass-based diesel remain high,» U.S Energy Information Administration, 2022.
- [50] Westling, Stena RoRo, «Methanol — a good alternative for ferries and short sea shipping,» *Interferry Conference Malta*, 2013.
- [51] Wuersig, Dr Gerd-Michael, «In focus-LNG as ship fuel,latest Developments and Projects in the LNG Industry,» *Maritime*, 2015.
- [52] Zincir, Burak, and Cengiz Deniz, «An investigation of hydrogen blend fuels applicability on ships,» *Maritime Faculty*, 2014.
- [53] Sayin, Cenk, Ahmet Necati Ozsezen, and Mustafa Canakci, «The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel,» 2012.

- [54] Selvi Rajaram, Premkartikkumar, Annamalai Kandasamy, and Pradeepkumar Arokiasamy Remigious, «Effectiviness of Oxygen enriched hydrogen-hho gas,» Thermal Science, 2014.
- [55] Poompipatpong, Chedthawut, and Kraipat Cheenkachorn, «A modified diesel engine for natural gas operation: Performance and emission tests,» Energy 36.12, 2011.
- [56] Acciaro, Michele, and Abhishek Nair, «Alternative fuels for shipping: Optimising fleet composition under environmental and economic constraints,» 2018.
- [57] Martins, Jorge, and F. P. Brito, «Alternative fuels for internal combustion engines,» Energies, 2020.
- [58] McGraw-Hill, «The Analytic Hierarchy Process: Planning,» Priority Setting, Resource Allocation, 2018.
- [59] González, Noe, «AHP: un método para fortalecer la toma de decisiones en SST,» 2019. [En línea]. Available: <https://prevencontrol.com/>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [60] Mitjana, and Laura Ruiz, «Psicología y mente,» 2019. [En línea]. Available: <https://psicologiyamente.com/>. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [61] Berumen, Sergio , and Francisco Llamazares Redondo, «La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente,» Cuadernos de administración, 2007.
- [62] A. Española, «Lista Oficial de Buques de la Armada,» Madrid, 2023.
- [63] Fu, Jinxia, and Scott Q. Turn, «Characteristics and stability of biofuels used as drop-in replacement for NATO marine diesel,» 2019.
- [64] J. T. Sermarini, «JP-5 the potential universal fuel at sea,» Naval Postgraduate School; Springfield, Monterey, California, 2012.
- [65] García, José Navarro, «Defensa,» 2021. [En línea]. [Último acceso: 22 Marzo 2023].
- [66] Falero, Pablo,Santiago N. De Souza, and Carlos Tealdo, «Adición de hidrógeno a motores diésel,» CIDIN, 2019.
- [67] Payri, and Desantes, «Motores de combustión interna alternativos,» Reverté, 2011.
- [68] S. Premkartikkumar, «Enhancing diesel engine combustion using hydrogen enriched fuels,» International Journal of ChemTech Research, 2016.
- [69] Monemian, and Cairns, Hydrogen fumigation on hd diesel engine: An experimental and numerical study, Diesel and Gasoline Engines, 2020.
- [70] Tripathi, Sharma, Dhar, and Sadiki, Computational investigation of diesel injection strategies in hydrogen-diesel dual fuel engine, 2019.
- [71] Menaca, Rafael, and Iván Darío Bedoya-Caro, Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión (diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia, UIS ingenierías, 2022.
- [72] International Maritime Organization, «IMO 2020 - cleaner shipping for cleaner air,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Este estudio tiene como objetivo explorar la viabilidad de adoptar combustibles alternativos en los buques de la Armada, con el propósito de establecer sistemas de propulsión sostenibles en sus plataformas, y así contribuir en la lucha contra el cambio climático.

La implementación de esta medida podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes derivados de la quema de combustibles fósiles y la navegación marítima, lo que supondría una importante contribución para mitigar sus efectos a nivel mundial.

Empleando diversas fuentes de energía y combustibles alternativos se puede disminuir la cantidad de CO₂ emitido, e incluso eliminar completamente las emisiones dañinas para la atmósfera. Este tema es abordado en la sección correspondiente a “Combustibles alternativos”, donde se incluye una gráfica explicativa.

La reducción de estas emisiones podría tener un impacto significativo en la calidad del aire y, por ende, en la salud de la población. La exposición a la contaminación del aire se ha relacionado con diversas enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso cáncer de pulmón. Por lo tanto, la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y la adopción de fuentes de energía más limpias y sostenibles puede ser una medida importante para proteger la salud.

La transición hacia fuentes de energía más sostenibles y la mejora de la eficiencia energética de los buques también puede tener un impacto significativo medioambiental, esto viene recogido en la sección de “Otras fuentes de energía renovables”. Igualmente puede fomentar la innovación y la creación de empleo en las industrias de energía renovable y tecnología limpia, lo que podría tener efectos positivos en la economía global.

En cuanto a la economía, es importante considerar tanto los costes a corto como a largo plazo de la implementación de combustibles alternativos en los buques de la Armada. A pesar de que el coste inicial puede ser elevado, especialmente en el caso del hidrógeno, a largo plazo se podría reducir significativamente el coste de mantenimiento y operación de los buques. Sin embargo, no se ha llevado a cabo el estudio del coste de implementar este combustible en los buques de la Armada dejándolo para futuras investigaciones.

Finalmente, la adopción de nuevas tecnologías de propulsión y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles podrían generar nuevos empleos en sectores relacionados con la producción y suministro de combustibles alternativos y tecnologías de energía limpia.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente es uno de los mayores retos a los que nos enfrentamos como sociedad en la actualidad. La creciente preocupación por el cambio climático y la degradación ambiental ha despertado una mayor responsabilidad y conciencia social sobre la necesidad de actuar de manera responsable y sostenible.

La Unión Europea ha tomado un importante compromiso en la lucha contra el cambio climático y la protección del medio ambiente, al establecer como meta la neutralidad climática en 2050. Esta iniciativa implica una reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero en todos los sectores, incluyendo el de la Defensa.

Desde una perspectiva ética, el desarrollo sostenible implica que cada uno de nosotros tenemos un papel fundamental en el cuidado y la protección del medio ambiente. Es esencial concienciar sobre los peligros y consecuencias que pueden derivarse de un mal cuidado de este, y esto es algo que se puede inculcar desde la educación en la infancia.

En este sentido, es necesario considerar el impacto de nuestras acciones en las futuras generaciones y en el mundo que dejaremos a nuestros hijos y es fundamental adoptar una actitud proactiva y comprometida en la promoción de prácticas sostenibles que aseguren la protección del planeta.

Desde un punto de vista social, el desarrollo sostenible implica la necesidad de un cambio de mentalidad y concienciación, enfocado en adoptar un estilo de vida más responsable y sostenible. Esto puede implicar cambios en la eficiencia energética, la adopción de tecnologías limpias y renovables, como los combustibles alternativos, y la reducción de la contaminación.

Sin embargo, también es importante considerar los posibles efectos sociales de la transición a combustibles alternativos y tecnologías más limpias en el sector naval y militar. Es posible que la implementación de nuevas tecnologías y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles tengan un impacto en la economía y en la creación o eliminación de empleos. Es importante que los gobiernos y las empresas involucradas en esta transición tengan en cuenta los efectos sociales y trabajen para minimizar los impactos negativos.

Además, es fundamental garantizar que la implementación de estas tecnologías y combustibles alternativos se realice de manera segura y confiable, teniendo en cuenta la adecuada formación y capacitación del personal involucrado y la continuidad de la capacidad operativa de las unidades militares. La seguridad y protección de los ciudadanos es una preocupación importante en cualquier transición tecnológica.

ANEXO III: EVALUACIÓN DE CRITERIOS

A continuación, se analizarán los criterios previamente evaluados para identificar los mejores combustibles alternativos mediante el método Proceso Analítico Jerárquico (PAJ). El criterio de seguridad (C1) ya fue explicado durante el desarrollo (4.2.1), por lo tanto, a continuación, se presentarán los demás criterios, entre los cuales se incluyen: la disponibilidad a nivel global (C2), la capacidad de suministro (C3), la durabilidad (C4), la adaptabilidad (C5), el efecto en el rendimiento del motor (C6), el efecto en las emisiones del motor (C7) y el enfoque económico (C8).

Los pasos a seguir ya han sido desarrollados previamente, sin embargo, para comenzar el proceso se construirá primero la matriz de comparaciones pareadas, a la que se le asignará el nombre de C2. Luego se procederá a calcular su vector propio y su vector fila, con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

- **C2 (Disponibilidad a nivel global):**

	A1	A2	A3
A1	1,0	0,1	0,3
A2	8,0	1,0	2,0
A3	3,0	0,5	1,0

Tabla A3- 1 Matriz pareada C2

	A1	A2	A3
A1	3,0	0,4	0,9
A2	22,0	3,0	6,7
A3	10,0	1,4	3,0
SUMA	35,0	4,8	10,6

Tabla A3- 2 C2 x C2

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,1	0,1	0,1	0,08642833
A2	0,6	0,6	0,6	0,62819321
A3	0,3	0,3	0,3	0,28537846

Tabla A3- 3 Matriz C2 normalizada

	A1	A2	A3	x	VECTOR PROPIO	=	VECTOR FILA TOTAL		
A1	1,0	0,1	0,3					0,08642833	0,2600786
A2	8,0	1,0	2,0					0,62819321	1,8903767
A3	3,0	0,5	1,0					0,28537846	0,8587600

Tabla A3- 4 Vector fila C2

COCIENTE	
	3,0091828
	3,0092282
	3,0091972
λ_{max}	3,0092

CI	0,0046
CR	0,0079

Tabla A3- 5 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C2

- **C3 (Capacidad de suministro):**

En primer lugar, se construye la matriz de comparaciones pareadas a la que se le asignará el nombre de C3. Luego, se procede a calcular su vector propio y su vector fila con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

	A1	A2	A3
A1	1,0	0,3	0,1
A2	3,0	1,0	0,5
A3	8,0	2,0	1,0

Tabla A3- 6 Matriz pareada C3

	A1	A2	A3
A1	3,0	0,9	0,4
A2	10,0	3,0	1,4
A3	22,0	6,7	3,0
SUMA	35,0	10,6	4,8

Tabla A3- 7 C3 x C3

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,1	0,1	0,1	0,08642833
A2	0,3	0,3	0,3	0,28537846
A3	0,6	0,6	0,6	0,62819321

Tabla A3- 8 Matriz C3 normalizada

	A1	A2	A3		VECTOR PROPIO		VECTOR FILA TOTAL
A1	1,0	0,3	0,1	x	0,08642833	=	0,2600786
A2	3,0	1,0	0,5		0,28537846		0,8587600
A3	8,0	2,0	1,0		0,62819321		1,8903767

Tabla A3- 9 Vector fila C3

	COCIENTE	
	3,0091828	
	3,0091972	
	3,0092282	
λ_{max}	3,0092	

CI	0,0046
CR	0,0079

Tabla A3- 10 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C3

• **C4 (Durabilidad):**

En primer lugar, se construye la matriz de comparaciones pareadas a la que se le asignará el nombre de C4. Luego, se procede a calcular su vector propio y su vector fila con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

	A1	A2	A3
A1	1,0	0,5	0,3
A2	2,0	1,0	0,3
A3	4,0	3,0	1,0

Tabla A3- 11 Matriz pareada C4

	A1	A2	A3
A1	3,0	1,8	0,7
A2	5,3	3,0	1,2
A3	14,0	8,0	3,0
SUMA	22,3	12,8	4,8

Tabla A3- 12 C4 x C4

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,1	0,1	0,1	0,13650476
A2	0,2	0,2	0,2	0,23849313
A3	0,6	0,6	0,6	0,62500210

Tabla A3- 13 Matriz C4 normalizada

	A1	A2	A3		VECTOR PROPIO	=	VECTOR FILA TOTAL
A1	1,0	0,5	0,3	x	0,13650476		0,4120019
A2	2,0	1,0	0,3		0,23849313		0,7198367
A3	4,0	3,0	1,0		0,62500210		1,8865006

Tabla A3- 14 Vector fila C4

	COCIENTE		
	3,0182233		
	3,0182701		
	3,0183907		
λ_{max}	3,0183	CI	0,0091
		CR	0,0158

Tabla A3- 15 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C4

• **C5 (Adaptabilidad):**

En primer lugar, se construye la matriz de comparaciones pareadas a la que se le asignará el nombre de C5. Luego, se procede a calcular su vector propio y su vector fila con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

	A1	A2	A3
A1	1,0	2,0	0,5
A2	0,5	1,0	0,2
A3	2,0	5,0	1,0

Tabla A3- 16 Matriz pareada C5

	A1	A2	A3
A1	3,0	6,5	1,4
A2	1,4	3,0	0,7
A3	6,5	14,0	3,0
SUMA	10,9	23,5	5,1

Tabla A3- 17 C5 x C5

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,3	0,3	0,3	0,27635094
A2	0,1	0,1	0,1	0,12827094
A3	0,6	0,6	0,6	0,59537812

Tabla A3- 18 Matriz C5 normalizada

	A1	A2	A3		VECTOR PROPIO	=	VECTOR FILA TOTAL
A1	1,0	2,0	0,5	x	0,27635094		0,8305819
A2	0,5	1,0	0,2		0,12827094		0,3855220
A3	2,0	5,0	1,0		0,59537812		1,7894347

Tabla A3- 19 Vector fila C5

COCIENTE	
	3,0055330
	3,0055291
	3,0055433
λ_{max}	3,0055

CI	0,0028
CR	0,0048

Tabla A3- 20 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C5

• **C6 (Efecto en el rendimiento del motor):**

En primer lugar, se construye la matriz de comparaciones pareadas a la que se le asignará el nombre de C6. Luego, se procede a calcular su vector propio y su vector fila con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

	A1	A2	A3
A1	1,0	0,1	0,1
A2	9,0	1,0	1,0
A3	9,0	1,0	1,0

Tabla A3- 21 Matriz pareada C6

	A1	A2	A3
A1	3,0	0,3	0,3
A2	27,0	3,0	3,0
A3	27,0	3,0	3,0
SUMA	57,0	6,3	6,3

Tabla A3- 22 C6 x C6

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,1	0,1	0,1	0,05263158
A2	0,5	0,5	0,5	0,47368421
A3	0,5	0,5	0,5	0,47368421

Tabla A3- 23 Matriz C6 normalizada

	A1	A2	A3		VECTOR PROPIO	=	VECTOR FILA TOTAL
A1	1,0	0,1	0,1	x	0,05263158		0,1578947
A2	9,0	1,0	1,0		0,47368421		1,4210526
A3	9,0	1,0	1,0		0,47368421		1,4210526

Tabla A3- 24 Vector fila C6

COCIENTE	
	3,0000000
	3,0000000
	3,0000000
λ_{max}	3,0000

CI	0,0000
CR	0,0000

Tabla A3- 25 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C6

- **C7 (Efecto en las emisiones del motor):**

En primer lugar, se construye la matriz de comparaciones pareadas a la que se le asignará el nombre de C7. Luego, se procede a calcular su vector propio y su vector fila con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

	A1	A2	A3
A1	1,0	0,3	0,1
A2	3,0	1,0	0,3
A3	9,0	3,0	1,0

Tabla A3- 26 Matriz pareada C7

	A1	A2	A3
A1	3,0	1,0	0,3
A2	9,0	3,0	1,0
A3	27,0	9,0	3,0
SUMA	39,0	13,0	4,3

Tabla A3- 27 C7 x C7

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,1	0,1	0,1	0,07692308
A2	0,2	0,2	0,2	0,23076923
A3	0,7	0,7	0,7	0,69230769

Tabla A3- 28 Matriz C7 normalizada

	A1	A2	A3		VECTOR PROPIO	=	VECTOR FILA TOTAL
A1	1,0	0,3	0,1	x	0,07692308		0,2307692
A2	3,0	1,0	0,3		0,23076923		0,6923077
A3	9,0	3,0	1,0		0,69230769		2,0769231

Tabla A3- 29 Vector firma C7

	COCIENTE		
	3,0000000		
	3,0000000	CI	0,0000
	3,0000000	CR	0,0000
λ_{max}	3,0000		

Tabla A3- 30 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C7

• **C8 (Enfoque económico):**

En primer lugar, se construye la matriz de comparaciones pareadas a la que se le asignará el nombre de C8. Luego, se procede a calcular su vector propio y su vector fila con el fin de evaluar la consistencia de la matriz y determinar si el criterio es consistente.

	A1	A2	A3
A1	1,0	1,0	3,0
A2	1,0	1,0	3,0
A3	0,3	0,3	1,0

Tabla A3- 31 Matriz pareada C8

	A1	A2	A3
A1	3,0	3,0	9,0
A2	3,0	3,0	9,0
A3	1,0	1,0	3,0
SUMA	7,0	7,0	21,0

Tabla A3- 32 C8 x C8

	A1	A2	A3	VECTOR PROPIO
A1	0,4	0,4	0,4	0,42857143
A2	0,4	0,4	0,4	0,42857143
A3	0,1	0,1	0,1	0,14285714

Tabla A3- 33 Matriz C8 normalizada

	A1	A2	A3		VECTOR PROPIO		VECTOR FILA TOTAL
A1	1,0	1,0	3,0	x	0,42857143	=	1,2857143
A2	1,0	1,0	3,0		0,42857143		1,2857143
A3	0,3	0,3	1,0		0,14285714		0,4285714

Tabla A3- 34 Vector fila C8

	COCIENTE		
	3,0000000		
	3,0000000		
	3,0000000		
λ_{max}	3,0000	CI	0,0000
		CR	0,0000

Tabla A3- 35 λ_{max} , índice de consistencia y razón de consistencia respecto C8