



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis comparativo del rendimiento y sostenibilidad en lanchas
de instrucción mediante el empleo de HVO como combustible*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alejandro Gordillo Herranz

DIRECTORES: Lara Febrero Garrido
Antón Cacabelos Reyes

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis comparativo del rendimiento y sostenibilidad en lanchas de instrucción mediante el empleo de HVO como combustible.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este TFG surge de la creciente necesidad de reducir el impacto ambiental del transporte marítimo, especialmente en el contexto de la descarbonización del sector naval.

Motivado por los objetivos globales y nacionales en materia de sostenibilidad, y en particular por el compromiso de las Fuerzas Armadas con la reducción de su huella de carbono, el estudio plantea una alternativa al uso de combustibles fósiles convencionales en buques de instrucción. En este marco, se evalúa el HVO como posible sustituto del gasóleo tradicional utilizado en las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar.

La metodología llevada a cabo consiste en un análisis comparativo del comportamiento de ambos combustibles en condiciones reales de navegación. Se utilizan dos lanchas gemelas, una con HVO y otra con gasóleo B, monitorizando su consumo durante las salidas a la mar de los alumnos y midiendo las emisiones mediante un analizador de gases portátil. Además, se evalúan aspectos logísticos como la producción, suministro y coste del HVO.

La conclusión principal del estudio es que el HVO puede sustituir al gasóleo convencional sin comprometer el rendimiento ni requerir modificaciones técnicas, suponiendo una mejora medioambiental, ya que también queda comprobado que reduce emisiones contaminantes como CO₂ y NO.

PALABRAS CLAVE

HVO, Descarbonización, Biodiésel, Lancha de Instrucción, Sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho este espacio para dirigir mis agradecimientos, en primer lugar, a mi tutora, Dña. Lara Febrero, por su apoyo y guía en este proyecto, a mi cotutor, Don Antón Cacabelos, por su ayuda y aportación de conocimientos teórico-prácticos y al CB1 Pérez Pérez por su ayuda durante las salidas a la mar. También agradecer al TN Delgado Franco y a todo el personal del núcleo de lanchas como el SGT1º González Vidal y el SGT1º Cambón Rivera, que han permitido desarrollar esta investigación en las Lanchas de Instrucción, también organizando y pudiendo realizar salidas específicas. Especial gratitud a la empresa Repsol, por permitir usar el combustible HVO para llevar a cabo esta investigación.

A nivel personal me gustaría agradecerle a mi pareja Beatriz el apoyo y los ánimos que me ha estado brindando a lo largo de estos 5 años en la ENM y en especial en esta última etapa mientras desarrollaba esta investigación. A mi familia, por siempre estar ahí apoyándome y a mis compañeros y amigos de camareta que han hecho mucho más ameno el trabajo.

Quedo eternamente agradecido con todos ellos.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Contexto y motivación	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura de la memoria	7
2 Estado del arte	9
2.1 Actualidad del medioambiente.....	9
2.1.1 Huella de carbono	9
2.1.2 Emisiones de CO ₂	11
2.2 Descarbonización	12
2.2.1 Estrategias y tecnologías para una movilidad sostenible en el sector naval	13
2.2.2 Descarbonización en las Fuerzas Armadas.....	15
2.3 Hidrobiodiésel (HVO).....	17
2.3.1 Impacto ambiental del HVO	18
2.3.2 Capacidad de producción y suministro de HVO en España	19
2.3.3 Normativa, regulación y certificación	20
2.3.4 Perspectivas de futuro para el HVO	21
3 Desarrollo del TFG.....	22
3.1 Introducción	22
3.2 Plataforma y equipo de medición.....	23
3.2.1 Lanchas de Instrucción	23
3.2.2 Analizador de gases Testo 340	28
3.3 Combustibles evaluados.....	29
3.3.1 HVO.....	29
3.3.2 Gasóleo B marino	31
3.3.3 Análisis de muestras de combustible	32
3.3.4 Logística	34
3.4 Obtención de consumos y otros datos.....	34
3.5 Medición de gases	34
3.5.1 Medición en GM Barrutia.....	35
3.5.2 Medición en GM Chereguini	37

4 Resultados	38
4.1 Análisis del consumo de combustible	38
4.1.1 Datos específicos del motor de estribor de la L.I. GM Barrutia	38
4.1.2 Análisis del consumo durante las salidas semanales	40
4.1.3 Comparación de consumos durante la semana de instrucción y adiestramiento	43
4.2 Análisis de las emisiones de los gases de escape	46
4.2.1 Emisiones GM Chereguini	46
4.2.2 Emisiones GM Barrutia	47
4.2.3 Evaluación comparativa de emisiones	47
4.3 Desafíos logísticos y económicos del uso de HVO en las Lanchas de Instrucción	51
5 Conclusiones y líneas futuras	53
5.1 Conclusiones	53
5.2 Líneas Futuras	54
6 Bibliografía.....	55
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	59
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	60
Anexo III: Análisis comparativo de los combustibles.....	61
Anexo IV: Plantilla recogida de datos de cada navegación de las L.L.I.I.....	62
Anexo V: Datos de consumo durante la semana de I+A.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Influencia de los principales GEI [2].	10
Figura 2-2 Evolución esperada de la disminución de las emisiones de CO ₂ [7].	11
Figura 2-3 Aumento de las emisiones de CO ₂ hasta el año 2023 en miles de millones de toneladas métricas [8].	11
Figura 2-4 Disminución de las emisiones de CO ₂ en 2020 [9].	12
Figura 2-5 Emisiones de CO ₂ globales según la IEA (International Energy Agency) [10].	12
Figura 2-6 Previsión de uso de energías renovables según la ELP [7].	13
Figura 2-7 Riesgos y oportunidades expuestos en Plan de Energía y Geoestrategia 2024 [18].	16
Figura 2-8 Organigrama de dependencias de la DIVLOG y sus componentes (elaboración propia).	17
Figura 2-9 Operarios de Repsol en la Planta de producción de combustibles renovables de Cartagena [32].	19
Figura 3-1 Estructura del proyecto (elaboración propia).	22
Figura 3-2 Lanchas de Instrucción atracadas en el muelle Almirante Vierna (fuente propia).	23
Figura 3-3 Vista de planta y perfil de una Lancha de Instrucción [43].	25
Figura 3-4 Planos de una Lancha de Instrucción con vista de perfil y planta [43].	25
Figura 3-5 Tanque de combustible de babor GM Chereguini (fuente propia).	26
Figura 3-6 Nivel de combustible tanque de babor GM Chereguini (fuente propia).	26
Figura 3-7 Cámara de máquinas de la L.I. GM Chereguini vista desde popa (fuente propia).	27
Figura 3-8 Motor CATERPILLAR C18 de la L.I. GM Barrutia (fuente propia).	28
Figura 3-9 Analizador de productos de la combustión Testo 340 [45].	28
Figura 3-10 Testo 340 junto a la sonda de análisis de gases [45].	29
Figura 3-11 Repostaje de Repsol Mardiesel e+ en las Lanchas de Instrucción [51].	31
Figura 3-12 Orificio en el codo de gases de escape (4N-4967) con la sonda del equipo introducida (fuente propia).	35
Figura 3-13 Derrota y datos de navegación salida 10 de febrero (app GeoTracker).	36
Figura 3-14 Disposición del equipo para la toma de datos (fuente propia).	36
Figura 3-15 Derrota y datos de navegación salida 28 de febrero (app GeoTracker).	37
Figura 4-1 Comparación consumo de combustible y revoluciones por minuto en función del tiempo transcurrido.	39
Figura 4-2 Gráfico donde se relaciona el régimen de revoluciones con la velocidad en nudos.	40
Figura 4-3 Combustible acumulado durante el cuatrimestre por las Lanchas de Instrucción.	41
Figura 4-4 Gasto de combustible de las Lanchas de Instrucción durante las salidas semanales.	41
Figura 4-5 Consumo en litros por milla de las Lanchas de Instrucción durante las salidas semanales.	43

Figura 4-6 Gráfico de combustible consumido acumulado durante la semana I+A.	44
Figura 4-7 Gráfico de combustible consumido acumulado y distancia recorrida de las durante la semana I+A.	45
Figura 4-8 Gráfico de consumo de combustible por cada salida en l/mn.	45
Figura 4-9 Consumo de las L.L.I.I. en L/h durante la semana I+A.	46
Figura 4-10 Gráfico comparativo de las temperaturas de los de gases de escape.	48
Figura 4-11 Gráfico comparativo de la proporción de O ₂ de los gases de escape	48
Figura 4-12 Gráfico de emisiones de partículas de CO.	49
Figura 4-13 Gráfico de proporción de CO ₂ en los gases de escape de cada combustible.	49
Figura 4-14 Gráficos comparativos de emisiones de NO _x y NO en ppm.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Características principales de las L.L.I.I. [43].	24
Tabla 3-2 Propiedades del HVO.....	30
Tabla 3-3 Propiedades del gasóleo B marino.	32
Tabla 3-4 Diferencias entre el combustible HVO y el Diésel marino [53] [21]	33
Tabla 4-1 Relación revoluciones por minuto y consumo de combustible.	39
Tabla 4-2 Distancia navegada y duración de cada salida de las Lanchas de Instrucción GM Barrutia y GM Chereguini.	42
Tabla 4-3 Datos de las salidas de I+A Lanchas de Instrucción GM Barrutia y GM Chereguini.	44
Tabla 4-4 Datos obtenidos del analizador de gases según el régimen de revoluciones en la L.I. GM Chereguini (elaboración propia).	46
Tabla 4-5 Datos obtenidos del analizador de gases según el régimen de revoluciones en la L.I. GM Barrutia (elaboración propia).	47
Tabla 4-6 Índices de carbono resultantes de las emisiones de CO ₂ y CO.	50
Tabla 4-7 Factores de emisión oficiales por litro consumido [54].	50

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

El cambio climático es uno de los principales retos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad. La acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, causada principalmente por el uso de combustibles fósiles, ha generado un aumento progresivo de la temperatura global, desencadenando fenómenos como el derretimiento de los polos, la acidificación de los océanos y eventos meteorológicos extremos. Para mitigar estos efectos, diversos organismos internacionales han impulsado estrategias de transición energética que buscan reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar el uso de fuentes de energía renovables.

En este sentido, el sector del transporte, y en particular el transporte marítimo, es uno de los mayores responsables de las emisiones de CO₂ a nivel global. Según datos de la Organización Marítima Internacional (OMI), el transporte marítimo representa aproximadamente el 3% de las emisiones de CO₂ mundiales, una cifra que podría aumentar en los próximos años si no se implementan soluciones sostenibles. Ante este panorama, la Unión Europea ha establecido regulaciones más estrictas para el sector, promoviendo el uso de combustibles alternativos, mejoras en la eficiencia energética de los buques y la reducción progresiva de las emisiones contaminantes.

El concepto de descarbonización del sector naval ha cobrado especial importancia en los últimos años. Las estrategias actuales incluyen el desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión, la optimización del rendimiento energético y la adopción de combustibles sostenibles, como el HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), que se ha posicionado como una alternativa viable al diésel convencional. Este combustible de origen renovable tiene la capacidad de reducir drásticamente las emisiones de CO₂ y otros contaminantes sin requerir modificaciones en los motores diésel existentes, lo que facilita su implementación en embarcaciones sin incurrir en grandes costes estructurales.

Las Fuerzas Armadas (FAS), como parte del sector público y responsables de la seguridad y operatividad de sus unidades, también han comenzado a implementar estrategias para reducir su impacto ambiental. A nivel global, diversas marinas han adoptado iniciativas para disminuir su huella de carbono, mejorar la eficiencia energética y explorar alternativas de combustibles sostenibles. En España, la Armada ha mostrado un compromiso creciente con la sostenibilidad a través de iniciativas que buscan integrar energías renovables y optimizar el consumo de combustible en sus unidades.

Dentro de la Armada, la Escuela Naval Militar desempeña un papel fundamental en la formación de los futuros oficiales, y las Lanchas de Instrucción son una parte esencial del proceso formativo. Estas embarcaciones, utilizadas de manera intensiva para la instrucción práctica de los alumnos, tienen un

consumo elevado de diésel y contribuyen a la generación de emisiones contaminantes. Es por ello por lo que evaluar alternativas como el HVO para su uso en las Lanchas de Instrucción no solo representa un avance hacia un modelo más sostenible, sino que también permite obtener información clave para futuras aplicaciones en unidades operativas de la Armada.

La introducción de biocombustibles en el ámbito militar no solo tiene implicaciones ambientales, sino también estratégicas. La reducción de la dependencia de los combustibles fósiles tradicionales puede mejorar la autonomía energética de las Fuerzas Armadas y reducir la vulnerabilidad ante fluctuaciones en el precio del petróleo o restricciones en el suministro de combustibles fósiles. Además, la adopción de estos combustibles podría contribuir al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad establecidos en las políticas nacionales e internacionales.

La relevancia de esta investigación radica en su contribución al desarrollo de soluciones más sostenibles para el sector marítimo, alineándose con los objetivos globales de reducción de emisiones y transición hacia fuentes de energía más limpias. Mediante este análisis comparativo, se busca aportar información relevante sobre el desempeño de los motores de las lanchas de instrucción al utilizar HVO como combustible, así como su impacto en la reducción de emisiones contaminantes, consolidándolo como una alternativa viable.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este TFG viene recogido ya en su propio título, realizar un análisis comparativo y de sostenibilidad del empleo de HVO como combustible en las Lanchas de Instrucción, buscando así reducir la huella de carbono y otros contaminantes que el combustible común produce.

Como objetivos adicionales que complementan la investigación, se incluyen:

- Identificar diferencias en eficiencia, consumo, y posibles variaciones en el desempeño general de la navegación en función del combustible empleado.
- Realizar un análisis de las emisiones de gases contaminantes resultantes de la combustión de cada uno de los combustibles.
- Obtener unos datos que muestren las diferencias logísticas que presenta la obtención, comercialización y traslado de cada uno de los combustibles.

1.3 Estructura de la memoria

Tras haber establecido los hitos y objetivos de este análisis, y habiendo proporcionado el contexto necesario, se expone la estructura de la memoria. Su propósito es garantizar una organización lógica y comprensible del contenido. En términos generales, la memoria se divide en cinco capítulos bien diferenciados, seguidos de la bibliografía utilizada en el desarrollo del trabajo y, finalmente, los anexos que complementan la investigación. Los capítulos son los siguientes:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. Este primer capítulo proporciona el contexto del estudio, presentando las ideas fundamentales que justifican su desarrollo. Se definen los objetivos y se describe la estructura de la memoria para ofrecer una visión clara de su contenido.
- Capítulo 2: Estado del arte. Este apartado analiza la crisis medioambiental actual y la necesidad de reducir la huella de carbono en el sector naval, destacando el impacto del transporte marítimo en las emisiones de GEI y la importancia de la descarbonización. Se exploran alternativas como combustibles sostenibles (HVO, biodiésel, hidrógeno, GNL) y electrificación, evaluando su viabilidad y beneficios. Además, se estudia el compromiso de las Fuerzas Armadas con la sostenibilidad y los desafíos en la implementación de tecnologías limpias. Se presenta el HVO como una opción viable capaz de sustituir el

combustible convencional sin necesidad de efectuar cambios en los motores actuales, y finalmente, se abordan las perspectivas futuras de esta materia.

- Capítulo 3: Desarrollo del TFG. Este capítulo muestra cómo se ha llevado a cabo el proceso de estudio y cada una de las fases que se han desarrollado durante la investigación. También se explica la plataforma de estudio, así como el equipo utilizado para analizar los gases de escape. Finalmente se define cada uno de los combustibles utilizados, destacando las diferencias entre ellos y por último se desarrollan las experiencias de toma de datos a bordo de las embarcaciones.
- Capítulo 4: Resultados. Una vez completadas las diferentes etapas del estudio, se presentan y analizan los resultados obtenidos. Estos abarcan desde diferentes tipos de consumo de las L.L.I.I., desde un punto de vista comparativo, las emisiones de gases contaminante, analizados por cada lancha y comparando los datos obtenidos y finalmente, la logística necesaria para la transición a un combustible alternativo.

La última parte de la memoria está compuesta por la bibliografía, donde se muestran todas las fuentes usadas en la elaboración de este TFG, y los anexos, que contienen información complementaria de apoyo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Actualidad del medioambiente

El estado actual del medioambiente a nivel global refleja una situación crítica marcada por la creciente degradación de los ecosistemas, el aumento de las temperaturas globales y la pérdida acelerada de biodiversidad. Fenómenos como el cambio climático, impulsado por emisiones históricas de gases de efecto invernadero, han intensificado los eventos climáticos extremos, incluyendo olas de calor, sequías y huracanes más intensos. A pesar de los esfuerzos globales para promover prácticas más sostenibles, como el impulso a las energías renovables y acuerdos internacionales, los avances son aún insuficientes para revertir las tendencias actuales. A continuación, se desarrollarán los aspectos más importantes en cuanto a la situación medioambiental actual.

2.1.1 Huella de carbono

La huella de carbono es un indicador ambiental que mide la cantidad total de gases de GEI generados, ya sea de forma directa o indirecta, por individuos, organizaciones, eventos o productos a lo largo de su ciclo de vida. Se expresa comúnmente en toneladas de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) e incluye gases como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), conocidos por su alto impacto en el calentamiento global. Su cálculo abarca diversas etapas, desde la extracción de materias primas y la fabricación de productos hasta su transporte, consumo y eliminación final. Analizar la huella de carbono permite identificar las principales fuentes de emisiones y establecer estrategias efectivas para su reducción, favoreciendo un uso más eficiente de los recursos y promoviendo modelos de producción y consumo sostenibles. En este sentido, su monitoreo y mitigación son esenciales para alcanzar los objetivos climáticos globales y reducir los efectos del cambio climático [1].

En la Figura 2-1 se muestra la evolución del impacto de los principales gases de efecto invernadero (GEI) en el calentamiento global desde 1980 hasta 2020, con una referencia a 1990. Se observa un aumento del 49% en el índice anual de gases de efecto invernadero, lo que indica un incremento sostenido de su contribución al desequilibrio térmico de la Tierra. El gráfico resalta cómo las emisiones de estos gases han aumentado de manera constante, reflejando la continua influencia de la actividad humana en el cambio climático. El CO_2 sigue siendo el principal responsable del efecto invernadero, pero el metano y los gases industriales han incrementado su participación. Este patrón subraya la importancia de medidas urgentes para reducir las emisiones y mitigar el impacto del cambio climático.

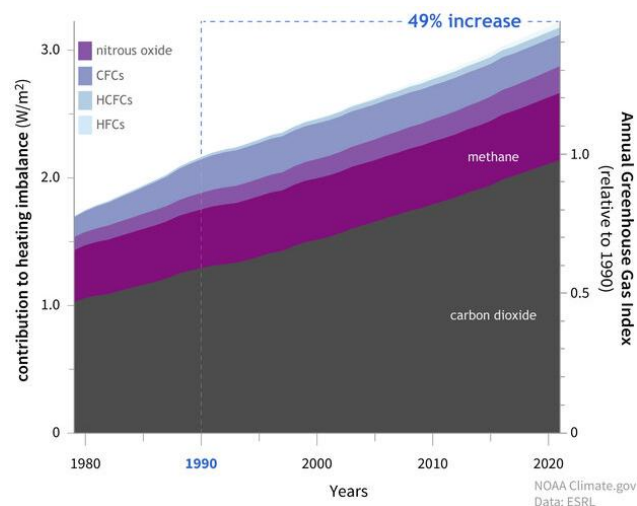


Figura 2-1 Influencia de los principales GEI [2].

Los factores que afectan al aumento de la huella de carbono son los siguientes:

- Mayor consumo de energía: Consiste en un mayor consumo energético, en especial de combustibles fósiles. Aumenta las emisiones de CO₂ [3].
- Urbanización: Expansión de ciudades y aumento del consumo de recursos, elevando la huella de carbono [4].
- Apertura comercial: El comercio internacional implica transporte de mercancías que genera emisiones significativas [3].
- Producción industrial: La actividad industrial emite grandes cantidades de GEIs, lo que aumenta la huella de carbono [3].
- Migración poblacional: Los desplazamientos de población afectan a los niveles de consumo y emisiones de distintas regiones [5].
- Uso de vehículos privados: Aunque un mayor número de ocupantes por vehículo puede reducir las emisiones per cápita, el incremento en el número total de automóviles en circulación conlleva a una mayor contaminación [6].
- Producción agrícola: Las prácticas agrícolas influyen en las emisiones de gas metano y óxido nitroso [3].
- Desigualdad económica: El 1% más rico del mundo genera emisiones desproporcionadas en comparación con el 99% restante [4].

En cuanto al futuro, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico ha promulgado un plan de actuación denominado Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050. En este documento se trata el futuro de las emisiones de los GEI, como se puede apreciar en la Figura 2-2, en ella tiene en cuenta el uso de vehículos eléctricos, combustibles renovables y el hidrógeno como fuente de energía.

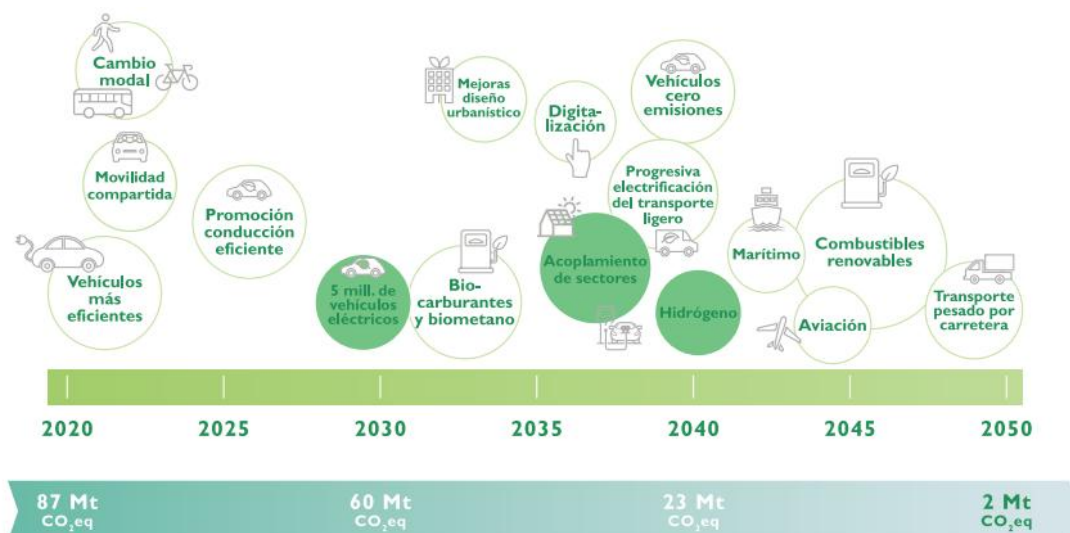


Figura 2-2 Evolución esperada de la disminución de las emisiones de CO₂ [7].

2.1.2 Emisiones de CO₂

Como se ha podido observar en el apartado anterior, el dióxido de carbono es actualmente el gas que más contribuye al calentamiento global. En este apartado se tratará este compuesto con el fin de evidenciar la importancia de disminuir las emisiones y, de este modo, resaltar la relevancia de este proyecto.

En la Figura 2-3 se observa cómo ha aumentado considerablemente las emisiones de CO₂ desde 1995 hasta 2023. Se observa que la mayor emisión tiene lugar en el año más actual, 37,5 miles de millones de toneladas métricas. Pese a no tener gráficos más recientes, el estudio realizado se podrá percibir si estas emisiones siguen en aumento.

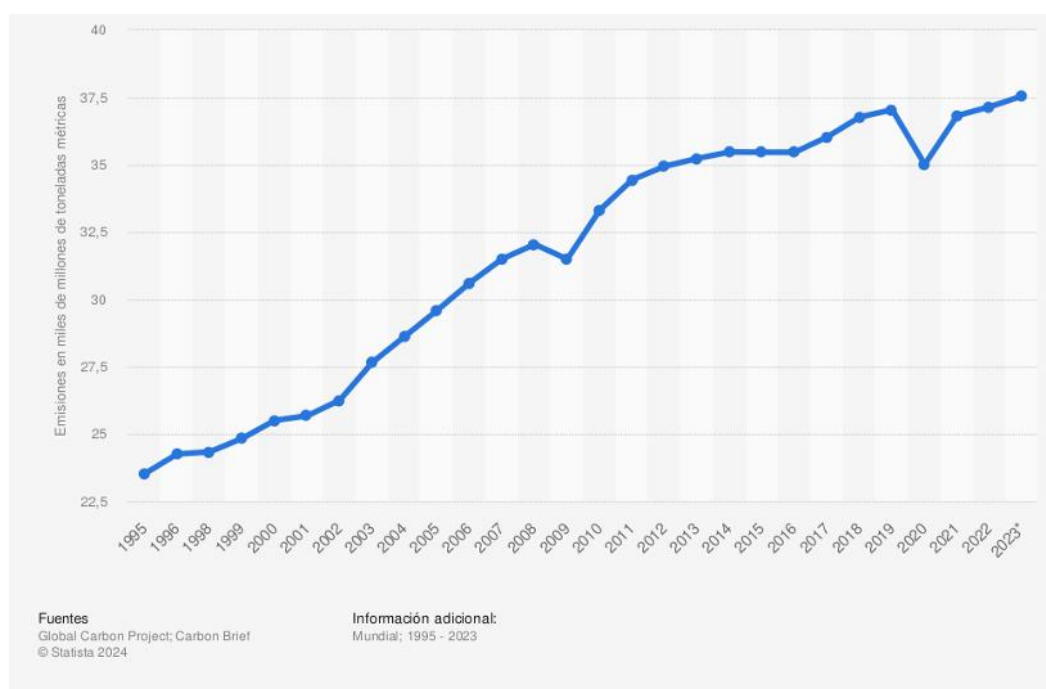


Figura 2-3 Aumento de las emisiones de CO₂ hasta el año 2023 en miles de millones de toneladas métricas [8].

En la figura anterior se observa que, en el año 2020, hubo una disminución de las emisiones; esto se debe a la pandemia mundial de la COVID-19. En la Figura 2-4 se observa cómo España fue el país que más bajó sus emisiones de CO₂, llegando a triplicar la media, que rondaba el 5,3%. Mientras tanto, China fue el país que menos redujo sus emisiones.

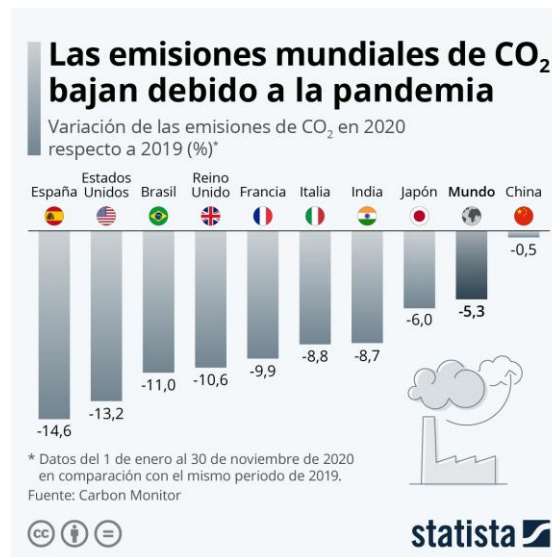


Figura 2-4 Disminución de las emisiones de CO₂ en 2020 [9].

A continuación, en la Figura 2-5 podemos observar las principales actividades que más CO₂ producen, destacando aquellas que buscan generar energía, ya sea a través del carbón, gas o petróleo.

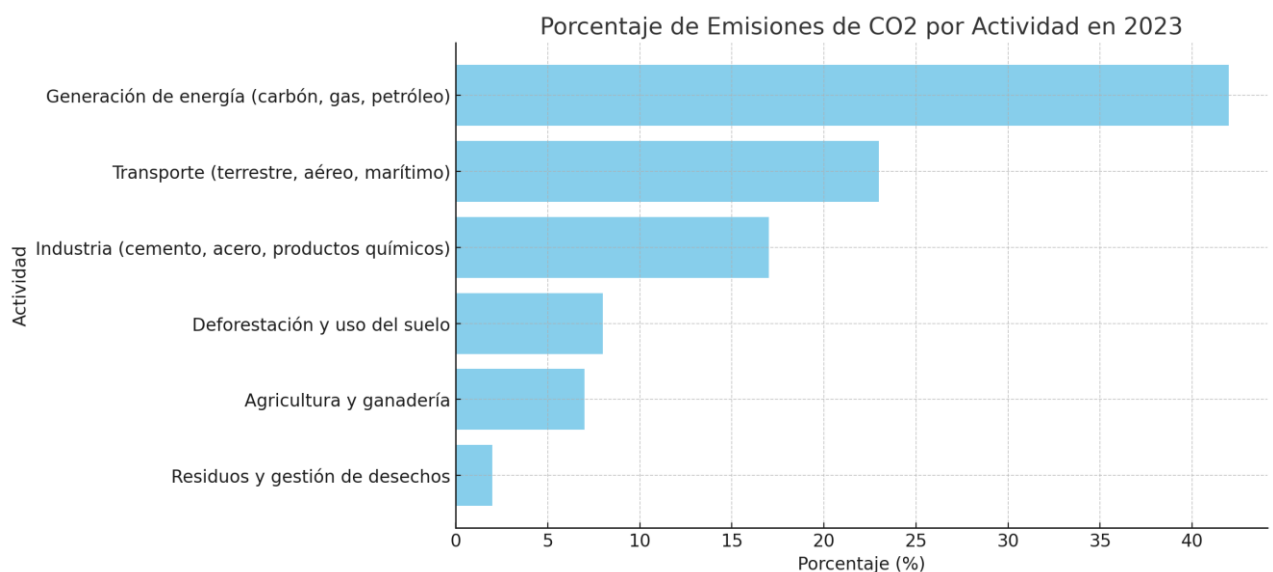


Figura 2-5 Emisiones de CO₂ globales según la IEA (International Energy Agency) [10].

De la Figura 2-5 también podemos discernir que el sector del transporte ocupaba un 23% de las emisiones de dióxido de carbono mundiales, y la tendencia ha sido ascendente desde entonces. Según la Agencia Europea de Medioambiente, la navegación internacional produce casi un 4% de las emisiones totales del transporte, de ahí la importancia de reducir los contaminantes que se producen en este sector [11].

2.2 Descarbonización

En este contexto, el futuro depende de la transición hacia una economía más sostenible, en la que la descarbonización desempeñará un papel clave. Por suerte, tanto el sector empresarial y las

organizaciones como la sociedad en general han reconocido la gravedad de esta situación, lo que ha impulsado avances significativos para contrarrestar sus efectos [12].

La descarbonización es un proceso gradual que busca disminuir la emisión de carbono a la atmósfera. Reducir estos niveles y alcanzar las denominadas cero emisiones netas representa un avance crucial en la lucha contra el calentamiento global [12].

Para llevar a cabo esta descarbonización y, por ende, luchar contra el calentamiento climático, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico ha tenido a bien diseñar una estrategia de actuación, cuyos programas se recogen en la Estrategia de Descarbonización a largo Plazo 2050. Donde se dictan los objetivos a programar para el año 2050, desde un punto de vista nacional, europeo e internacional [7].

Una de las principales opciones para llevar a cabo el proceso de descarbonización es el uso de energías renovables. En la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP) (Figura 2-6), se contempla una previsión del porcentaje de uso de energía renovables respecto a la energía total. Este plan espera que para mitad de siglo XXI que la participación de las tecnologías renovables en el consumo final de energía se incremente hasta más del 90% [7].

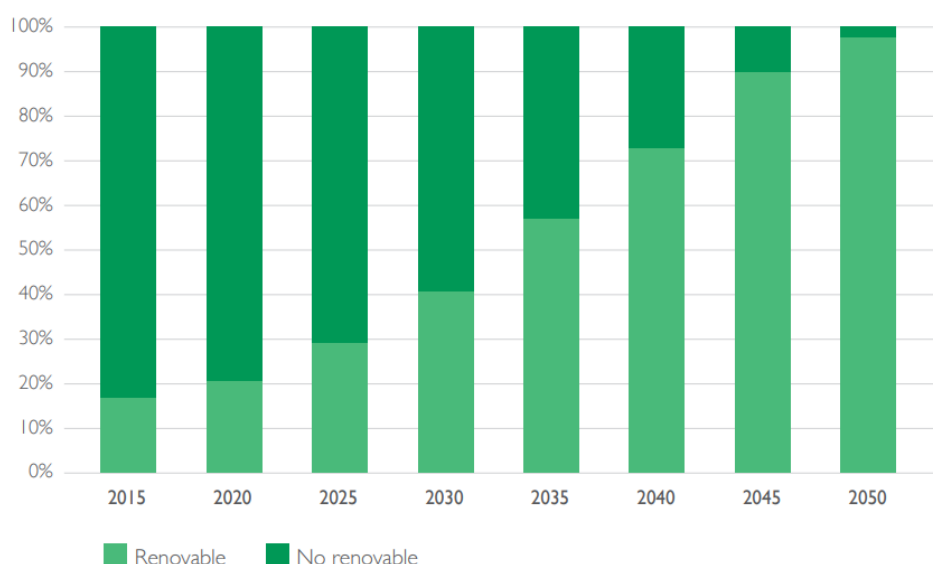


Figura 2-6 Previsión de uso de energías renovables según la ELP [7].

2.2.1 Estrategias y tecnologías para una movilidad sostenible en el sector naval

Para lograr una movilidad sostenible en el sector naval, se están desarrollando diversos proyectos enfocados en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en la mejora de la eficiencia energética de las embarcaciones. Estas iniciativas abarcan la investigación y desarrollo de tecnologías de propulsión más limpias, la exploración de nuevas alternativas de combustibles, la implementación de rutas verdes, la electrificación de infraestructuras portuarias y el aprovechamiento de energías renovables, como la solar y la eólica, además del avance en pilas de hidrógeno.

Una de las maneras de reducir la huella de carbono es utilizando combustibles alternativos. Ya en el trabajo de fin de grado del actual AN José Gómez-Vizcaíno Escudero [13], se evaluaron las posibles alternativas a los combustibles fósiles en el sector naval:

- **Biocombustibles:** Existiendo cuatro tipos dependiendo de la procedencia del compuesto. Los de primera generación provienen de cultivos agrícolas, como el bioetanol y el biodiesel, y aunque son una opción de transición hacia combustibles más sostenibles, su uso será progresivamente limitado. Los de segunda generación se obtienen de residuos orgánicos no

destinados a la alimentación, como el HVO, el SAF, el biogás y el biometano, lo que permite reutilizar recursos y reducir la acumulación de desechos en vertederos. Los de tercera generación se extraen de algas y plantas acuáticas con alto contenido de aceite, pero aún no han alcanzado una producción a escala comercial. Finalmente, los de cuarta generación buscan modificar genéticamente microorganismos para mejorar la captura y almacenamiento de CO₂, aunque por ahora solo existen plantas piloto en Brasil y E.E.U.U.

- **Hidrógeno:** Puede utilizarse como combustible en motores de combustión interna o en pilas de combustible, ofreciendo una alternativa más limpia a los combustibles fósiles. Su principal ventaja es que, en lugar de emitir CO₂, su combustión solo genera agua como subproducto. Además, mientras que los combustibles fósiles son recursos finitos, el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y puede obtenerse sin restricciones.
- **Gas Natural Licuado (GNL):** El Gas Natural Licuado (GNL) es un combustible alternativo prometedor para la propulsión marina, ya que reduce la necesidad de equipos costosos para el tratamiento de gases de escape. Compuesto en un 98% de metano, emite bajas cantidades de CO₂ y NO_x. Su licuefacción a -160°C reduce su volumen en un 600%, facilitando el transporte, aunque requiere una alta inversión inicial para la construcción de buques metaneros.
- **Metanol:** Es un combustible líquido de fácil transporte y almacenamiento, lo que lo hace una opción atractiva. Actualmente, existen motores dual fuel en buques que operan con metanol, y su distribución está respaldada por redes logísticas globales. Su uso en el sector marítimo se basa en una tecnología probada y desarrollada en los últimos años.
- **Amoníaco:** Es un combustible limpio y libre de carbono, ya que su combustión no genera CO₂, principal causante del efecto invernadero. Además, su producción es sencilla mediante la síntesis de hidrógeno renovable.
- **Sintéticos:** Creados combinando hidrógeno y dióxido de carbono. Pese a tener un alto costo de producción, son una opción muy viable para sectores difíciles de electrificar, como la aviación y el transporte pesado. Actualmente, su producción es limitada y no se espera que escale a nivel global en los próximos años.

Otra opción disponible actualmente es la electrificación y propulsión híbrida. Ambas opciones se basan en el uso de electricidad como medio de propulsión reduciendo los GEI y avanzando hacia operaciones más sostenibles. Cabe destacar:

- **Buques eléctricos:** Los buques eléctricos, impulsados exclusivamente por baterías, son especialmente adecuados para rutas cortas debido a las limitaciones actuales en la densidad energética de las baterías. Un ejemplo destacado es el proyecto de Balearia, que ha presentado dos “fast ferries” 100% eléctricos para operar en el corredor verde entre Tarifa (España) y Tánger (Marruecos). Estos catamaranes estarán equipados con baterías de 11.500 kWh, permitiendo realizar la travesía de 18 millas sin emisiones. La recarga se efectuará en cada puerto durante una escala de una hora mediante brazos robóticos autónomos. Este proyecto pionero combina avances tecnológicos con un enfoque medioambiental, reforzando la conexión sostenible entre Europa y África [14].
- **Propulsión híbrida:** La propulsión híbrida, que combina motores eléctricos con motores de combustión interna, proporciona flexibilidad y eficiencia energética. Esta solución es ideal para buques que requieren mayor autonomía o navegan en rutas con infraestructura de recarga limitada. Un estudio reciente propone un sistema de control energético para micro redes a bordo, integrando generadores diésel, celdas de combustible y baterías. Esta estrategia optimiza la gestión de energía y la velocidad del buque, reduciendo costos operativos y permitiendo operaciones sin emisiones [15]. Actualmente, la propulsión híbrida con almacenamiento de energía eléctrica a bordo está ganando popularidad en embarcaciones de pasajeros como ferris y yates, especialmente en rutas cortas. Entre sus

principales fabricantes se encuentran MTU (filial de Rolls-Royce), Volvo Penta y Wartsila [16].

2.2.2 Descarbonización en las Fuerzas Armadas

Los ejércitos a nivel mundial representan una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero. Si bien no se conoce con precisión su impacto exacto, las estimaciones sugieren que aportan entre el 1 % y el 5 % de las emisiones globales, un nivel similar al de las industrias de la aviación y el transporte marítimo, que representan alrededor del 2 % cada una. De acuerdo con un estudio reciente, en 2019 los sectores de defensa de los países miembros de la UE generaron aproximadamente 24,8 millones de toneladas de CO₂, una cantidad comparable a la emisión anual de catorce millones de vehículos de tamaño medio [17].

Hoy en día, hay una tendencia en las Fuerzas Armadas a comprometerse con el medio ambiente, a través de procesos como la descarbonización o consumo energético eficiente. Llevar a cabo la descarbonización con un uso adecuado de las nuevas tecnologías relacionadas con el uso de energías renovables, no es un proceso sencillo, ya que, en la milicia, los sistemas requieren de gran cantidad de combustibles fósiles para su funcionamiento y operatividad, ya sea por el uso de generadores o motores de combustión interna. Por otro lado, también cabe considerar que las FAS tiene un mayor protagonismo en el espacio exterior, sector altamente contaminante y productor de GEI [17].

Hasta el momento, las Fuerzas Armadas han permanecido al margen de cualquier acuerdo internacional sobre el cambio climático adoptado por sus respectivos países. Como consecuencia, no han estado obligadas a elaborar un inventario público detallado y preciso que permita cuantificar sus emisiones de GEI, especialmente aquellas derivadas de sus actividades y despliegues en el extranjero, ya sea en operaciones internacionales o conflictos armados. En este sentido, tampoco han tenido la responsabilidad de contribuir al esfuerzo de reducción de emisiones asumido por sus sociedades civiles conforme a los compromisos internacionales adquiridos por sus naciones. Un ejemplo de esta exclusión se encuentra en la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, cuya disposición adicional primera, titulada “Exclusión del ámbito de la ley de los equipos, sistemas de armas, instalaciones y actividades de las Fuerzas Armadas y de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad”, establece lo siguiente [18]:

“Quedan excluidos del ámbito de aplicación de esta ley los equipos, sistemas de armas, instalaciones y actividades cuyo propósito sea la protección de los intereses esenciales de la Defensa Nacional y de la Seguridad Pública. No obstante, los Ministerios de Defensa y del Interior se esforzarán por garantizar que la actuación de las Fuerzas Armadas y de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado se lleve a cabo, en la medida de lo posible, de forma compatible con los objetivos de la ley [18]”.

Sin embargo, se prevé la eliminación de esta excepción en los años venideros. El uso de energías renovables en las misiones militares puede aportar diversas ventajas, especialmente al reducir la dependencia del transporte de combustibles fósiles, que suele ser uno de los puntos más vulnerables en las operaciones en el exterior. Además, entre los beneficios se destaca la capacidad de emplear energías renovables para obtener mayor autonomía frente a las redes eléctricas, que son susceptibles de ser atacadas y comprometer así tanto la actividad de las Fuerzas Armadas como la seguridad de la nación [18].

Un factor adicional que dificulta la descarbonización es el largo ciclo de adquisición y vida útil de los equipos. Un ejemplo de ello son los aviones de combate F-16, que comenzaron a operar en EE. UU. en 1979 y cuya retirada está programada para 2040. En estos casos, la única alternativa viable es modificar su estructura para integrar un sistema diferente.

En la Figura 2-7 se puede observar de manera gráfica las oportunidades que supone una transición energética de las Fuerzas Armadas, partiendo de una serie de medidas como la diversificación de las fuentes de energía, generación autóctona de energía y la eficiencia energética. Estas medidas supondrán

la aparición de ciertas ventajas, como la menor vulnerabilidad a la variación de precios energéticos, el aumento de la autonomía estratégica y una mejora de la imagen y reputación social.



Figura 2-7 Riesgos y oportunidades expuestos en Plan de Energía y Geoestrategia 2024 [18].

En España se ha seguido la doctrina promulgada por la secretaría de estado de defensa, “Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa – ETID” [19] de 2020, donde ya en las líneas de acción del departamento de I+D+i se busca reducir el impacto medioambiental:

“Interés por minimizar el impacto ambiental de las actuaciones de las Fuerzas Armadas en misiones de baja y media intensidad, para lo que las nuevas formas de generación, almacenamiento y gestión energética se irán abriendo paso tanto en plataformas como en instalaciones fijas.”

También se muestran las líneas de interés para la defensa y entre ellas se encuentra la búsqueda y estudio de un combustible alternativo no NATO SFC (Single Fuel Concept), que es el escogido por la OTAN en búsqueda de una mejor interoperabilidad de las unidades. España busca apoyar la investigación nacional para encontrar nuevas fuentes de combustible para presentar una innovación a la OTAN.

En el Anexo A de la ETID, en el punto 4, se desarrollan los avances y líneas de acción de cara a las bases e instalaciones, dentro de las cuales, la 4.2.1 trata de buscar un sistema integrado de generación de energía eléctrica renovable para las bases de las zonas de operaciones. Tema de vital importancia ya que un autoabastecimiento de energía permite una menor dependencia de las líneas eléctricas locales. Este punto también trata la búsqueda de un sistema de generación de energía para campamentos aislados, que sea fácil de transportar y garantice un suministro continuo y suficiente.

Por último, en el punto 5 del Anexo A [19], se presenta la necesidad de investigar y desarrollar nuevas tecnologías en los ámbitos de la propulsión híbrida o totalmente eléctrica. Asimismo, se contempla la integración y validación de sistemas de generación de energía eléctrica (basados en baterías, pila de combustible o renovables) que permitan el funcionamiento de determinados sistemas de la plataforma sin usar la propulsión principal.

Dentro de España, el AJEMA (Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada) tiene la responsabilidad de hacer cumplir la normativa en lo relacionado con el SGA (Sistema de Gestión Ambiental). Para ello, es apoyado y coordinado por el Almirante Jefe de Apoyo Logístico (AJAL). Ambos hacen cumplir la norma ISO 14001, que establece la política ambiental y contiene los principios sobre los que se debe basar la gestión de la institución, algunos de estos son: [20]

- Asegurar la correcta gestión de los residuos, vertidos y emisiones generados.

- Cumplir la legislación ambiental y la normativa del Ministerio de Defensa.
- Difundir la Política Ambiental en la Armada.
- Mejorar continuamente el SGA.
- Proteger el medio natural y el entorno.
- Utilizar de forma racional los recursos naturales.

A su vez, dentro del Estado Mayor de la Armada (véase Figura 2-8), se encuentra la División Logística (DIVLOG) que se encarga de controlar y coordinar las medidas que se han de llevar a cabo para la protección del medio ambiente relacionadas con los buques, las aeronaves y las instalaciones. A su vez, la DIVLOG se disgrega en dos secciones:

- Sección de Infraestructura (SINFRA): Se encarga de desarrollar las acciones necesarias para asegurar el cumplimiento y avance de las directrices y objetivos de la Política Ambiental y de Eficiencia Energética establecida por el Ministerio de Defensa.
- Jefatura de Apoyo Logístico (JAL): Es responsable de planificar las acciones vinculadas a la gestión medioambiental y la eficiencia energética en instalaciones navales, manteniendo siempre el seguimiento de la DIGENIN (Dirección General de Infraestructura).

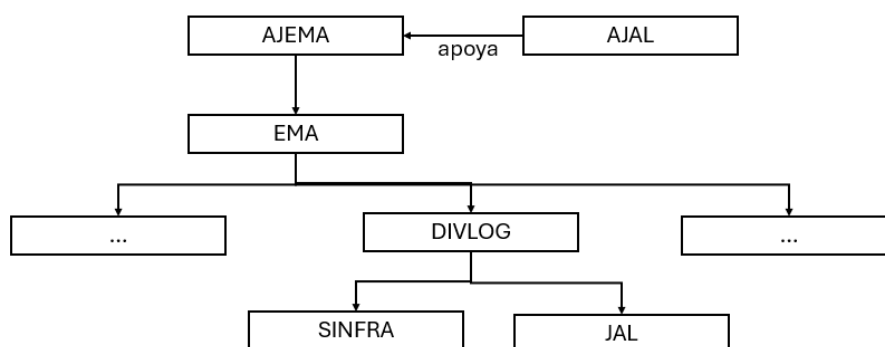


Figura 2-8 Organigrama de dependencias de la DIVLOG y sus componentes (elaboración propia).

2.3 Hidrobiodiésel (HVO)

El HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) es un biocombustible avanzado obtenido a partir de aceites vegetales, grasas animales y aceites usados, los cuales se someten a un proceso de hidrotratamiento que elimina impurezas y mejora su calidad. Gracias a este tratamiento, el HVO presenta propiedades similares al diésel fósil, permitiendo su uso en motores diésel convencionales sin necesidad de modificaciones. Su desarrollo y aplicación lo han convertido en una alternativa clave en la transición hacia una movilidad más sostenible, reduciendo el impacto ambiental del transporte [21].

La empresa alemana Weideman [22], dedicada a la fabricación de maquinaria agrícola defiende que a diferencia del biodiésel, el HVO presenta una mayor estabilidad química, un menor contenido de impurezas y una combustión más eficiente, lo que se traduce en una reducción significativa de las emisiones contaminantes. Su capacidad para disminuir hasta un 90% las emisiones de CO₂ lo convierte en una alternativa viable para el transporte, la industria y la maquinaria pesada, sin necesidad de realizar modificaciones en los motores existentes.

Según un estudio realizado por el Colegio de Ingeniería de Saveetha [23] en la India, se constata que existen estudios experimentales que respaldan las alternativas al diésel con una gran cantidad de datos. Por ejemplo, los motores marinos de velocidad media que utilizan una mezcla 50:50 de HVO y diésel

produjeron un 60% menos de emisiones de BC (Black Carbon) también conocido como hollín, y un 75% menos de óxidos de azufre (SO_x) en comparación con el HFO (Heavy Fuel Oil) típico.

Además de su impacto positivo en la reducción de emisiones, el HVO destaca por su alto índice de cetano, superior al del diésel convencional. Este parámetro es fundamental para la calidad de la combustión, ya que determina la rapidez con la que el combustible se enciende dentro del motor. Con un valor cercano a 90.5, el HVO permite una combustión más eficiente y uniforme, reduciendo el ruido del motor y mejorando su desempeño en condiciones de arranque en frío. Esta característica es especialmente relevante en aplicaciones industriales y de transporte pesado, donde la estabilidad operativa y la reducción del desgaste mecánico juegan un papel crucial en la eficiencia y el mantenimiento de los equipos [24].

A pesar de los avances en la producción y adopción del HVO como biocombustible, su despliegue a gran escala aún enfrenta desafíos significativos, en gran parte debido a las barreras económicas y regulatorias. Según estudios sobre los biocombustibles avanzados en Europa, la falta de incentivos financieros y un marco regulador más definido han limitado su expansión en comparación con los combustibles fósiles. Además, los altos costos de producción y la incertidumbre en la cadena de suministro siguen siendo obstáculos clave. Para que el HVO pueda cumplir un papel determinante en la descarbonización del transporte de aquí a 2030, es fundamental la implementación de políticas específicas que faciliten su integración en el mercado. Esto incluye la mejora de infraestructuras logísticas, incentivos fiscales para su producción y distribución, y una mayor inversión en investigación para optimizar su eficiencia y reducir costos [25].

2.3.1 Impacto ambiental del HVO

El impacto ambiental en la producción del HVO varía según la materia prima utilizada, el proceso de producción y las fuentes de energía involucradas. Las etapas son las siguientes:

- **Materias primas:**
 - Aceite de palma: El empleo de aceite de palma en la producción de HVO ha sido cuestionado por su impacto en la deforestación, la pérdida de biodiversidad derivadas de su cultivo y la contaminación ambiental, tanto por el uso de pesticidas como por las pérdidas de nitrógeno derivadas del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados [26].
 - Aceites reciclados y grasas animales: El principal problema de estos aceites es que resultan muy contaminantes si el manejo o la generación de ellos no se lleva a cabo de forma precisa, llegando a contaminar el medio ambiente en caso de vertidos o a degradar el aceite, lo que reduce su eficacia como combustible [27].
- **Proceso de producción y consumo energético:** El HVO se obtiene mediante un proceso de hidrogenación catalítica, este se compone de varias fases [26]:
 - Pretratamiento: Eliminación de las impurezas de aceites y grasas.
 - Hidrogenación: Conversión de triglicéridos en hidrocarburos con la adición de hidrógeno.
 - Isomerización y refinamiento: Mejora las propiedades del combustible para su uso en motores diésel
- **Emisiones de gases de efecto invernadero:**
 - Reducción de emisiones: El uso de HVO puede reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 90% en comparación con el diésel convencional, dependiendo de las materias primas y procesos utilizados [23].
- **Uso de recursos y residuos:**
 - Consumo de agua: Para la obtención de las materias primas necesarias, será indispensable requerir grandes cantidades de agua, en especial para el cultivo de la palma y la soja [27].
 - Gestión de residuos: Al obtener combustible a través de aceites de cocina y grasas animales se gestionan estos residuos y se evita una contaminación mayor por parte de estos [26].

2.3.2 Capacidad de producción y suministro de HVO en España

La producción y suministro de HVO en España ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por inversiones de empresas energéticas y la creciente demanda de combustibles más sostenibles. Los principales actores encargados de su producción y suministro en España son:

- Repsol: La empresa Repsol ha iniciado la producción de HVO en su refinería de Cartagena, usando residuos de origen orgánico como materia prima. Es la única compañía de España y Portugal que tiene una única planta completamente especializada en la producción de combustibles renovables. La planta tiene una capacidad de producción de 250.000 toneladas al año y según la propia compañía, esperan reducir 900.000 toneladas de CO₂ anuales [28].
- Moeve (antigua Cepsa): Con su industria en el Parque Energético La Rábida (Huelva), han empezado a producir combustibles ecológicos a partir de residuos orgánicos y aceites de cocina. La empresa ya ha empezado a comercializar con este combustible, pero sólo a profesionales, aunque se espera que a finales de 2025 pueda suministrar este combustible en la mayoría de sus estaciones de servicio [29].
- Bp: bp ha lanzado su combustible renovable "bp bioenergy HVO" en España, inicialmente disponible en cuatro estaciones de servicio estratégicamente ubicadas en la Comunidad de Madrid, Comunidad Valenciana y Navarra. Este combustible ofrece una reducción mínima del 85% en emisiones de CO₂ en comparación con el diésel fósil [30].
- Oleofat: Líder en España en la producción de materias primas a partir de la obtención y transformación de subproductos y residuos para el desarrollo de biocarburantes avanzados como es el caso del Aceite Vegetal Hidrogenado. Cuentan con una biorrefinería en Caparrosa (Navarra), donde se lleva a cabo la producción de materia prima para biocarburantes de segunda generación (HVO), glicerinas y biodiesel [31].

Actualmente la empresa que más ha desarrollado la infraestructura para la comercialización de HVO es Repsol, con una planta de producción a gran escala situada en el complejo de Cartagena, Murcia.

Como aparece en la página web de Repsol [32], la construcción de esta planta (véase Figura 2-9) les posiciona como una compañía clave en la producción de combustibles renovables, ayudando a disminuir la huella de carbono en el sector del transporte. La planta, única en la península permitirá producir 250.000 t/a de combustibles renovables. Su uso podría llegar a reducir 900.000 toneladas de CO₂ al año al suponer una reducción del 80-90% de las emisiones netas de CO₂ en comparación con el combustible fósil que sustituye.



Figura 2-9 Operarios de Repsol en la Planta de producción de combustibles renovables de Cartagena [32]

La propia compañía Repsol, como incentivo para promover el consumo de este combustible en automóviles, ha creado un sistema de fidelización a través de la aplicación Waylet, de forma que, por cada litro de aceite de cocina usado que los usuarios entregan, estos recibirán un cupón de 30 céntimos de descuento para próximos repostajes. Actualmente esta promoción sólo es válida en ciertas gasolineras de la Comunidad de Madrid, Castilla La Mancha y Galicia [33] [34].

2.3.3 Normativa, regulación y certificación

La regulación de los combustibles ecológicos en España se enmarca en directrices europeas y normativas nacionales que buscan promover el uso de energías renovables y garantizar la sostenibilidad en su producción y consumo. Las normas más destacables son:

- Directiva Europea 2009/28/CE: Establece criterios para el uso de biocarburantes dentro de la Unión Europea, incluyendo requisitos de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [35].
- Real Decreto 376/2022, de 17 de mayo: Regula los criterios de sostenibilidad y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa en España. Este decreto también implementa un sistema de garantías de origen para los gases renovables [36].
- Orden TED/728/2024, de 15 de julio: Establece el mecanismo de fomento de biocarburantes y otros combustibles renovables destinados al transporte, actualizando el sistema de certificación y definiendo límites para biocarburantes producidos a partir de cultivos alimentarios y forrajeros [37].

El combustible suministrado debe cumplir las especificaciones de la UNE-EN 15940:2016 “Combustibles para automoción. Gasóleos paraafínicos sintéticos u obtenidos por hidrotratamiento”. Para ellos se han creado los siguientes sistemas de certificación:

- Sistema de Certificación de Biocarburantes y otros Combustibles Renovables (SICBIOS): Es una plataforma gestionada por la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España. Su principal objetivo es certificar y supervisar las cantidades de biocarburantes y otros combustibles renovables vendidos o consumidos en el territorio nacional con fines de transporte [37].
- International Sustainability and Carbon Certification (ISCC EU): es un sistema de certificación reconocido por la Comisión Europea que verifica el cumplimiento de los requisitos legales de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero establecidos en la Directiva de Energías Renovables (RED II) de la Unión Europea. Este esquema se aplica a biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa destinados al transporte y a la producción de electricidad, calefacción y refrigeración a partir de biomasa [38].
- Sustainable Bioenergy Standard: Es un esquema de certificación global diseñado para garantizar que la biomasa, utilizada en la producción de energía y otros sectores industriales, sea obtenida de manera legal y sostenible. Este programa se centra en biomasa de origen forestal, como pellets y astillas de madera, asegurando que su producción y cadena de suministro cumplan con criterios estrictos de sostenibilidad y trazabilidad [39].
- Sistema KZR INIG: Es un esquema de certificación polaco reconocido por la Comisión Europea, diseñado para verificar que la producción de biocarburantes, biolíquidos y biomasa se realice de acuerdo con principios de sostenibilidad y en cumplimiento con la Directiva de Energías Renovables (RED II) de la Unión Europea. Este sistema, administrado por el Instituto Nacional de Investigación de Petróleo y Gas (INiG), tiene como objetivo garantizar que toda la cadena de suministro de estos productos sea ambientalmente responsable y legalmente conforme [40].

2.3.4 Perspectivas de futuro para el HVO

El HVO se presenta como una alternativa renovable al diésel convencional, permitiendo reducir emisiones sin requerir modificaciones significativas en los motores. Este combustible se inserta en un contexto de innovación tecnológica y sostenibilidad, con aplicaciones potenciales en el transporte terrestre, el sector marítimo, la aviación y la generación de energía. A continuación, se analizarán las líneas futuras de su uso, destacando tanto oportunidades como desafíos en su integración en la matriz energética actual.

En primer lugar, la Universidad Nacional de Pusan (Corea del Norte) [41], señala algunas perspectivas y líneas futuras para el uso de HVO, que se pueden desglosar en los siguientes puntos:

- Mejora de las emisiones mediante aditivos: Debido a que el HVO es completamente parafínico y no contiene oxígeno, se sugiere que su potencial para reducir emisiones se puede ampliar al mezclarlo con oxigenados adecuados. Por ejemplo, la incorporación de di-n-pentil éter (DNPE) –un aditivo con alto número de cetano y buena solubilidad en diésel– ha demostrado reducir las partículas emitidas en un 25–30% (dependiendo de la carga) con apenas variaciones en las emisiones de NOx. Esta estrategia abre la vía a futuros desarrollos para optimizar las mezclas de HVO y lograr combustiones aún más limpias.
- Optimización del equilibrio entre PM y NOx: La mezcla HVO–DNPE se perfila como una alternativa para reducir significativamente la formación de partículas (PM) sin provocar aumentos importantes en NOx. Se prevé que, combinando estos aditivos con tecnologías complementarias –como la recirculación de gases de escape (EGR)– se puedan afinar aún más los perfiles de emisión, consiguiendo un balance óptimo entre bajas emisiones de PM y control de NOx.
- Investigación sobre propiedades higroscópicas de los productos de combustión: El artículo también destaca la importancia de estudiar cómo la incorporación de oxígeno en la mezcla afecta las propiedades higroscópicas de las partículas emitidas. Un ligero aumento en la capacidad higroscópica podría influir en la formación y crecimiento de partículas secundarias, lo que resulta relevante para el control de emisiones a nivel de la atmósfera.
- Integración y escalabilidad en motores diésel sin modificaciones mayores: Otra línea futura consiste en adaptar estas mezclas (por ejemplo, mezclas que contengan un 80% de HVO y 20% de DNPE) para su uso en motores diésel existentes sin necesidad de modificaciones sustanciales. Esto facilitaría la adopción generalizada del HVO como combustible renovable en el sector del transporte.
- Contribución a la expansión de energías renovables en el sector del transporte: Al ser un combustible derivado de aceites vegetales, el HVO ofrece una vía para incrementar la proporción de energía renovable en el sector del transporte, ayudando a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a cumplir con objetivos ambientales y normativos a largo plazo.

El artículo "Effects of EGR Rate and Temperature on Combustion and Emissions Characteristics of Compression Ignition Engines Fueled with Hydrotreated Vegetable Oil" [42] analiza cómo la recirculación de gases de escape (EGR) influye en la eficiencia de combustión y las emisiones de un motor diésel utilizando HVO. Las líneas futuras sobre el empleo de HVO que se tratan en el artículo son:

- Estudios sobre la viabilidad a largo plazo del HVO: Aunque este combustible presenta ventajas en términos de emisiones y rendimiento, su costo de producción sigue siendo un obstáculo. Se necesita más investigación para optimizar su producción y reducir costos.
- Combinación de HVO con tecnologías emergentes: Se menciona que la combinación de HVO con sistemas avanzados de postratamiento de gases o tecnologías híbridas podría maximizar su potencial como alternativa sostenible a los combustibles fósiles.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

Este estudio tiene como objetivo comparar el rendimiento y la sostenibilidad de dos tipos de combustible: uno 100 % renovable, elaborado a partir de aceite vegetal, y otro de uso convencional. Para llevar a cabo la investigación, se utilizarán las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar, en particular la "GM Barrutia", que operará con el combustible renovable, y la "GM Chereguini", que continuará utilizando el combustible habitual.

La organización llevada a cabo para la realización del estudio es la representada en la Figura 3-1 donde se pueden apreciar las tres fases.

La primera fase consta de una recopilación de información de todas las salidas a la mar de la plataforma de estudio. Con la colaboración del alumnado se recopilan los datos necesarios para que, al ser tratados, se pueda obtener una comparación del consumo de ambas embarcaciones desde diferentes puntos de vista, como el consumo por hora navegada, por velocidad o por milla recorrida, así como la autonomía y el consumo total de las L.L.I.I. desde el comienzo de la investigación.

En la segunda fase se recaba información sobre las emisiones de agentes contaminantes de cada uno de los combustibles, para ello será necesario un equipo específico capaz de obtener y leer los datos requerido, será también indispensable realizar una serie de salidas a la mar específicas con el fin de recoger esta información.

Por último, la tercera fase consiste en un análisis de las necesidades logísticas que implicaría trabajar con este nuevo compuesto.

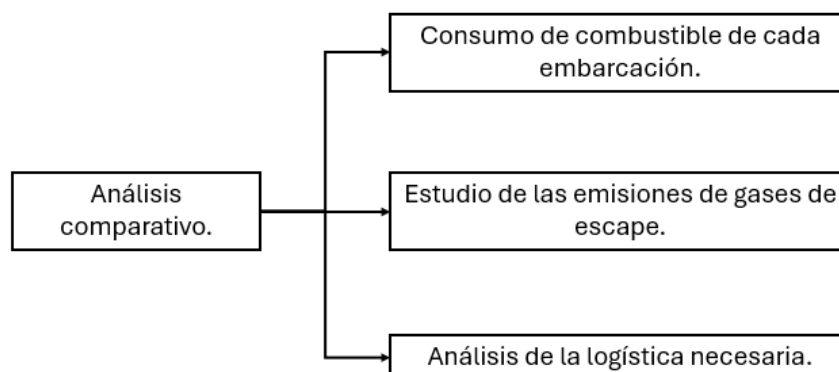


Figura 3-1 Estructura del proyecto (elaboración propia).

En cuanto a la distribución del Desarrollo del TFG, se tratarán los aspectos generales necesarios y las experiencias durante las mediciones. En un principio, se explicará la plataforma de estudio, su motor y sistema de propulsión, así como el equipo de análisis de gases utilizado y su modo de empleo; a continuación, se tratarán los detalles de los combustibles de estudio y sus diferencias y, por último, se reflejarán la metodología llevada a cabo para recabar los datos y el registro de estos. Finalmente, se comentará el análisis de propiedades de los combustibles pasados 2 meses desde su incorporación a las Lanchas de Instrucción.

3.2 Plataforma y equipo de medición

3.2.1 Lanchas de Instrucción

La plataforma es el medio o servicio disponible para llevar a cabo la investigación y realizar las mediciones de emisiones correspondientes. Con el respaldo de la Escuela Naval Militar, se llevará a cabo un estudio de viabilidad y comparación del combustible HVO en las Lanchas de Instrucción (L.L.I.I), centrándose en la "GM Barrutia", que opera con combustible renovable, y la "GM Chereguini", que utiliza un combustible convencional. La Escuela Naval Militar, como centro de formación y enseñanza para los futuros oficiales de la Armada, precisa de estas embarcaciones para cumplir los requisitos necesarios de los alumnos antes de egresar, entre ellos caben destacar:

- Acostumbrar y familiarizar al alumno con el entorno en el que ejercerá su profesión, comprendiendo la organización de un buque, su estructura, equipos, la vida a bordo y las operaciones que en él se llevan a cabo.
- Mediante prácticas en condiciones reales, demostrar y consolidar los conocimientos teóricos adquiridos en las distintas materias profesionales, con el fin de desarrollar hábitos y habilidades esenciales para la profesión que desempeñarán.
- Hacer que los alumnos empiecen a trabajar en una sociedad escalada teniendo subordinados a sus órdenes y delegando en ellos.
- Ejercer como mando de un grupo y aprender a tratar con superiores.

Actualmente la Escuela Naval Militar cuenta con 6 lanchas de instrucción modelo Rodman 66 como se puede observar en la Figura 3-2.



Figura 3-2 Lanchas de Instrucción atracadas en el muelle Almirante Vierna (fuente propia).

- Guardiamarina Barrutia (A-121)
- Guardiamarina Chereguini (A-122)

- Guardiamarina Rull (A-123)
- Guardiamarina Salas (A-124)
- Guardiamarina Godínez (A-127)
- Guardiamarina Herrero (A-128)

Entre ellas, se diferencian dos series en función de los equipos que disponen. La primera serie compuesta por las 4 primeras, entregadas entre el 2006 y 2007 y la segunda serie formada por las 2 últimas entregadas en el 2024. Toda la información obtenida sobre las lanchas se encuentra expuesta en el “Manual de las Lanchas de Instrucción A-121” [43].

3.2.1.1 Características generales de las Lanchas de Instrucción

A pesar de las diferencias entre los equipos y sistemas dentro del Grupo de L.L.I.I., la estructura de todas las unidades se basa en el modelo Rodman 66. Como resultado, comparten la misma distribución y características generales. A continuación, se proporcionará una descripción de la plataforma.

Para comenzar, es vital una visión general de la embarcación, en la Tabla 3-1 se muestran las características principales de las lanchas:

Característica	Valor
Eslora total	20,50 m
Eslora del casco	20 m
Manga del casco	4,90 m
Puntal	2.56 m
Calado aproximado en rosca	0,90 m
Capacidad de combustible	5000 l
Capacidad de agua	500 l
Propulsión	2 ejes y 2 hélices de paso fijo
Velocidad máxima	23 nudos
Velocidad de crucero superior a	15 nudos
Desplazamiento en rosca	29,5 toneladas
Tripulación prevista	16 personas
Alojamiento	16 personas

Tabla 3-1 Características principales de las L.L.I.I. [43].

Aunque según el fabricante, las Lanchas de Instrucción tienen tanques con capacidad de 5000l, la GM Barrutia tiene 4800 l y la GM Chereguini mantiene los 5000 litros de capacidad que tiene el resto.

La estructura de la Lancha de Instrucción está fabricada en PRFV (Poliéster Reforzado en Fibra de Vidrio) y diseñada para evitar que se cruce con el oleaje. Su forma optimizada permite que, al enfrentar la mar de proa, las líneas de la obra viva y su flotabilidad contribuyan a un movimiento de cabeceo suave, reforzado por el diseño en V de su casco. Véase la Figura 3-3.

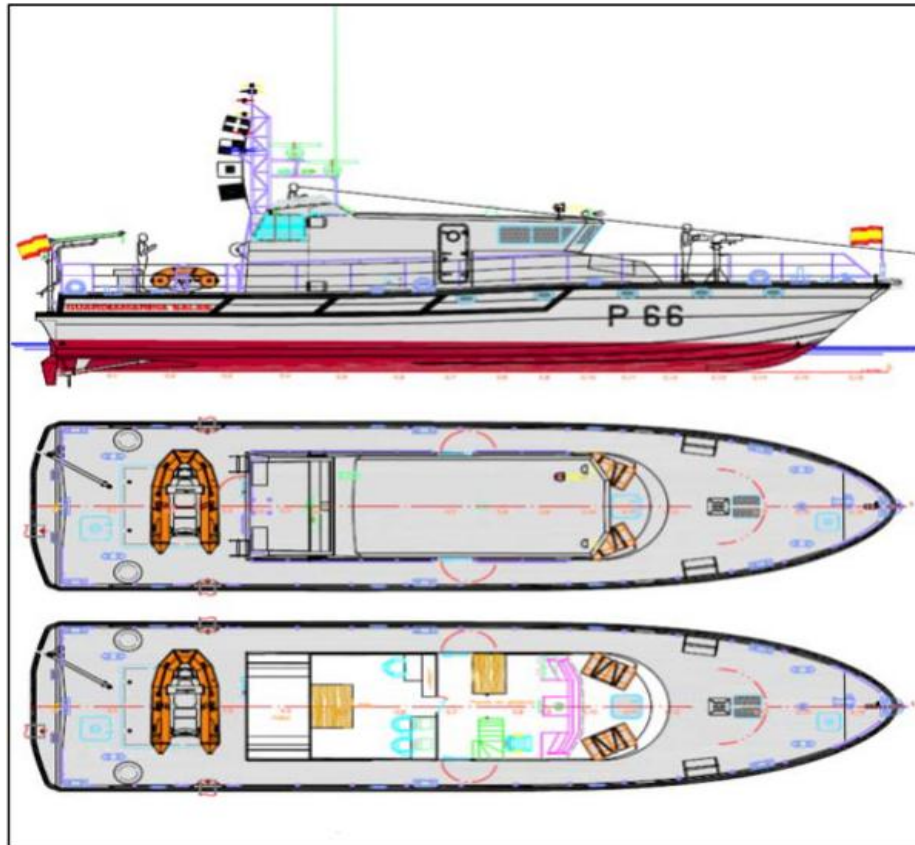


Figura 3-3 Vista de planta y perfil de una Lancha de Instrucción [43].

Según la Figura 3-4, donde se muestra la vista de perfil con un corte simétrico en el eje y la vista de planta con un corte paralelo al plano para apreciar la disposición del puente de mando, la embarcación está subdividida en cuatro zonas, separadas por mamparos transversales estancos y una cubierta. Estas zonas son: la zona 1, correspondiente al puente de mando; la zona 2, que alberga la cámara de máquinas; la zona 3, destinada al compartimento de tanques de combustible; y la zona 4, que conforma la zona de habitabilidad.

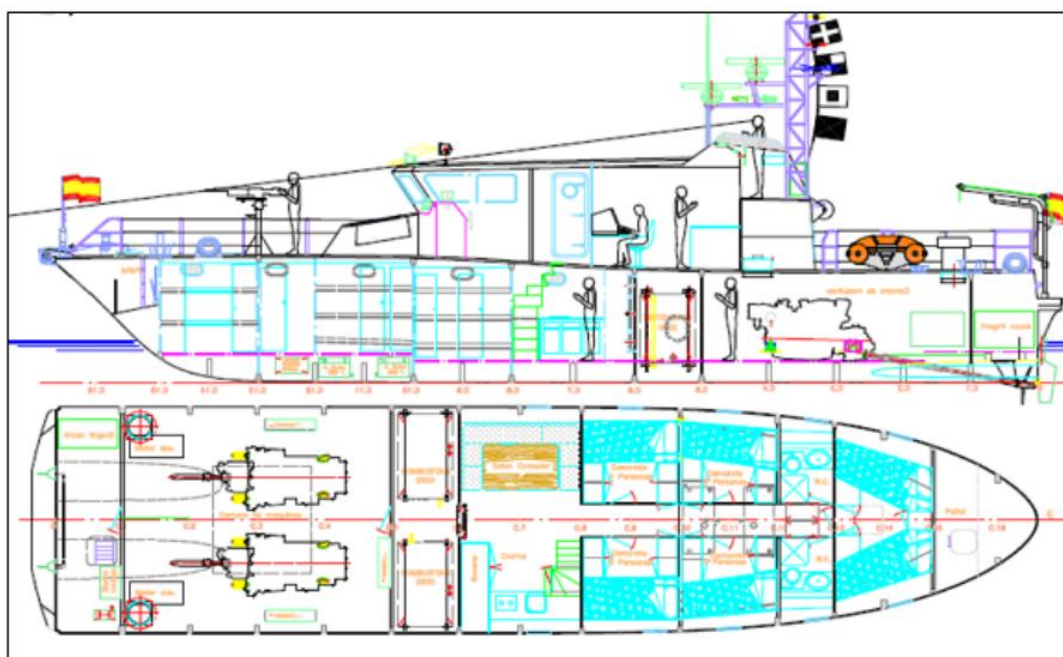


Figura 3-4 Planos de una Lancha de Instrucción con vista de perfil y planta [43].

3.2.1.2 Sistema de propulsión

En este apartado se tratará el sistema de producción de las L.L.I.I, al ser trabajo de estudio las dos primeras, “GM Barrutia” y “GM Chereguini” y poseer estas el mismo sistema de propulsión, se expondrá un solo un modelo de propulsión.

A proa de la cámara de máquinas se encuentran los tanques de combustible, separados de la cámara de máquinas y el comedor por mamparos estancos, regulados por puertas estancas. Los tanques están situados a babor y estribor de la crujía y tienen una capacidad total de 5000 litros. Se puede observar la disposición en la Figura 3-5.



Figura 3-5 Tanque de combustible de babor GM Chereguini (fuente propia).

Ambos tanques cuentan con un sistema de indicador del nivel de combustible al igual que con una sonda, acceso atmosférico y purga. El indicador del nivel de combustible se puede apreciar en la Figura 3-6 y se pueden obtener de él los datos de combustible, aunque no llega a ser muy preciso.



Figura 3-6 Nivel de combustible tanque de babor GM Chereguini (fuente propia).

En cuanto a la cámara de máquinas se trata de un compartimento situado en la popa de la embarcación donde se alojan los motores principales, el cuadro eléctrico principal, bomba contra

incendios, las baterías grupo 1 y grupo 2, extractores de aire, las tomas de mar, los filtros de gasoil, los detectores contraincendios y alarma de CO₂, bombas de achique, cargador de baterías, repartidor de carga y motores auxiliares. A popa se encuentra compartimiento de servo separado por una puerta estanca donde se encuentran la central hidráulica de dirección, timones y bancos de trabajo, la caña de emergencia y el congelador.

En la Figura 3-7 se puede apreciar una vista desde popa de la cámara de máquinas. La propulsión de las L.L.I.I. está compuesta por dos motores marinos diésel CATERPILLAR C18 y dos reductores-inversores hidráulicos marca ZF 550 A con reducción 1,971:1.



Figura 3-7 Cámara de máquinas de la L.I. GM Chereguini vista desde popa (fuente propia).

El sistema consta de dos propulsores, cada uno accionado por un motor a través de su correspondiente eje. Dado que ambos motores son idénticos y están ubicados a cada banda, pueden operar de manera sincronizada, permitiendo su uso conjunto como si se tratara de un solo motor, mediante la vinculación de los módulos de control a un acelerador común.

El motor propulsor, representado en la Figura 3-8, es un motor diésel marino de alta potencia, equipado con un sistema de sobrealimentación y refrigerado por agua de mar. Su configuración incluye cuatro tiempos, seis cilindros en línea, inyección directa de combustible, una cilindrada de 18 litros y un sistema de admisión de aire con turbo alimentación y postenfriamiento. Su potencia máxima en operación continua es de 746 kilovatios (kW) a un régimen de 2300 revoluciones por minuto (rpm).



Figura 3-8 Motor CATERPILLAR C18 de la L.I. GM Barrutia (fuente propia).

Los intercoolers (enfriadores) están diseñados para enfriar tanto el agua dulce del circuito de refrigeración como el aceite del motor. Cada motor incorpora un enfriador para el retorno de combustible, situado en la línea de entrada de agua al sistema. Asimismo, disponen de un escape individual que expulsa los gases hacia la popa del casco, con un conducto que se enfría parcialmente gracias al uso de agua salada en el sistema de refrigeración. Antes de ser expulsados, los gases de escape pasan por una turbina que incrementa la presión del aire de admisión, permitiendo una mejor compresión antes de su ingreso al motor.

El sistema de refrigeración de la lancha de instrucción está compuesto por un circuito de agua salada que extrae agua del mar para enfriar, de manera indirecta, el circuito cerrado de agua dulce que refrigera los motores principales. Cada motor posee un circuito independiente, sin conexión entre sí. Además de la refrigeración del motor, el agua salada también enfría el colector de gases de escape y las turbinas. Entre sus componentes principales se incluyen bombas de agua dulce y salada, tomas de agua ubicadas en la proa de los motores y filtros de acero inoxidable con tapas transparentes para supervisar el flujo.

3.2.2 Analizador de gases Testo 340

El Testo 340 (véase Figura 3-9) es un analizador de gases portátil diseñado para la medición de emisiones en diversos procesos industriales. Su construcción robusta y su facilidad de uso lo convierten en una herramienta esencial para la supervisión y optimización de sistemas de combustión, como motores, calderas y turbinas de gas. Gracias a su avanzada tecnología, permite obtener mediciones precisas en condiciones exigentes, asegurando el cumplimiento de normativas ambientales y la mejora del rendimiento de los equipos [44].



Figura 3-9 Analizador de productos de la combustión Testo 340 [45].

Una de las principales características del Testo 340 es su capacidad para integrar hasta cuatro sensores de gas simultáneamente, permitiendo la medición de componentes como oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO y NO_x) y dióxido de azufre (SO_2). Estos sensores son intercambiables y pueden ser reemplazados o calibrados fácilmente, lo que prolonga la vida útil del equipo y reduce los costos de mantenimiento. Además, el dispositivo cuenta con una función de dilución automática, que amplía el rango de medición en sensores de CO y NO, garantizando resultados más fiables incluso en concentraciones elevadas.

Es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales. En motores industriales, ayuda a controlar las emisiones y a optimizar la eficiencia del combustible. En turbinas de gas, permite realizar ajustes precisos para garantizar un rendimiento óptimo y reducir el impacto ambiental. También es una herramienta indispensable en la supervisión de calderas y quemadores, asegurando el cumplimiento de normativas ambientales y mejorando la seguridad operativa.

Para poder utilizar el dispositivo, es necesario disponer de una sonda (véase Figura 3-10) a introducir en el habitáculo donde se encuentran los gases. Esta sonda se encargará de obtener los gases y filtrarlos para su posterior análisis en el equipo. Véase la Figura 3-10.



Figura 3-10 Testo 340 junto a la sonda de análisis de gases [45].

Este analizador, pese a ser muy completo, presenta ciertas limitaciones.

- Pese a tener un sistema de dilución automática, algunos gases con concentraciones extremas pueden requerir de equipos más avanzados.
- Factores como la temperatura, presión o humedad pueden afectar la exactitud de los valores obtenidos.
- Reemplazar sensores y filtros puede ser costoso a largo plazo.

En lo que al proyecto respecta, las limitaciones anteriores no han supuesto un problema, pero sí es cierto que se han observado complicaciones en ciertas áreas:

- En cuando al tratado de las mediciones, existe un software de pago para obtener los datos directamente del equipo, pero dado su alto coste se han tenido que obtener por otras vías.
- El equipo no mide de manera correcta las emisiones de SO_2 (dióxido de azufre) y da siempre valores de cero. Sería adecuado subsanar el problema y comparar las emisiones.

3.3 Combustibles evaluados

3.3.1 HVO

El combustible HVO utilizado es el comercializado por Repsol bajo el nombre Repsol Diesel e+ Zero 100% Renewable, ahora conocido como Diésel Nexa 100% Renewable, es un combustible desarrollado por la propia empresa a partir de materias primas de origen 100% renovable, como residuos orgánicos, aceites de cocina usados y restos agrícolas y forestales. Este diésel avanzado está diseñado

para ser compatible con todos los motores diésel del mercado, ofreciendo una alternativa sostenible sin necesidad de modificar los vehículos existentes [46].

Una de las principales ventajas del HVO es su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 90% en comparación con los combustibles de origen mineral. Además, al no contener compuestos aromáticos, minimiza la formación de partículas durante la combustión, lo que contribuye a mantener las prestaciones del motor y a reducir los ruidos, especialmente en arranques en frío, gracias a su elevada cantidad de cetano [47].

Repsol ha implementado este combustible en más de 600 estaciones de servicio en la Península Ibérica y tiene previsto ampliar su disponibilidad a 1.500 estaciones para 2025. Los usuarios pueden consultar las estaciones que ofrecen este combustible a través de la aplicación Waylet o en la web [47].

Los estudios sobre el uso del HVO han demostrado que su impacto en el rendimiento de los motores diésel no solo es neutro, sino que en ciertos casos puede ser positivo. En pruebas experimentales realizadas en motores de encendido por compresión, se observó un incremento de la potencia indicada de hasta un 4,53% al utilizar HVO puro en comparación con el diésel convencional. Esta mejora se atribuye a la estructura química del HVO, que permite una combustión más eficiente y completa, reduciendo el retraso en el encendido y mejorando la estabilidad térmica del motor. Además, aunque la densidad del HVO es menor que la del diésel fósil, su poder calorífico por unidad de masa es ligeramente superior, lo que contribuye a mantener un rendimiento energético comparable en términos de consumo específico de combustible [48].

En cuanto a las propiedades del compuesto, estas aparecen en los análisis fisicoquímicos realizados (véase Anexo III: Análisis comparativo de los combustibles) y las características específicas del HVO de Repsol se detallan en su ficha de producto oficial [49], la cual destaca:

- Respaldo de fabricantes: Este combustible cuenta con el respaldo de los fabricantes de vehículos según el Worldwide Fuel Charter (WWFC), lo que subraya su calidad y el impacto positivo en el rendimiento y durabilidad del motor.
- Limpieza del sistema de alimentación: Posee un efecto "Clean up" que elimina las partículas acumuladas, restaurando las prestaciones originales del motor.
- Protección anticorrosión: Inhibe la herrumbre, protegiendo las superficies metálicas de la corrosión.
- Separación del agua: Facilita la rápida separación del agua, asegurando un suministro libre de agua al usuario final y el mantenimiento óptimo de las instalaciones de almacenamiento de carburante.
- Fórmula estabilizante avanzada: Con una fórmula estabilizante patentada de tercera generación, utiliza componentes especiales que controlan su oxidación natural, evitando la formación de productos insolubles derivados de la oxidación del carburante, lo que asegura un funcionamiento óptimo del sistema de alimentación del motor.

Propiedad	Unidad	Norma	Valor
Densidad a 15 °C	kg/m ³	ISO 3675	834,2
Índice de cetano	-	ASTM D4737	49
Punto de inflamación	°C	ASTM D93	60,5
C	-	-	14,2971
H	-	-	27,1368
Relación H/C	-	-	1,9

Tabla 3-2 Propiedades del HVO.

3.3.2 Gasóleo B marino

Este compuesto es el que se emplea actualmente en las Lanchas de Instrucción, así como en otros buques de menor tamaño de la Armada, como lanchas y patrulleros, entre ellos el patrullero “Tabarca” (P-28). Este combustible será objeto de estudio en la L.I. GM Chereguini.

En especial, se ha empleado el compuesto comercializado por Repsol bajo el nombre de “Repsol Mardiesel e+”, formulado específicamente para su aplicación en motores marinos, este combustible es apto para embarcaciones comerciales, recreativas y para la industria naval en su conjunto. Proporciona un desempeño seguro y cumple con las normativas ambientales establecidas para el ámbito marítimo [49].

La fórmula de Repsol Mardiesel e+ incorpora aditivos que mejoran la estabilidad del combustible, protegen contra la oxidación y la corrosión, y mantienen limpio el sistema de inyección del motor. Estas características contribuyen a alargar la vida útil del motor y a mantener su eficiencia operativa. Además, está diseñado para minimizar la formación de espuma durante el repostaje, lo que facilita un llenado más rápido y seguro del depósito [50].



Figura 3-11 Repostaje de Repsol Mardiesel e+ en las Lanchas de Instrucción [51].

Las principales características de este combustible son [52]:

- Mantiene limpio el sistema de alimentación e inyección, evitando la formación de depósitos que puedan afectar al rendimiento del motor.
- Protege las partes metálicas del motor contra la oxidación y la corrosión, prolongando su vida útil y reduciendo los costes de mantenimiento.
- Minimiza la formación de espuma durante el repostaje, facilitando un llenado más rápido y limpio del depósito.
- Garantiza una combustión más suave, mejorando el arranque en frío y reduciendo las emisiones de humos blancos.
- Neutraliza los metales presentes en el combustible que podrían acelerar su oxidación, manteniendo la estabilidad del gasóleo y evitando la formación de residuos que afecten al rendimiento del motor.

Pueden observarse las principales propiedades del combustible en la Tabla 3-3, con los datos obtenidos de los análisis fisicoquímicos realizados para comprobar las alteraciones de las propiedades del combustible tras su estancia en los tanques durante dos meses.

Propiedad	Unidad	Norma	Valor
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	ISO 3675	784,9
Índice de cetano	-	ASTM D4737	90,5
Punto de inflamación	°C	ASTM D93	94,5
C	-	-	15,6584
H	-	-	32,8058
Relación H/C	-	-	2,1

Tabla 3-3 Propiedades del gasóleo B marino.

3.3.3 Análisis de muestras de combustible

Para el análisis de las muestras de combustible, se ha colaborado con Repsol y su laboratorio propio en Madrid “Repsol Technology Lab”. Se enviaron a analizar muestras en el mes de noviembre y posteriormente en enero.

El análisis tras dos meses (véase Anexo III: Análisis comparativo de los combustibles) pone en evidencia la estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas y sus diferencias en términos de rendimiento energético. A lo largo del período analizado, se han medido parámetros clave como la densidad, el poder calorífico, el índice de cetano, el punto de inflamación, la estabilidad a la oxidación y la curva de destilación, lo que permite una evaluación detallada de su comportamiento en almacenamiento y combustión. En el análisis, la empresa denomina al HVO como NEXA, por su nombre comercial y al gasóleo B como GOB.

Uno de los aspectos fundamentales analizados es la densidad a 15°C, donde el gasóleo B mantiene un valor mayor (832,9 kg/m³) en comparación con el HVO (785,0 kg/m³). Esta diferencia es significativa, ya que la densidad influye en la cantidad de energía contenida por unidad de volumen, lo que puede afectar la eficiencia del combustible en ciertas aplicaciones. En cuanto al poder calorífico superior, el gasóleo B presenta un valor de 44,8 MJ/kg, ligeramente inferior a los 46,8 MJ/kg del HVO. Sin embargo, al analizar el poder calorífico inferior, que es más representativo del rendimiento energético en combustión, se observa que el GOB sigue siendo más eficiente en términos volumétricos, con 34,8 MJ/l frente a los 34,1 MJ/l del HVO. Esta diferencia sugiere que el HVO podría tener un consumo ligeramente mayor, estimado en un incremento de alrededor del 2%, aunque otros factores, como la relación H/C, pueden influir y minimizar esta variación.

Otro punto a tener en cuenta es el índice de cetano, el índice de cetano es un indicador clave del comportamiento de ignición del combustible. En este parámetro, el HVO destaca con un valor de 90, muy superior al del gasóleo (49,6). Un índice de cetano más alto implica una combustión más rápida y eficiente, lo que puede traducirse en un arranque más suave del motor y menores emisiones contaminantes. Esta diferencia podría hacer que el HVO sea una opción más favorable en motores que requieren una rápida respuesta a la ignición.

Un aspecto positivo de ambos combustibles es su alta estabilidad a la oxidación. Se han medido los residuos adherentes, filtrables y totales, mostrando valores muy bajos en comparación con el límite de 25 g/m³ establecido por la norma ISO 8217. Tras dos meses, los residuos totales del gasóleo B son de solo 2 g/m³ y los del HVO de 1,5 g/m³, lo que indica una baja tendencia a la formación de sedimentos y productos de degradación. Esto es crucial para evitar problemas de obstrucción en filtros y sistemas de inyección, garantizando un funcionamiento eficiente y prolongado de los motores.

El punto de inflamación es otro parámetro importante para la seguridad en almacenamiento y manejo del combustible. El análisis revela que el HVO mantiene un punto de inflamación elevado de 95,5°C,

mientras que el gasóleo B presenta un valor considerablemente menor, de 60,5°C. Esta diferencia implica que el HVO tiene menor riesgo de inflamabilidad en condiciones normales de almacenamiento, lo que lo hace más seguro en entornos donde se requiera minimizar los riesgos de combustión accidental.

Fuera del análisis de las propiedades, en la Tabla 3-4 se desarrollan las diferencias generales entre el HVO con base de aceite vegetal y el diésel marino convencional, destacando el impacto positivo del HVO en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones contaminantes.

Característica	HVO	Diésel marino
Origen	Renovable. Se obtiene a partir de aceites vegetales	Fósil. Derivado del petróleo crudo refinado
Proceso de producción	Hidrotratamiento (tratamiento con hidrógeno para eliminar oxígeno e impurezas)	Refinación y destilación del petróleo usando aditivos
Composición química	Parafínico, cantidad de azufre casi nula, alta pureza y muy estable	Contiene hidrocarburos aromáticos, azufre y otras impurezas
Emisiones CO ₂	Reduce hasta un 90% las emisiones ya que, gracias a su balance neutro, el CO ₂ emitido ha sido absorbido en su ciclo de vida	Altas emisiones de CO ₂ debido a la combustión del carbono fósil
Emisiones NO _x	Muy pocas ya que su composición es más limpia	Mayores, contribuyendo a la contaminación del aire
Compatibilidad con motores diésel	Compatible y puede usarse puro o mezclado	Combustible estándar en los barcos con motores diésel
Estabilidad en el almacenamiento	Estable, puede almacenarse sin degradación ni formación de sedimentos	Puede degradarse y formar sedimentos en almacenamientos prolongados
Impacto ambiental	Sostenible, reduce la huella de carbono y mejora la calidad del aire	Alto impacto ambiental debido a las emisiones que produce su combustión
Costo	Más caro debido a su leve infraestructura de producción y su menor disponibilidad	Más barato, pero sujeto a fluctuaciones del precio del petróleo

Tabla 3-4 Diferencias entre el combustible HVO y el Diésel marino [53] [21]

Mientras que el HVO se obtiene de fuentes renovables mediante un proceso de hidrotratamiento, el diésel marino proviene de la refinación de petróleo fósil, lo que incrementa su huella de carbono. La composición química del HVO, con una cantidad de azufre casi nula y una estructura parafínica estable, le otorga ventajas significativas, como menores emisiones de CO₂ y NO_x, además de una mayor estabilidad en almacenamiento sin degradación ni formación de sedimentos. En contraste, el diésel marino contiene impurezas como azufre e hidrocarburos aromáticos, lo que contribuye a un alto impacto ambiental y a la contaminación del aire. A pesar de sus beneficios, el HVO sigue enfrentando desafíos, principalmente su costo más elevado y menor disponibilidad, debido a la infraestructura de producción aún en desarrollo. No obstante, su adopción representa un avance clave hacia la transición energética y la reducción de emisiones en el sector del transporte marítimo y terrestre.

3.3.4 Logística

En este punto se tratará cómo la Escuela Naval Militar gestiona el repostaje de las Lanchas de Instrucción y cómo el CUD (Centro Universitario de la Defensa) se ha coordinado con Repsol para recibir el combustible ecológico de la GM Barrutia.

Con la capacidad de 5000 litros de combustible, las Lanchas de Instrucción deben llenar sus tanques al menos dos veces cada cuatrimestre, siguiendo la Instrucción permanente de operaciones número 2202/12 del ALFLOT sobre ahorro y control de combustible para buques en la que se detalla en el punto 3.2 sobre los niveles mínimos de combustible en la mar: *“Para el resto de los buques, el 30% de la capacidad máxima de sus tanques.”* Por lo que las lanchas no podrán bajar de los 1500 litros sin previa autorización (1450 litros en el caso de la L.I. GM Barrutia ya que sólo dispone de 4800 litros de capacidad).

Las lanchas de instrucción utilizan habitualmente gasóleo B marino. Sin embargo, gracias a una colaboración entre el CUD-ENM y Repsol, y con la aprobación de la Armada, Repsol ha donado HVO para que la L.I. GM Barrutia pueda operar con él durante varios meses y se pueda realizar este análisis. El primer repostaje de HVO fue de 4.800 litros el 7 de noviembre de 2024. Posteriormente, se añadieron 3.000 litros el 15 de enero de 2025 y 2.000 litros más el 7 de marzo de 2025.

Actualmente, es el departamento de combustible de Ferrol quien se encarga de solicitar el combustible de las L.L.I.I., sin embargo, para la L.I. GM Barrutia, es el propio CUD-ENM quien gestiona este trámite directamente con Repsol.

3.4 Obtención de consumos y otros datos

Este subapartado mostrará cómo se han obtenido los consumos de combustible de ambas embarcaciones a lo largo del cuatrimestre.

En primer lugar, se han usado las salidas semanales de instrucción de los alumnos para recopilar información relacionada con las millas navegadas, horas de uso del motor, así como combustible consumido, consumo medio y horas de funcionamiento. También se han obtenido datos del parte de máquinas como la temperatura de los refrigerantes, revoluciones por minuto y diversas presiones, con el propósito de observar si el funcionamiento de los motores durante la salida ha sido el idóneo y poder percibir algún problema o incidencia que pudiera haber ocurrido.

Para cada salida se rellena el documento que aparecen en el Anexo IV: Plantilla recogida de datos de cada navegación de las L.L.I.I. con los datos que aporta el propio motor desde las pantallas de puente. Con esos datos se desarrollan los resultados, permitiendo comparar los consumos de forma gráfica.

Se han recogido datos desde el 4 de febrero de 2025 hasta el 15 de marzo del mismo año, quedando cubiertas 10 salidas semanales, entre las que destacan 3 pernóctas. También se han analizado las salidas durante la semana I+A, pero dada su diferencia en cuanto a duración, ejercicios realizados y millas navegadas, se analizan de forma separada.

3.5 Medición de gases

En este apartado, se describirán los procedimientos que se han llevado a cabo para realizar las mediciones de las emisiones de gases de combustión de cada una de las lanchas de instrucción, empleando el Testo 340 ya mencionado en el apartado 3.2.2.

Desde el inicio de este proyecto, se ha llevado a cabo un seguimiento detallado de las L.L.I.I., con especial atención a la GM Barrutia y la GM Chereguini, que servirán como plataformas de análisis. En cada salida, se han registrado datos clave como la duración, la velocidad media, la distancia recorrida y el consumo de combustible. Gracias a esta información, ha sido posible realizar un análisis gráfico del consumo de cada lancha desde distintas perspectivas.

Las mediciones de los gases de combustión se han llevado a cabo en el colector de gases de escape, como se puede observar en la Figura 3-12, el orificio se encuentra taponado por un tornillo el cual se debe quitar a la hora de introducir la sonda, esta no debe llegar a tocar la pared interior del tubo y también se debe ajustar la pieza cónica metálica de forma que tapone el hueco restante del orificio, evitando así la salida de gases y entrada de aire del exterior.



Figura 3-12 Orificio en el codo de gases de escape (4N-4967) con la sonda del equipo introducida (fuente propia).

Las tomas de registro se encontraban taponadas y el personal del núcleo de lanchas no fue capaz de desenroscarlo, fue necesario llamar al personal de Talleres Piñeiro, la empresa encargada del mantenimiento de los motores de las Lanchas de Instrucción, que sacó los tornillos de ambas lanchas, sustituyéndolos por unos de rosca NPTF ½-14 (media pulgada) que funcionaran correctamente.

Para realizar las mediciones en un entorno más fiable, se ha necesitado la colaboración del núcleo de lanchas y el Jefe de Adiestramiento a Flote y coordinar unas salidas específicas para la toma de datos. En estas salidas se ha controlado la situación de la embarcación con la app “GeoTracker” que provee de una visualización de la derrota que se ha llevado a cabo y datos como la velocidad media, distancia recorrida y tiempo empleado.

Se han realizado mediciones tanto en la GM Barrutia como en la GM Chereguini, buscando unas condiciones meteorológicas lo más similares posibles con el fin de que estas no afecten a la comparación de los datos obtenidos.

Para el tratamiento de estos datos, el propio analizador dispone de un software de pago, pero dado su coste y la existencia de alternativas más económicas, se ha llevado a cabo el estudio usando el software Microsoft Excel.

En el caso de la GM Barrutia, ha habido complicaciones para poder retirar el tornillo que tapaba el orificio para la introducir la sonda, llegando incluso a tener que acudir en varias ocasiones el personal civil encargado del mantenimiento de los motores de las Lanchas de Instrucción.

3.5.1 Medición en GM Barrutia

El 10 de febrero de 2025 se realizó una salida a la mar con el propósito de medir los gases en la Lancha de Instrucción GM Barrutia. Las condiciones meteorológicas no influyeron en el proceso de medición. Predominaba un viento del norte de 5,8 nudos (viento flojito en la escala de Beaufort), con cielos parcialmente nublados, buena visibilidad y ausencia de precipitaciones. La altura de las olas oscilaba entre 0 y 0,25 metros, correspondiente a mar rizada según la escala de Douglas. Cabe destacar que la salida se efectuó a las 11:41 en llenante, con la siguiente pleamar prevista para las 15:00.

La salida se llevó a cabo en la Ría de Pontevedra siguiendo la derrota que aparece en Figura 3-13 manteniendo una vigilancia activa sobre los posibles peligros a la navegación y contactos que pudieran aparecer. A lo largo de la navegación se efectuaron los cambios de régimen de revoluciones necesarios para la toma de datos.

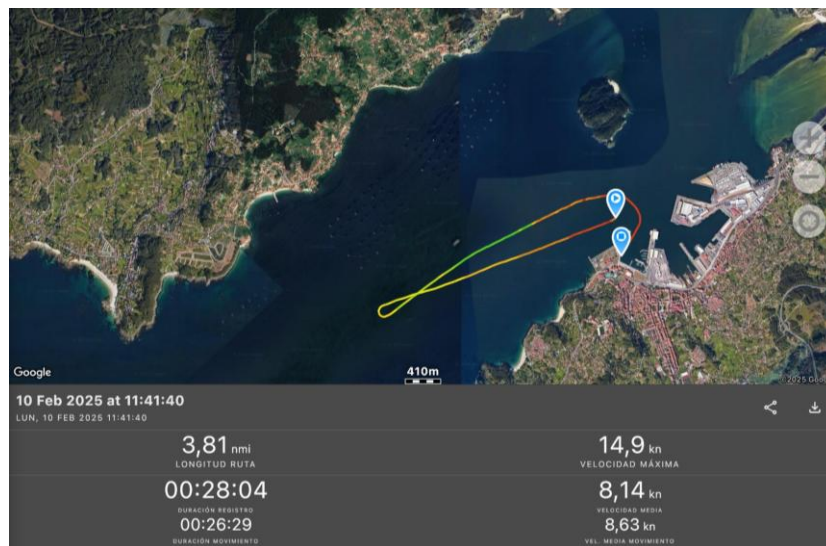


Figura 3-13 Derrota y datos de navegación salida 10 de febrero (app GeoTracker).

El procedimiento adoptado fue salir del puerto de Marín a mínima velocidad de gobierno (600 rpm) y cuando nos encontrásemos fuera de peligro y sin ninguna dificultad para maniobrar libremente, poner rumbo suroeste. Se opta por analizar el rango de revoluciones habitualmente utilizado en las salidas, tomando medidas desde las 600 hasta el 1600 rpm, de 200 en 200, teniendo en cuenta que 600 rpm ofrece la velocidad mínima de gobierno. La salida dura 28 minutos recorriéndose un total de 3,81 millas náuticas con una velocidad máxima de 14,9 nudos y una media de 8,14 nudos.

La toma de datos se lleva a cabo en la cámara de máquinas como se ha mencionado en el apartado anterior. Como se puede apreciar en la Figura 3-14, el Testo 340 permite visualizar de forma constante los datos de emisiones de gases, debiendo el usuario pulsar el botón de guardar para quedar estos registrados en el dispositivo.



Figura 3-14 Disposición del equipo para la toma de datos (fuente propia).

Durante la salida se realizan varias medidas al mismo régimen con el fin de obtener un valor medio que se aproxime lo más posible al real, mientras también se tenía apuntado el régimen de máquinas en ese instante para su posterior correlación.

No se observaron complicaciones, pero sí cabe reseñar que, a partir del 1000 rpm, era necesario sujetar la sonda puesto que la propia fuerza a la que salían los gases de escape desplazaba esta fuera de la tubería dejando espacio libre en el orificio de entrada.

3.5.2 Medición en GM Chereguini

El 28 de febrero de 2025 se realiza la salida a bordo de la L.I GM Chereguini, de forma análoga a la realizada con la GM Barrutia, pero en este caso se aprovecha la mayor ventana horaria y se realizan mediciones tanto al llegar a las 1600 rpm como al bajar de nuevo a 600 rpm, pudiendo así obtener valores de los gases de escape cuando el motor reduce la velocidad de los ejes.

Las condiciones meteorológicas fueron similares a las reinantes en la salida con la GM Barrutia, con un viento de 6,5 nudos del noreste (flojo en la escala de Beaufort), cielo despejado, buena visibilidad y sin precipitaciones. Había una altura de ola de 0,2 a 0,5m correspondiente a mar marejadilla. La salida se efectuó a las 11:38 en llenante con la próxima pleamar a las 14:49.

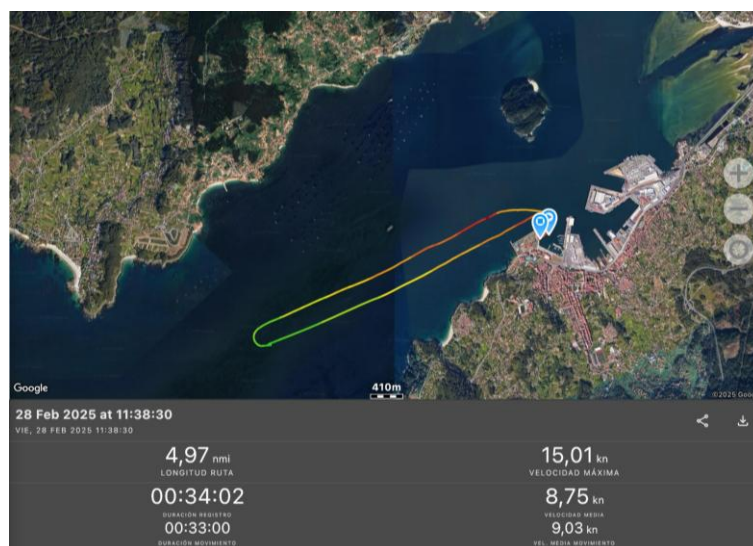


Figura 3-15 Derrota y datos de navegación salida 28 de febrero (app GeoTracker).

Las mediciones se llevaron a cabo de igual manera que la salida anterior, con la excepción de tomar más medidas es este caso, es por ello por lo que se recorrieron 4,97 millas náuticas a una velocidad media de 8,75 nudos y una duración de 34 minutos.

Las cámaras de máquinas son prácticamente idénticas por lo que el método de medición es exactamente igual al llevado a cabo en la GM Barrutia, sacando el tornillo de la tubería de escape e introduciendo la sonda del equipo.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis del consumo de combustible

A lo largo de este capítulo se analizarán los consumos obtenidos y se mostrará un análisis de los datos recabados sobre el funcionamiento del motor de la L.I. GM Barrutia y la L.I. GM Chereguini, comparando cómo varía el consumo de combustible en función del compuesto que cada una lleva. Como se ha mencionado anteriormente, se ha utilizado el software Microsoft Excel en la mayoría de los casos, analizando las gráficas de distinta índole, obtenidas desde el propio software.

En la toma de datos, no sólo se han obtenido datos de consumo, distancia navegada y tiempo, también se ha recogido en el parte de máquinas de cada salida valores como las presiones del aceite del motor a lo largo de cada salida, las temperaturas del agua de refrigeración y aceite reductor de cada motor y el combustible restante en los tanques, aunque este último dato no se ha tenido en cuenta ya que el propio motor, desde las pantallas de puente nos da información del combustible consumido y para los alumnos, el nivel que tienen los tanques (véase Figura 3-6) no es nada preciso.

Los valores de presiones y temperaturas han permanecido muy similares en los dos compuestos durante el tiempo de análisis, por ello que no se han obtenido conclusiones reseñables de ellos, se han utilizado para observar si en algún momento de las salidas ha habido alguna anomalía con el funcionamiento del motor.

4.1.1 Datos específicos del motor de estribor de la L.I. GM Barrutia

Este apartado analiza los datos obtenidos del motor durante una salida a la mar que tuvo lugar el 27 de noviembre del año 2024 con la empresa “Talleres Piñeiro” a bordo. Esta empresa es la encargada de llevar el mantenimiento de los motores de las Lanchas de Instrucción.

Para la salida, la empresa local aportó un equipo de diálisis que conectaron al propio motor para obtener todos los datos internos de él como la carga de trabajo, presión, temperatura del refrigerante, consumo de combustible en litro por hora, revoluciones por minuto, duración de la inyección de combustible, presión de combustible entre otros muchos. De todos estos parámetros se han escogido los más significativos para exponer de manera visual el trabajo del motor y el combustible HVO.

La salida tuvo una duración de 1h y 13 minutos, toda la navegación se desarrolló por la Ría de Pontevedra, llegando a la altura de Bueu. Se recorrió un total de 8,46 millas náuticas, lo que significa que la velocidad media fue de 6,9 nudos.

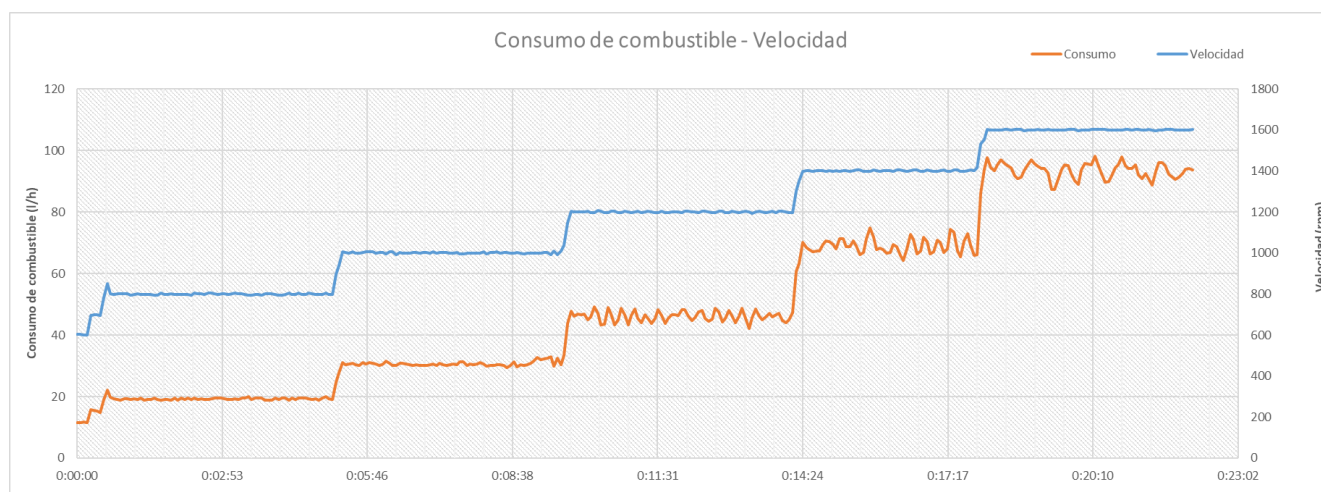


Figura 4-1 Comparación consumo de combustible y revoluciones por minuto en función del tiempo transcurrido.

En primer lugar, en la Figura 4-1 se puede observar la relación existente entre el consumo en litros por hora y las revoluciones por minuto del eje. Gracias a la representación de ambos aspectos respecto al tiempo transcurrido podemos asociar un régimen de revoluciones a un consumo en litros por hora estimado. La relación está influenciada por las condiciones meteorológicas que había durante la navegación. Como resultado obtendríamos los datos que aparecen en la Tabla 4-1.

Revoluciones por minuto (rpm)	Consumo en litros por hora (l/h)	Aumento de consumo (%)
600	11,62	-
800	19,54	68,12
1000	30,08	53,94
1200	46,04	53,09
1400	68,85	49,56
1600	93,42	35,65

Tabla 4-1 Relación revoluciones por minuto y consumo de combustible.

En la Tabla 4-1 se aprecia que el salto de consumo en cuando al consumo anterior se produce a bajas revoluciones, pero en cuando a la cantidad de combustible, la mayor diferencia se produce a partir de las 1200. Esto significaría que el régimen de revoluciones idóneo para que el consumo de HVO no se dispare es entre las 800 y las 1200 rpm.

Gracias a los datos obtenidos por el equipo que operaron los mecánicos, se han podido relacionar algunos regímenes de revoluciones con velocidades en nudos (véase Figura 4-2), este dato sirve para que los alumnos puedan tener una visión más acertada de qué supone navegar a ese régimen de revoluciones.

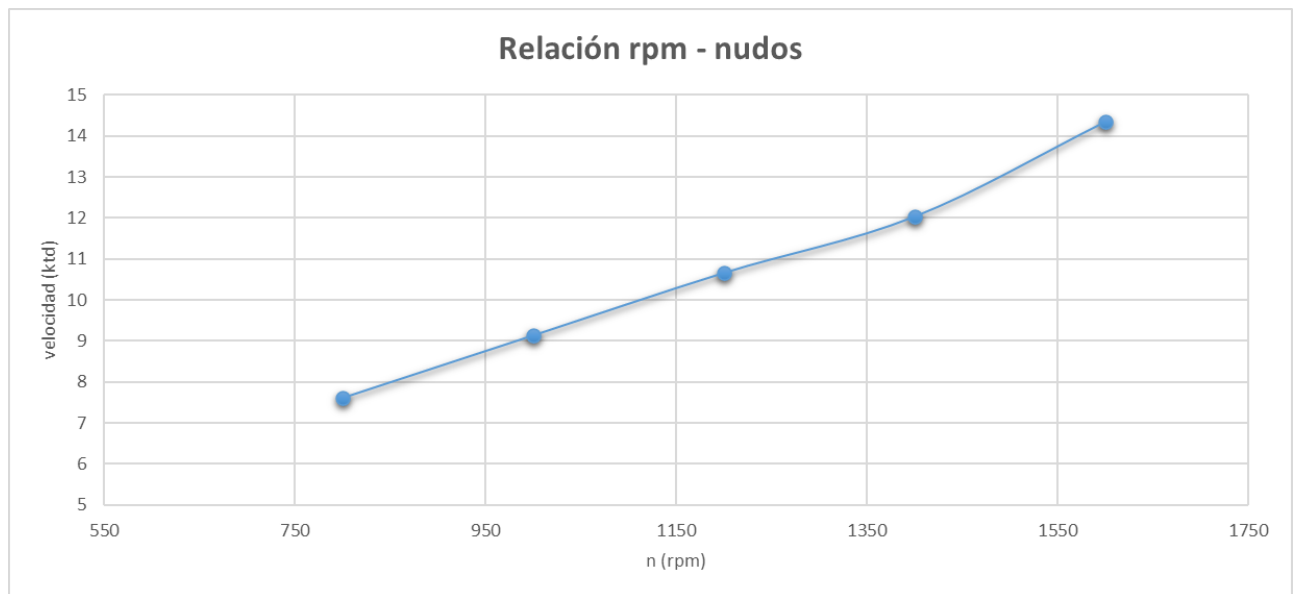


Figura 4-2 Gráfico donde se relaciona el régimen de revoluciones con la velocidad en nudos.

Sería necesario realizar el mismo análisis del motor con la L.I. GM Chereguini, bajo unas condiciones meteorológicas similares a las pruebas realizadas con la L.I. GM Barrutia. Estos datos podrían ser comparados y el resultado obtenido pondría en prueba si el HVO tiene un consumo más eficiente o, por el contrario, el consumo es superior al del gasóleo B.

4.1.2 Análisis del consumo durante las salidas semanales

En esta sección se comparan los consumos de las lanchas obtenidos durante todas las salidas del mes de febrero, también se hará una comparación entre los mismos. A lo largo cada semana, las Lanchas de Instrucción realizan salidas a la mar para el adiestramiento de los futuros oficiales, estos se dividen en rotaciones (cada una sale un día de la semana) y a su vez en dotaciones (formando el equipo de navegación y maniobra de cada embarcación).

Durante todo el cuatrimestre se han tomado datos de 10 de las 16 salidas a la mar que han llevado a cabo las Lanchas de Instrucción, siendo 3 de ellas pernóctas. Las pernóctas son salidas efectuadas los viernes por la tarde y consisten en un tránsito a otra ría, pernócta en ella y de nuevo tránsito a la Escuela Naval Militar durante la mañana del siguiente día, a lo largo de la navegación se realizan ejercicios tanto diurnos como nocturnos.

En la Figura 4-3 se muestra el gasto acumulado de combustible de las Lanchas de Instrucción durante las salidas analizadas, en ella se puede observar cómo la L.I. GM Chereguini ha consumido un total de 2545 litros de gasóleo B, mientras que la L.I. GM Barrutia ha consumido 40 litros menos, 2505, lo que equivale a un para obtener una mejor impresión del consumo, se procede a desglosar este en función de la salida.

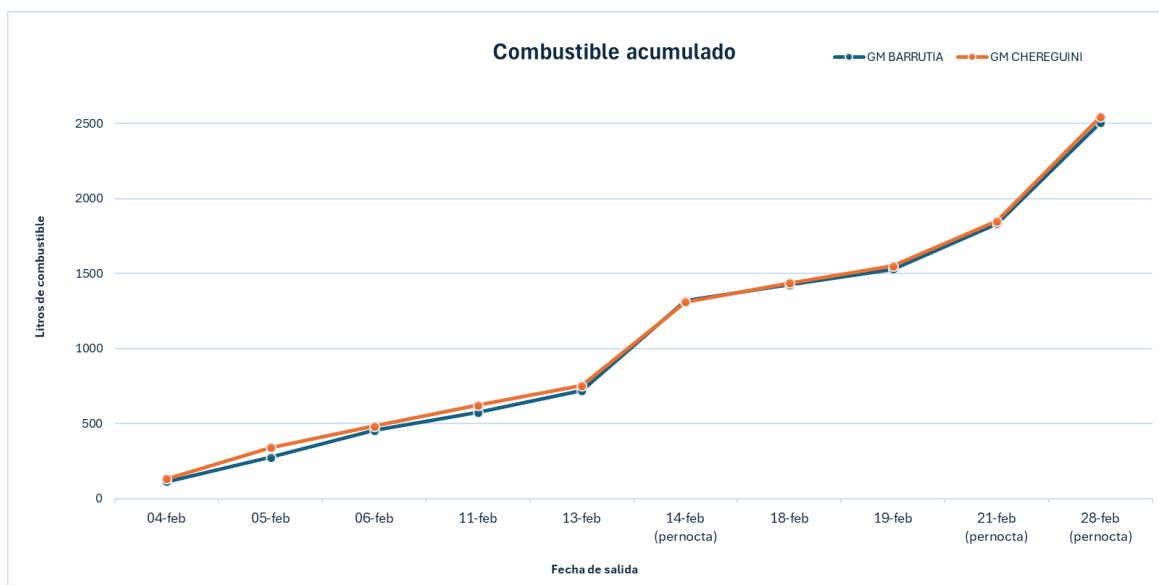


Figura 4-3 Combustible acumulado durante el cuatrimestre por las Lanchas de Instrucción.

En la Figura 4-4 se observa el gasto de combustible de las dos Lanchas de Instrucción, viéndose que la L.I. GM Barrutia tiene un menor consumo en la mayoría de las salidas, aquellas en las que ambas lanchas consumen más combustible son las pernoctas, en ellas se observa que es la L.I. GM Barrutia la que más consume, pudiendo implicar esto que el HVO consume más en navegaciones largas. También se visualiza un cambio de tendencia en los días 6 y 13 de febrero.

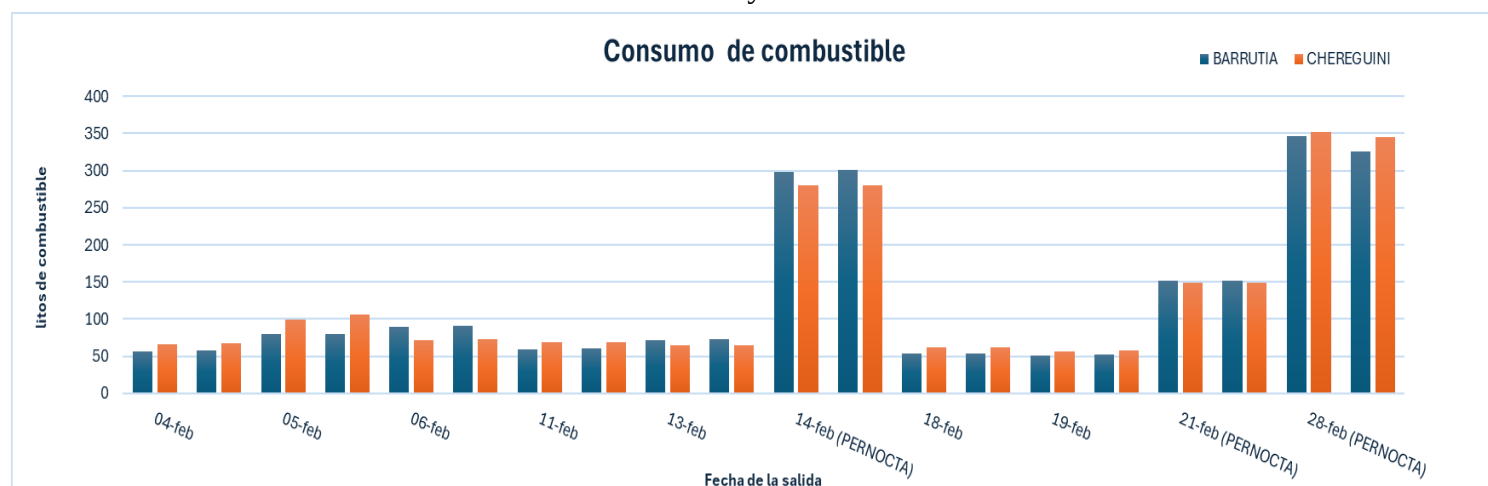


Figura 4-4 Gasto de combustible de las Lanchas de Instrucción durante las salidas semanales.

A lo largo del curso sólo se llevan a cabo 6 pernoctas, 1 por cada cuatrimestre para cada rotación, por lo que ese consumo superior de la L.I. GM Barrutia, no se apreciaría, sino que, en el cómputo anual, continuaría consumiendo menos combustible.

Las variaciones de tendencia de los días 6 y 13 de febrero han sido investigadas, preguntando a las dotaciones involucradas y al personal del núcleo de lanchas por lo ocurrido durante la salida. Resulta que el día 6 de febrero la L.I. GM Barrutia realizó ejercicios en los cuales maniobraba con el uso de máquinas, simulando que no tenía control sobre el timón de la embarcación, aumentando la carga del motor considerablemente.

En cuanto al día 13 de febrero, se observa también que la L.I. GM Barrutia consumió mayor combustible de lo normal, superando al de la L.I. GM Chereguini, esto se debe a que tuvo que volver desde las inmediaciones de Bueu hasta la Escuela Naval Militar, unas 5 millas náuticas, a 1500 revoluciones por minuto, un régimen que gasta alrededor de 80 l/h como se puede ver en la Tabla 4-1.

En la Tabla 4-2 se puede apreciar tanto la distancia recorrida en cada una de las salidas como la duración de esta de cada Lancha de Instrucción. Utilizando también la cantidad de combustible gastada, se pueden obtener los sucesivos consumos en litros por milla navegada, pudiendo comparar así, la eficiencia de ambos compuestos.

	Fecha	Distancia navegada (mn)	Duración (h)
L.I. GM BARRUTIA	4 febrero	16	2,7
	5 febrero	21	2,26
	6 febrero	14	2,38
	11 febrero	16	2,2
	13 febrero	14	1,88
	14 febrero (pernocta)	39	7,73
	18 febrero	12	2,13
	19 febrero	13	2,63
	21 febrero (pernocta)	37	5,5
	28 febrero (pernocta)	65	6,92
L.I. GM CHEREGUINI	4 febrero	18	2,52
	5 febrero	23	2,6
	6 febrero	11	2,7
	11 febrero	16	2,18
	13 febrero	11	2,17
	14 febrero (pernocta)	37	7,48
	18 febrero	13	2,37
	19 febrero	12	2,5
	21 febrero (pernocta)	45	6,2
	28 febrero (pernocta)	18	2,52

Tabla 4-2 Distancia navegada y duración de cada salida de las Lanchas de Instrucción GM Barrutia y GM Chereguini.

Una vez mostradas las millas náuticas navegadas en cada salida, es importante analizar el consumo en litros por milla navegada (véase Figura 4-5), pudiendo ver qué compuesto tiene una mayor eficiencia una vez observado que en navegaciones cortas, la L.I. GM Barrutia parece consumir menos combustible.

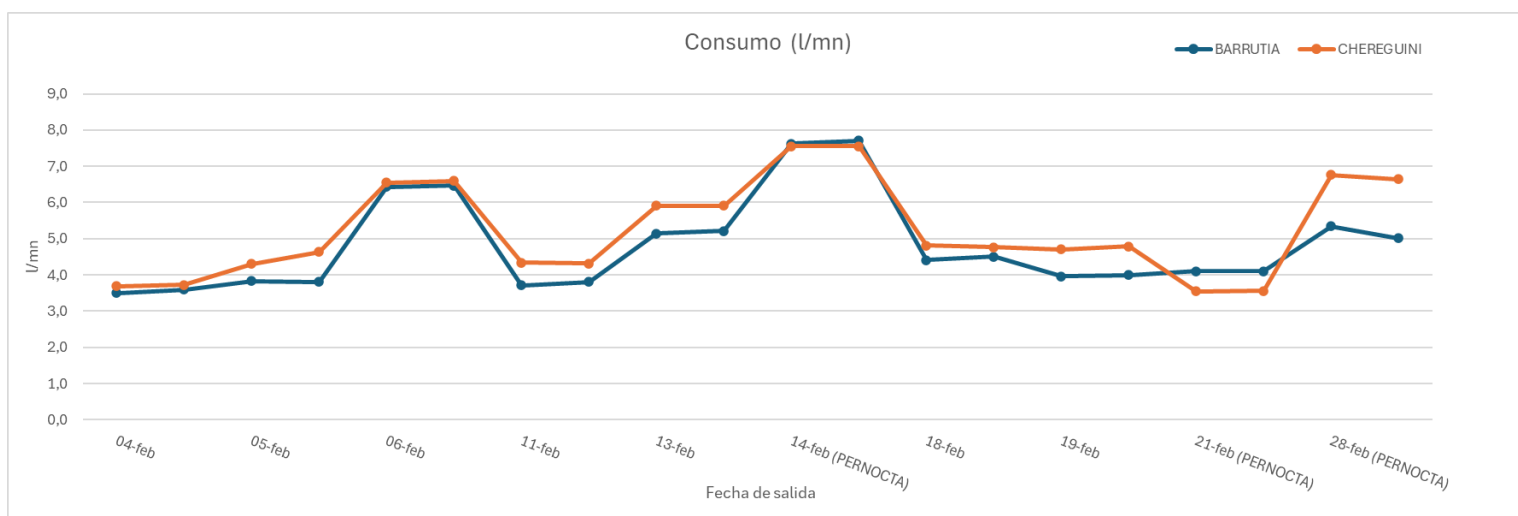


Figura 4-5 Consumo en litros por milla de las Lanchas de Instrucción durante las salidas semanales.

Como se ha mencionado, se observa cómo durante todas las salidas semanales el consumo de gasóleo B es mayor que el del HVO, contando con las excepciones de las pernoctas donde varía este hecho y las salidas de los días 6 y 13 de febrero como se ha mencionado anteriormente.

Si no se tuvieran en cuenta las pernoctas, la L.I. GM Barrutia habría consumido un total de 930,5 litros de HVO, 60 litros menos que la L.I. GM Chereguini, que ha consumido 990,5 litros. Si esto ha ocurrido en 7 de las 10 salidas analizadas, a lo largo del cuatrimestre, sólo en salidas cortas, se habrían ahorrado un total de 112 litros de combustible, teniendo en cuenta la media de ahorro por salida y extrapolándolo a las salidas no analizadas, suponiendo que el régimen de máquinas de las embarcaciones ha sido similar.

En el segundo cuatrimestre, hasta el mes de marzo sin incluir la semana I+A, se consumirían 112 litros menos de combustible, aun faltando 12 salidas en los meses de marzo y abril, daría un total de 214,85 litros de combustible de HVO menos que gasóleo B. En el primer cuatrimestre, se llevaron a cabo alrededor de 27 salidas, por lo que si se supone el mismo régimen de maniobra que han tenido las L.L.I.I. durante el tiempo analizado, se habrían consumido 231,5 litros de HVO menos que de gasóleo B.

Por lo tanto, sólo en salidas semanales cortas, el uso de HVO en la L.I. GM Barrutia habrá ahorrado un total aproximado de 446 litros de combustible durante el curso. En el apartado 4.3 se tratarán los beneficios o pérdidas económicas al usar HVO.

4.1.3 Comparación de consumos durante la semana de instrucción y adiestramiento

En este apartado se tratarán los datos de consumo de combustible de las Lanchas de Instrucción durante la semana de I+A (Instrucción y Adiestramiento) que ha tenido lugar desde el 10 de marzo de 2025 hasta el 15 del mismo mes. A lo largo de la semana se han recogido datos procedentes de los propios motores y el cuaderno de bitácora (crónica y parte de máquinas).

Las salidas a la mar han consistido en una navegación por la ría de Pontevedra, realizando en ella los ejercicios pertinentes, un posterior tránsito a la ría de Vigo y pernocta en el mismo lugar, y a la mañana siguiente salida de la ría de Vigo, tránsito hasta la de Pontevedra y entrada en la Escuela Naval Militar. De nuevo, los alumnos son agrupados en rotaciones para efectuar la navegación unos días

específicos, siendo la primera la rotación A que salió los lunes y martes, posteriormente la rotación B el miércoles y jueves y, por último, la rotación C el viernes y sábado.

En la Figura 4-6 se observa el combustible consumido acumulado por cada una de las Lanchas de Instrucción, destacando que la GM Chereguini ha consumido ligeramente más combustible que la GM Barrutia. En el cómputo total, consume unos 67 litros más, estos datos deben verse con la perspectiva de las actividades que han llevado a cabo, las horas de navegación, velocidad media y distancia recorrida, datos disponibles en el Anexo V: Datos de consumo durante la semana de I+A.

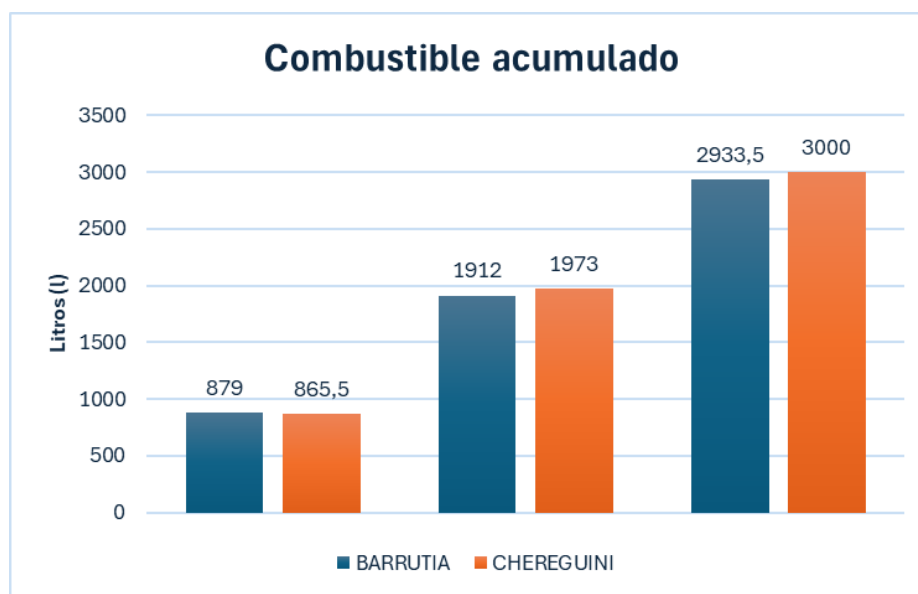


Figura 4-6 Gráfico de combustible consumido acumulado durante la semana I+A.

Para contextualizar los datos, en la Tabla 4-3 se pueden apreciar las distancias recorridas por cada una de las Lanchas de Instrucción, así como, datos sobre la velocidad media que se ha llevado y la duración de cada navegación. Se observa que la L.I. GM Chereguini ha navegado más distancia con un total de 293 millas náuticas, 30 más que las recorridas por la L.I. GM Barrutia, esto se debe a los ejercicios realizados o los requerimientos en la instrucción de las dotaciones de cada una de las lanchas.

Rotación	Distancia recorrida (mn)	Duración (h)	Velocidad media (kts)
A (BAR)	93	15	7,25
B (BAR)	84	14,95	5,67
C (BAR)	86	14	6,77
A (CHE)	90	14,1	7
B (CHE)	106	14,45	6,8
C (CHE)	97	17,4	6,26

Tabla 4-3 Datos de las salidas de I+A Lanchas de Instrucción GM Barrutia y GM Chereguini.

Otra forma de relacionar los consumos es tratando los litros de combustible consumidos en función de las millas náuticas recorridas. Como se puede apreciar en la Figura 4-7, hasta las 100 millas náuticas navegadas, el consumo es muy parejo, pero a partir de esa distancia, la L.I. GM Barrutia y tiene un mayor consumo, lo que implica que, a mayor distancia navegada y mayor duración de la salida, el consumo de HVO es ligeramente mayor que el del diésel convencional.

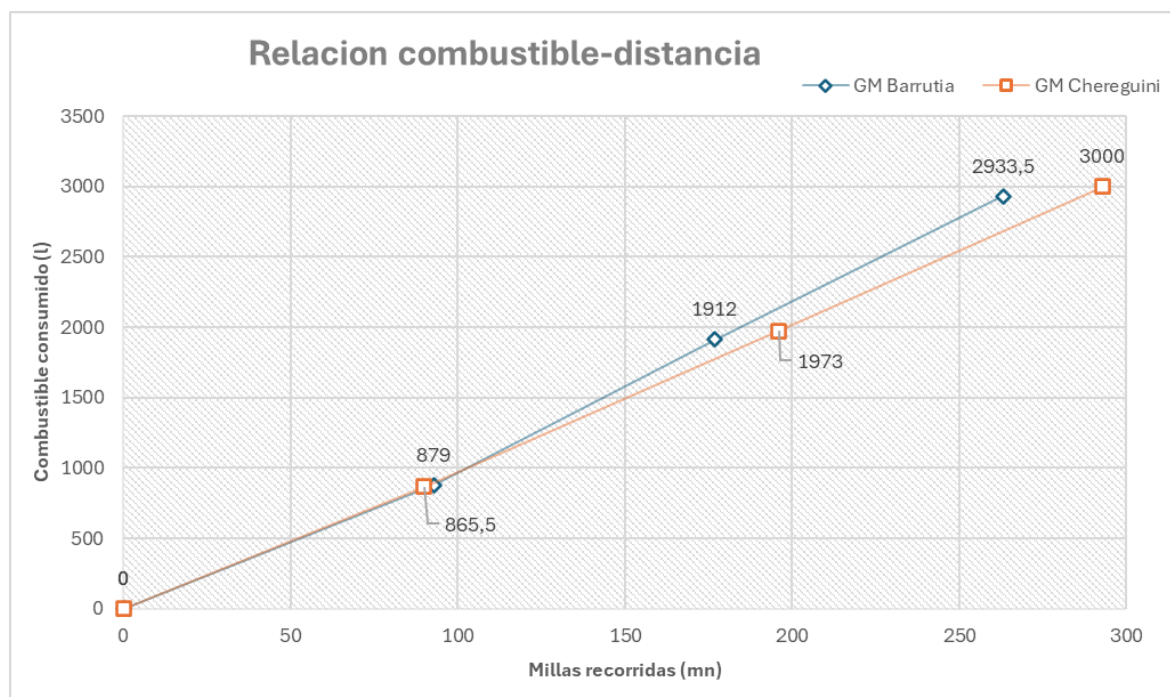


Figura 4-7 Gráfico de combustible consumido acumulado y distancia recorrida de las durante la semana I+A.

De normal general, las salidas usuales de las Lanchas de Instrucción no se demoran más de 3 o 4 horas y recorren unas 20 millas náuticas de media, siempre dependiendo de los ejercicios y necesidad de instrucción del alumnado. Si nos fijamos de nuevo en la Figura 4-7 y nos vamos al eje de abscisa y tomamos una perpendicular en las 20 millas navegadas, observamos que el consumo es similar, pero esto se debe a que al trabajar durante largos periodos de tiempo y por lo tanto recorrer bastante distancia, los consumos a poca distancia se ven muy parejos. Es más eficiente fijarse en la Figura 4-8.

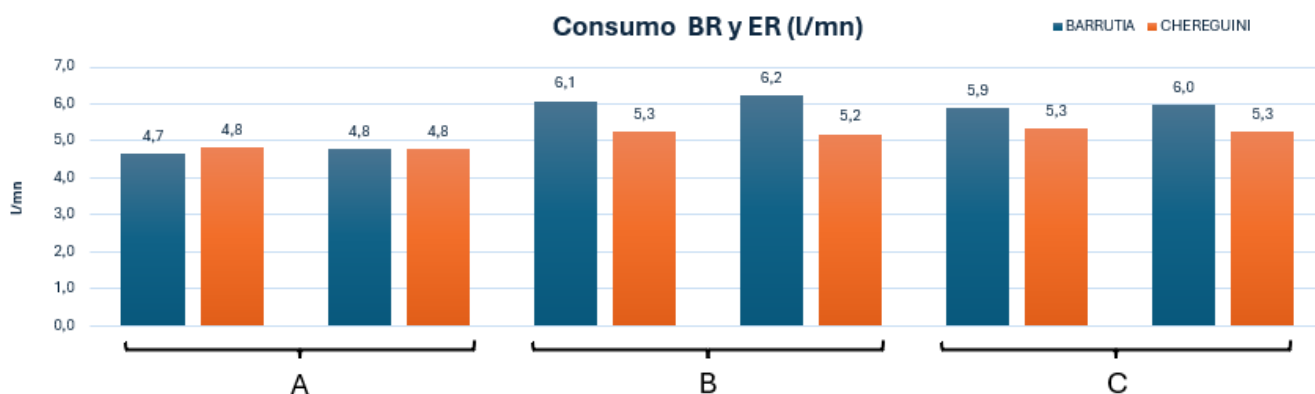


Figura 4-8 Gráfico de consumo de combustible por cada salida en l/mn.

En la Figura 4-9 se observa el consumo en litros por hora de las embarcaciones durante las salidas, mostrándose datos tanto del motor de babor como el de estribor. Se puede observar cómo la GM Barrutia con el HVO tiene un consumo ligeramente inferior, sin embargo, en la salida de la rotación C se observa un cambio en esta tendencia, la GM Barrutia consume más que ningún día, mientras que la GM Chereguini consume menos que en el resto de las ocasiones. Esta diferencia ha sido preguntada a la dotación de ese día y han afirmado que se debe a que las maniobras realizadas por la L.I. GM Barrutia requerían de mayor velocidad de evolución, un aumento significativo de la carga al motor, pero no prolongado en el tiempo, aumentando el consumo sin variar apenas la velocidad media de la salida.

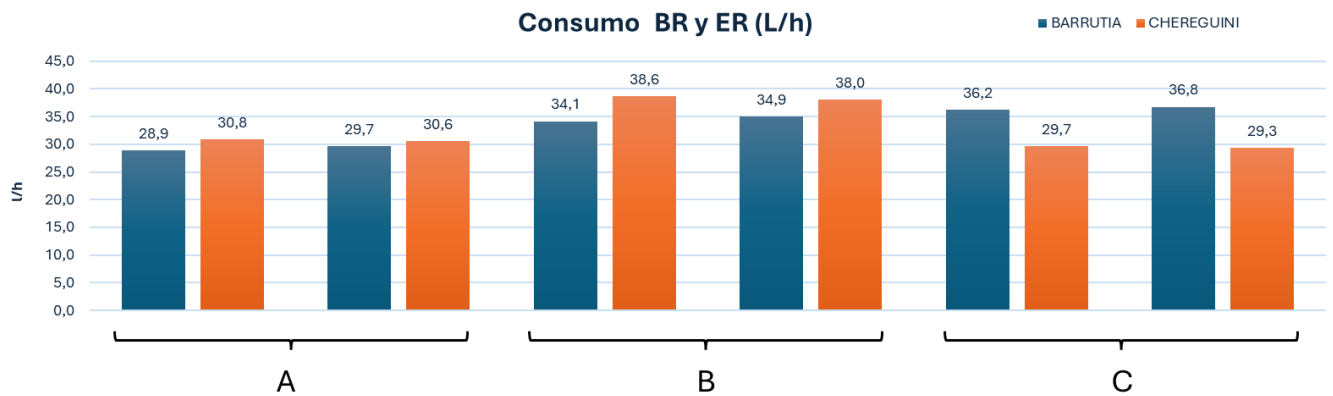


Figura 4-9 Consumo de las L.L.I.I. en L/h durante la semana I+A.

4.2 Análisis de las emisiones de los gases de escape

En este apartado se van a mostrar los datos conseguidos con el analizador de gases de combustión en ambas lanchas y posteriormente se presentarán unos gráficos que permitan observar de manera sencilla la diferencia de contaminantes entre ambas lanchas.

4.2.1 Emisiones GM Chereguini

En la salida del día 28 de febrero (véase 3.5.2) se toman datos de las emisiones de combustible desde las 600 hasta las 1600 rpm y también de nuevo hasta las 600 rpm, para ver los efectos que pudieran aparecer al encontrarse el motor en enfriamiento.

Revoluciones por minuto (rpm)	T. ^a de gases (°C)	T. ^a ambiente (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO _x (ppm)
600	124,76	19,7	16,71	103	3,16	1032	1084
800	171,52	19,58	15,108	99	4,336	1277	1341
1000	235,48	19,84	13,62	107	5,44	1217	1278
1200	306,56	20,78	11,80	98	6,788	1289	1354
1400	380,975	20,775	10,44	105	7,7775	1217	1278
1600	401,83	21,1	9,96	96	8,14	1247	1309
1400	380,68	20,98	10,544	81	7,714	1232	1294
1200	320,8	21,38	11,976	71	6,656	1341	1408
1000	251,64	21,3	13,964	80	5,188	1196	1256
800	194,44	21,28	15,666	65	3,932	1202	1262
600	147,175	21,2	17,2925	67	2,73	942	989

Tabla 4-4 Datos obtenidos del analizador de gases según el régimen de revoluciones en la L.I. GM Chereguini (elaboración propia).

En la Tabla 4-4 se muestran las mediciones promedio de las tomadas en cada uno de los regímenes de revoluciones del motor. Se obtienen la temperatura de los gases de escape, así como la temperatura de la cámara de máquinas en el momento de la toma de datos (temperatura ambiente) observándose la

relación entre ellas. También se observa la proporción de oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂) en tanto por ciento y, por último, las cantidades de monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO) y otros óxidos de nitrógeno (NO_x).

4.2.2 Emisiones GM Barrutia

El 10 de febrero se lleva a cabo una salida a la mar a bordo de la L.I. GM Barrutia (véase 3.5.1), en ella se procede de a la toma de datos desde las 600 rpm hasta las 1600 rpm de 200 en 200 rpm, por razones de tiempo se procede a la entrada en la escuela antes de poder medir también las emisiones de gases con el motor en enfriamiento. Se obtienen los siguientes datos promedio:

Revoluciones por minuto (rpm)	T. ^a de gases (°C)	T. ^a ambiente (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO _x (ppm)
600	135,2	19,75	16,33	50	3,44	1111	1166
800	181,7	19,75	14,92	66	4,49	1086	1140
1000	241,3	19,9	13,3	65	5,7	1223	1284
1200	308,3	20,3	11,6	84	7,0	1289	1354
1400	373,3	21,0	10,1	121	8,0	1136	1193
1600	400,5	21,3	9,6	114	8,4	1150	1208

Tabla 4-5 Datos obtenidos del analizador de gases según el régimen de revoluciones en la L.I. GM Barrutia (elaboración propia).

De nuevo los datos que aparecen en la Tabla 4-5 son los mismo que en el apartado anterior, pero con los valores producidos por el HVO.

Las diferencias que se observan son tratadas en el siguiente apartado.

4.2.3 Evaluación comparativa de emisiones

En este apartado se llevará a cabo la comparación de los datos de emisiones obtenidos, desde distintas perspectivas como la temperatura de los gases, la eficiencia de la combustión, el índice de carbono y los óxidos de nitrógeno expulsados por el motor.

En cuanto a la temperatura de los gases de escape, como se puede apreciar en Figura 4-10, el HVO presenta una mayor temperatura a bajas revoluciones, cambiando esta tendencia a partir de las 1200 rpm, donde es el gasóleo B el que produce gases a mayor temperatura, pero la diferencia es mínima. Una mayor o menor temperatura de gases de escape puede ser implicar tantos aspectos positivos como negativos.

Si, por ejemplo, un motor expulsa gases a mayor temperatura que otro, esto puede ser debido a un mayor consumo, una mayor carga del motor, una obstrucción en el sistema de escape o un desgaste de los componentes internos. Sin embargo, el caso contrario, puede implicar una combustión incompleta, una inyección de combustible defectuosa o fugas en el sistema de escape.

Sería necesario realizar un estudio más minucioso de las temperaturas relacionando este con el caudal de combustible y aire que entra en el motor. Lo que se puede discernir de esta gráfica (Figura 4-10) es que el HVO producirá un aumento de la temperatura ambiente superior al que produce el gasóleo B, como se puede observar en la Tabla 4-4 y Tabla 4-5, el gasóleo B produce un aumento de 1,4 °C mientras que el HVO aumenta la temperatura ambiente en 1,55 °C, este aumento es apenas significativo y no implica peligro alguno al régimen que trabajan las Lanchas de Instrucción.

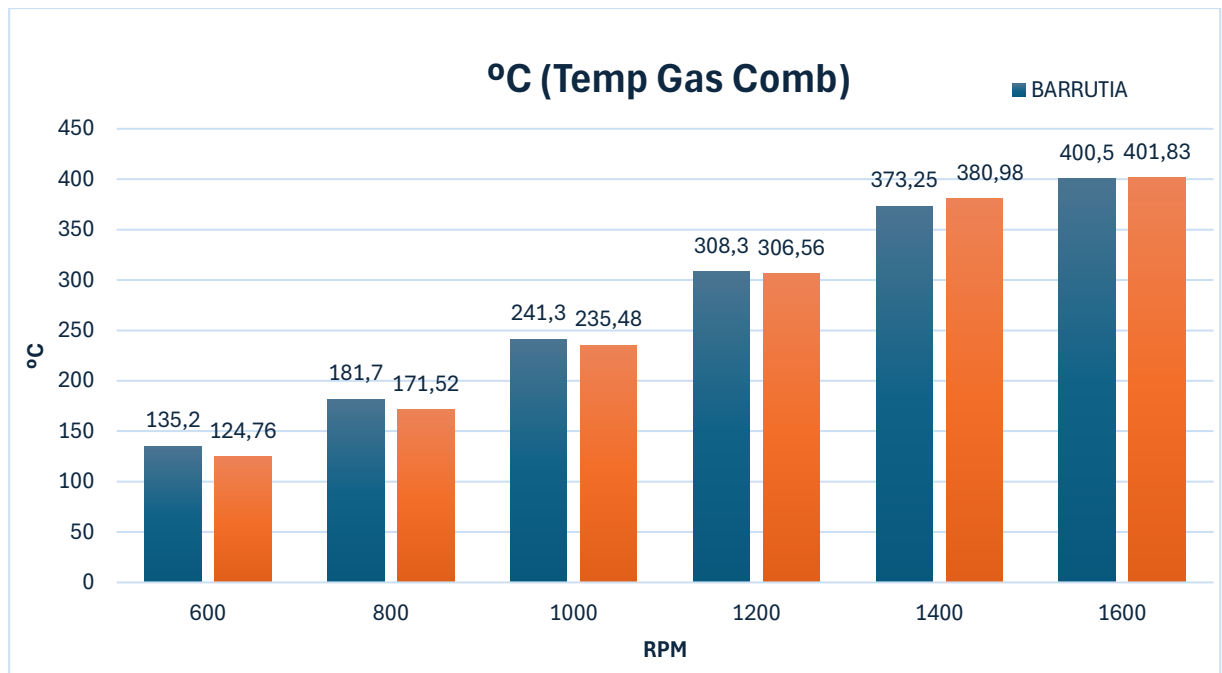


Figura 4-10 Gráfico comparativo de las temperaturas de los gases de escape.

Respecto al % de O_2 (véase Figura 4-11) se observa que la GM Chereguini emite un mayor % de O_2 al exterior, esto puede implicar que se está llevando a cabo una combustión más completa con menos oxígeno desperdiciado. En defensa del HVO cabe decir que sería necesario un estudio de la necesidad de oxígeno para la combustión de este compuesto, regulando así la entrada de aire de O_2 al motor. Estas emisiones no afectan a la contaminación, sino que indican que el gasto de oxígeno que se produce en la GM Barrutia podría ser más eficiente.

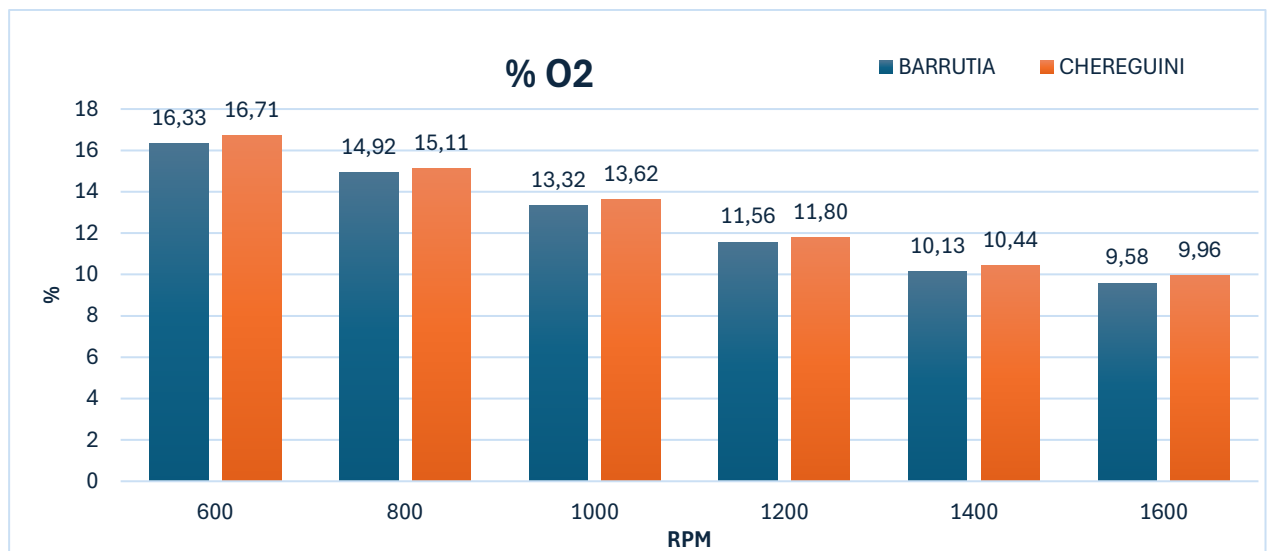


Figura 4-11 Gráfico comparativo de la proporción de O_2 de los gases de escape

En cuando a los valores de CO en ppm (véase Figura 4-12) y proporción de CO_2 (véase Figura 4-13), existe un parámetro denominado índice de carbono, que se utiliza para evaluar la eficiencia de la combustión y el impacto ambiental en función de las emisiones de carbono. Se puede observar que el combustible HVO a menor régimen de revoluciones produce menor cantidad de monóxido de carbono y también se percibe que las emisiones de CO del gasóleo B son muy constantes e independientes del régimen de revoluciones, manteniéndose estar en torno a las 100 ppm. Sin embargo, el porcentaje de CO_2 emitido por el HVO es ligeramente mayor al emitido por el gasóleo B, un 0,3% mayor, esta diferencia se mantiene constante durante todas las emisiones analizadas.

Cabe destacar que los valores obtenidos son del motor de estribor de cada una de las embarcaciones, para obtener las emisiones totales habría que medir también las que producen el motor de estribor, aunque ya que los motores fueron instalados a la vez, los mantenimientos son conjuntos y suelen trabajar a la misma carga, con duplicar los valores obtendríamos datos válidos.

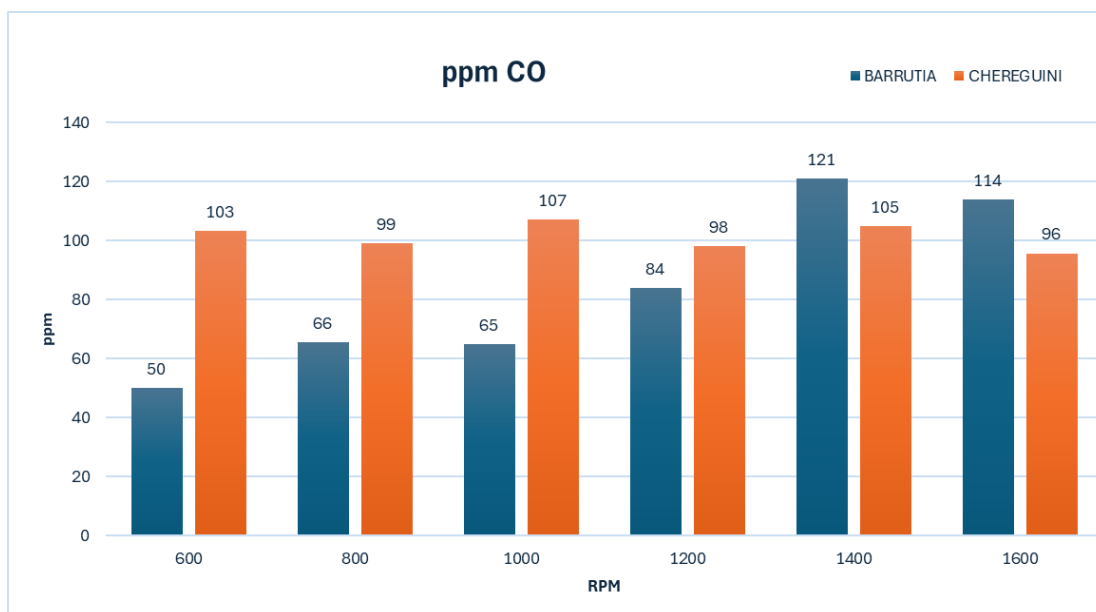


Figura 4-12 Gráfico de emisiones de partículas de CO.

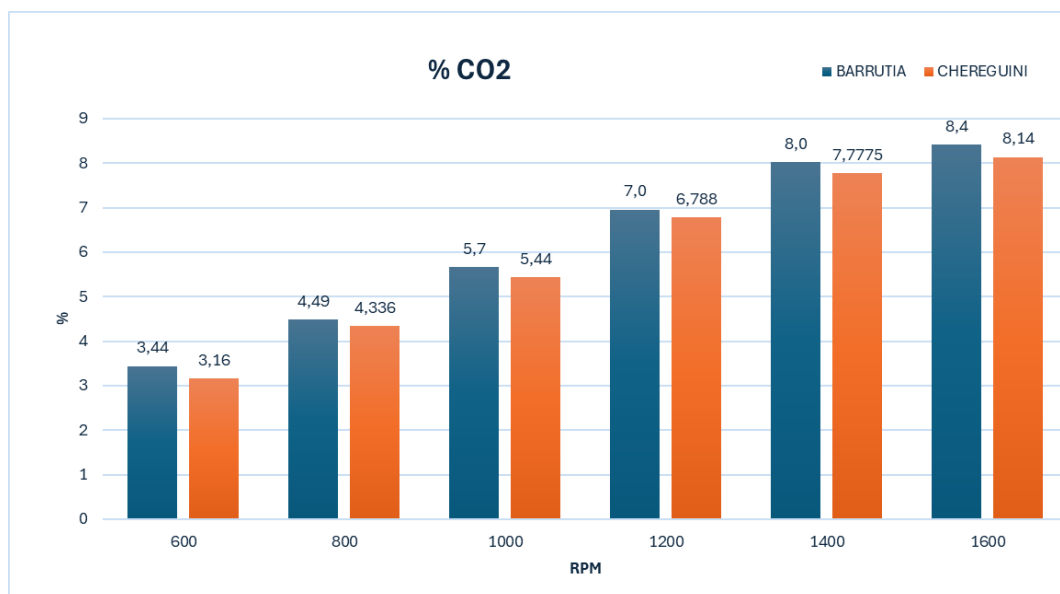


Figura 4-13 Gráfico de proporción de CO₂ en los gases de escape de cada combustible.

Si diferenciamos las dos tendencias de la cantidad de CO, podemos obtener un promedio del IC (índice de carbono) siguiendo la ecuación (1), que define el índice de carbono como la relación entre la cantidad de monóxido de carbono con el total entre monóxido de carbono y dióxido de carbono.

$$IC = \frac{CO \text{ (ppm)}}{CO_2 \text{ (ppm)} + CO \text{ (ppm)}} \times 100 \quad (1)$$

Resulta necesario obtener la cantidad de CO₂ en ppm, por lo que multiplicaremos por 10⁴ para pasar de % a ppm. Para analizar el valor del IC, se debe conocer que cuanto más pequeño sea, del orden de 0,1 %, más eficiente es la combustión (casi todo el carbono se transforma en CO₂), por el contrario,

cuanto mayor sea, más incompleta es la combustión lo que implica una mayor presencia de CO e ineficiencia o falta de oxígeno en la combustión.

En la Tabla 4-6 se muestran los IC obtenidos según el combustible y el régimen de revoluciones al que ha trabajado cada L.I. Se puede observar que la GM Barrutia con el HVO tiene un menor índice de carbono cuando navega a bajas revoluciones; a partir de las 1200, se percibe que el IC de la GM Barrutia es mayor que el de la GM Chereguini, este hecho se puede relacionar con la

Figura 4-12 donde se observa que el CO (ppm) es mayor en el HVO que en el gasóleo B a partir de las 1200 rpm.

Por lo tanto, se puede concluir que el HVO es más respetuoso con el medio ambiente cuando la embarcación navega con un régimen de revoluciones bajo. Al fin y al cabo, las L.L.I.I. sólo usan un régimen alto de revoluciones para los tránsitos entre rías o en caso de emergencia por lo que los beneficios obtenidos con el uso del HVO serían más que evidentes en cuanto a emisiones de carbono respecta.

Revoluciones por minuto (rpm)	IC GM Barrutia	IC GM Chereguini
600	0,145	0,327
800	0,146	0,228
1000	0,115	0,197
1200	0,121	0,145
1400	0,151	0,135
1600	0,135	0,118

Tabla 4-6 Índices de carbono resultantes de las emisiones de CO₂ y CO.

Si se quisiera obtener la cantidad de CO₂ que se ha evitado emitir a la atmósfera gracias al uso de HVO, sería necesario obtener los datos del caudal volumétrico de gases de escape y tiempo de operación. Como no se disponen de estos datos. El cálculo se puede aproximar con datos del Gobierno del Reino Unido [54], obteniendo los valores de la Tabla 4-7. El HVO tiene ese abanico de valores ya que varía dependiendo de la materia prima utilizada y si se considera el ciclo completo, para este estudio se va a tomar un valor promedio de 0,3 kg de CO₂ por litro de combustible.

Combustible	Factor de emisión aproximado
Gasóleo B	2.68 kg CO ₂ /litro
HVO	0.17–0.45 kg CO ₂ /litro

Tabla 4-7 Factores de emisión oficiales por litro consumido [54].

Tomando el consumo total desde el comienzo del análisis, teniendo en cuenta todas las salidas realizadas, en 510 millas navegadas ha consumido un total de 5438,5 litros de combustible. Lo que, en el caso del gasóleo B implica una emisión de aproximadamente 14,68 toneladas de CO₂ y el HVO, aproximadamente 1,62 toneladas. Esto implica que el HVO habría reducido en un 88,81% (13,04

toneladas) las emisiones de CO₂ durante esta etapa de análisis, al fin y al cabo, este valor ronda el 90% de reducción que muestran la mayoría de los artículos expuestos anteriormente.

Esta simulación se ha llevado a cabo teniendo en cuenta que ambas embarcaciones han consumido lo mismo, pero no es el caso; si tomamos el consumo total de la L.I. GM Chereguini (5545 litros de gasóleo B), esta habría emitido 14,86 toneladas de CO₂, lo que supondría que el HVO ha emitido un 89,1 % menos de CO₂, evitando que se emitan 13,24 toneladas de CO₂ a la atmósfera.

Por último, gracias al equipo de medición, podemos comparar las emisiones de óxidos nitrosos (véase

Figura 4-14). Respecto a las partículas de NO, cuanto mayor sean estas, mayor contaminación y menor reducción de NO_x o carencia de esta, también pueden suponer un incumplimiento de la normativa, convenio de MARPOL.

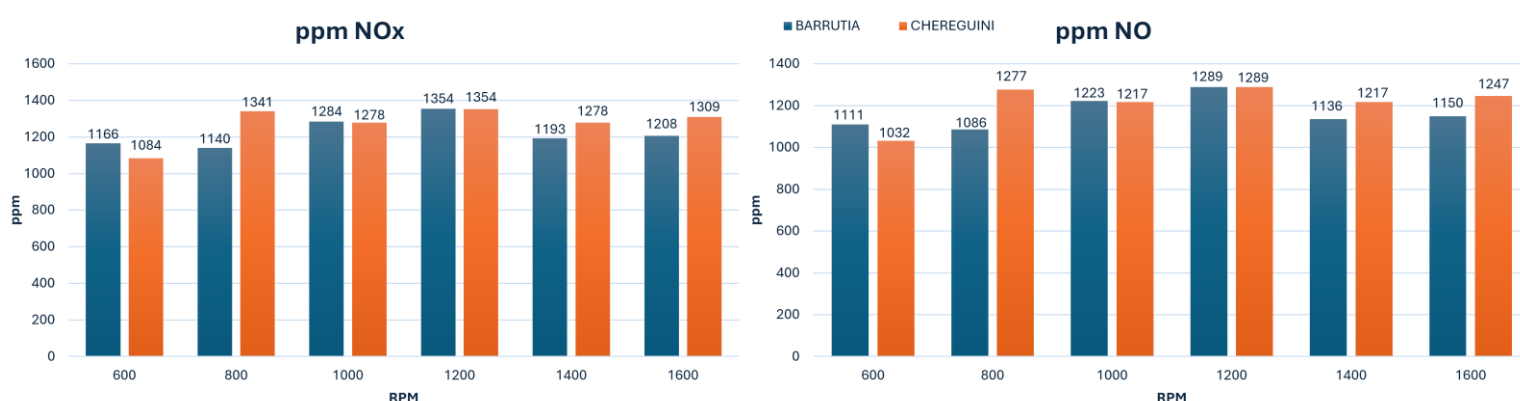


Figura 4-14 Gráficos comparativos de emisiones de NO_x y NO en ppm.

El convenio de MARPOL diferencia los barcos en tres tipos (Tier I, Tier II y Tier III) en función de las partículas de NO_x que emitan en un régimen de revoluciones. Para poder tratar los datos conforme a lo estipulado en el convenio de MARPOL, sería necesario obtener los gramos por kilovatio hora producidos, pero con los equipos disponibles no es posible obtener ese dato. Sería necesario un caudalímetro para poder obtener el flujo de gases de escape y así obtener las emisiones de NO_x en g/kWh. Sin embargo, se puede confirmar que el gasóleo B utilizado en la L.I. GM Chereguini produce más partículas de NO_x que el HVO, recordando que el HVO está más comprometido con el medio ambiente.

En conclusión, teniendo en cuenta todo lo explicado anteriormente, se puede afirmar que el HVO emite menos carbono cuando trabaja en un régimen de revoluciones más bajo, pese a tener una mayor temperatura de gases de escape, no presenta inconvenientes para la seguridad de los materiales ni la dotación, no tampoco aumenta de manera sustancial la temperatura ambiente, en cuanto al oxígeno, es posible que se esté introduciendo más O₂ del necesario en las cámaras de combustión y por ellos ese valor superior al del gasóleo B, pero esto no implica que las combustiones sean menos eficientes. Por último, los resultados obtenidos sobre las partículas de óxidos de nitrógeno no son concluyentes por lo que no se han de tener en cuenta.

4.3 Desafíos logísticos y económicos del uso de HVO en las Lanchas de Instrucción

En esta sección se mostrarán las dificultades que presenta la transición de gasóleo B a HVO en las Lanchas de Instrucción desde un punto de vista logístico y económico.

Dando por hecho que se mantiene la colaboración con la empresa Repsol, primero habría que negociar el precio del HVO, actualmente no tiene un precio fijo, ni está regulado como una fuente más sostenible por lo que no cuenta con los beneficios económicos que estas apuestas presentan en el ámbito político actual.

Para el transporte del combustible, la única diferencia es que, en el caso del gasóleo B, todas las gasolineras tienen la opción de suministrarlo, sin embargo, a la hora de solicitar el HVO, sólo algunas gasolineras lo comercializan, esto podría influir en los tiempos de llegada de combustible a la ENM.

Respecto a la cuestión económica, las propias Repsol de España comercializan el HVO bajo el nombre de Nexa 100% Renovable a un precio aproximado de 1,579 euros por litro, sin contar en cuenta los planes ahorro que contempla Repsol con la aplicación Waylet.

En el último repostaje efectuado en la ENM, durante el mes de marzo, el precio del gasóleo B fue de 0,759 €/l antes de impuestos, a lo que habría que añadir 0,379€/l en impuestos y el 21% de IVA, resultando así un precio final de 1,138 euros por litro de combustible. Obviamente es inferior al que presenta el HVO en las gasolineras, pero esto se debe a que existen contratos donde se disminuye el proveedor disminuye el coste del combustible a cambio de la exclusividad uso.

Si actualmente, el combustible de las Lanchas de Instrucción es 30 céntimos más barato que en las gasolineras convencionales, y el contrato con el HVO tuviera las mismas condiciones siendo también 30 céntimos por litro más barato, la ENM estaría pagando el litro de HVO a 1,279€.

Sólo en los llenados de la L.I. GM Barrutia durante el curso, en total 9800 litros (véase apartado 3.3.4) se habrían invertido 12.534€ (no es el caso ya que Repsol ha regalado el HVO para poder realizar este análisis comparativo), en caso de haber utilizado gasóleo B se habrían gastado 11.152€. La ENM se habría ahorrado 1382€ en el repostaje de la L.I. GM Barrutia.

A pesar de ese ahorro, hay que tener en cuenta que el consumo de HVO es menor que el de gasóleo B, en total se han consumido 446 litros menos de HVO que de gasóleo B durante todo el curso sin contar las semanas de I+A. Este ahorro de combustible supone que la ENM se ahorra 507€, es decir, pese a haber repostado un total de 9800 litros de HVO que implican gastar 1382€ más que si hubiera sido gasóleo convencional, se habría ahorrado 507€ en litros de combustible que no han hecho falta gracias al menor consumo de HVO.

Por lo tanto, en caso de que la ENM hubiera tenido que pagar por el HVO, habría pagado 875€ más porque la L.I. GM Barrutia haya usado el combustible durante todo el curso.

Esta simulación de gastos está supeditada al precio del HVO proporcionado por la empresa Repsol y a una generalización de los datos de consumo de las L.L.I.I. obtenido durante el desarrollo de este proyecto.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Del análisis comparativo realizado se concluye que el empleo de HVO en las Lanchas de Instrucción es técnicamente viable y sostenible, aportando mejoras notables en consumo de combustible y reduciendo el impacto ambiental en relación con el diésel marino convencional.

En términos de rendimiento, la lancha propulsada con HVO ha mostrado un consumo igual o ligeramente inferior al de la lancha gemela con gasóleo B. En la mayoría de las salidas analizadas, especialmente en misiones cortas de instrucción, la L.I. GM Barrutia ha registrado un gasto menor de combustible y sólo en las navegaciones de mayor duración como las pernoctas o la semana I+A se ha observado un consumo ligeramente superior, posiblemente debido a su menor densidad energética y a las condiciones operativas exigentes; no obstante, estas situaciones fueron puntuales, 6 pernoctas y 2 semanas I+A. En el balance anual, la embarcación con HVO mantiene un menor consumo total, evidenciando que el HVO puede igualar e incluso mejorar la eficiencia energética de los motores diésel en este contexto. En cuanto a los parámetros de funcionamiento del motor (presiones de aceite, temperaturas de refrigeración, etc.) han permanecido muy similares durante todo el ensayo, sin anomalías reseñables. Esto indica que la sustitución del gasóleo por HVO no afecta negativamente al rendimiento mecánico ni requiere ajustes significativos en el motor, cumpliendo con el requisito de ser un combustible compatible con los equipos existentes.

En cuanto a las emisiones, los resultados confirman que el HVO aporta ventajas medioambientales importantes. Al ser un combustible de origen renovable y bajo en carbono, su uso contribuye a una reducción neta de CO₂ emitido a la atmósfera, favoreciendo los objetivos de descarbonización naval. Las mediciones realizadas a bordo han evidenciado que, a regímenes de revoluciones moderados, el motor alimentado con HVO emite menores fracciones de gases de carbono (CO₂ y CO) en los gases de escape respecto al gasóleo B. En términos de emisiones contaminantes, no se registraron incrementos de humos ni de residuos visibles; al contrario, los datos han mostrado que el gasóleo convencional genera concentraciones más altas de NO_x que el HVO. No obstante, dado que la cuantificación precisa de NO_x requiere equipos adicionales (p.ej., medición en g/kWh), estos resultados no se consideran todavía concluyentes.

En conjunto, el empleo de HVO ha permitido reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y potencialmente de otros contaminantes locales, sin necesidad de modificaciones en el motor y sin comprometer la eficiencia de la combustión. Esto refuerza la idoneidad del HVO como alternativa más limpia frente al diésel para las operaciones de instrucción naval.

Desde la perspectiva logística y económica, la adopción de HVO en las Lanchas de Instrucción es factible, aunque con desafíos a gestionar. El suministro de HVO presenta algunas limitaciones, a diferencia del gasóleo B (disponible en cualquier estación de servicio de suministro naval habitual), el HVO aún no se comercializa de forma generalizada, dependiendo de distribuidores específicos, lo que podría alargar los tiempos de aprovisionamiento en comparación con el diésel convencional. Gracias a la colaboración con Repsol, la ENM pudo recibir entregas programadas de HVO (combustible “Nexa 100% Renovable”) sin interrumpir las actividades de las lanchas, demostrando que con acuerdos adecuados el abastecimiento regular es posible.

En cuanto al coste, actualmente el HVO tiene un precio de mercado superior al del gasóleo tradicional. Esta diferencia supone un sobrecoste operativo a corto plazo. No obstante, los datos de consumo indican que la mayor eficiencia del HVO compensa parcialmente el mayor precio unitario. En el escenario analizado, durante un cuatrimestre de uso la lancha con HVO necesitó menos litros de combustible que con diésel, amortiguando el impacto económico. En términos netos, el sobrecoste real por emplear HVO habría sido de solo 875 € (si se hubiesen dado las circunstancias expuestas), una cifra relativamente reducida si se considera el presupuesto operativo global. Además, cabe la posibilidad de negociar contratos de suministro de HVO similares a los del gasóleo, como acuerdos de volumen con descuento, lo que podría disminuir la brecha de precio por litro. Por lo tanto, con las debidas adaptaciones logísticas y contractuales, el uso de HVO es viable económicamente para la ENM, implicando un incremento de coste manejable a cambio de beneficios ambientales significativos.

En suma, los resultados de este TFG demuestran que el HVO puede emplearse con éxito en las Lanchas de Instrucción de la ENM, manteniendo o mejorando el rendimiento y reduciendo la huella de carbono de sus operaciones. La experiencia positiva obtenida no solo valida al HVO como combustible sostenible en el ámbito de instrucción, sino que aporta información clave de cara a futuras aplicaciones en unidades operativas de la Armada, contribuyendo así a los objetivos institucionales de eficiencia energética y reducción de emisiones en el sector naval.

5.2 Líneas Futuras

A partir de los resultados obtenidos y de las observaciones realizadas durante el desarrollo del análisis, se identifican diversas oportunidades para ampliar y profundizar en la investigación. Las siguientes líneas futuras se proponen con el objetivo de continuar avanzando en el uso de HVO en las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar:

- Estudios de rendimiento y durabilidad a largo plazo: Llevar a cabo pruebas prolongadas en el tiempo para evaluar el comportamiento del HVO en condiciones operativas reales durante ciclos de servicio extendidos. Sería valioso monitorear el rendimiento de los motores y componentes internos tras muchas horas de operación con HVO, a fin de detectar posibles efectos de desgaste, deposiciones o necesidades de mantenimiento diferentes a las del diésel convencional. Asimismo, un seguimiento a largo plazo permitiría analizar la estabilidad del combustible HVO almacenado en tanques durante meses, verificando que no se degrada ni genera contaminantes en mayor medida que el gasóleo.
- Análisis económico y operativo a mayor escala: Profundizar en el estudio socioeconómico del uso de HVO en la ENM. Aunque en este trabajo se han comparado los costes de combustible en una situación concreta, sería útil realizar un análisis más amplio considerando escenarios a gran escala, por ejemplo, sustituyendo el gasóleo por HVO en todas las Lanchas de Instrucción durante un año completo. Un estudio de coste-beneficio podría incluir variables como la fluctuación de precios del HVO en el mercado internacional, posibles incentivos o créditos de carbono por usar combustibles renovables.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change». Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/>
- [2] «Climate Change: Annual greenhouse gas index | NOAA Climate.gov». Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-annual-greenhouse-gas-index>
- [3] U. Al-Mulali y I. Ozturk, «The effect of energy consumption, urbanization, trade openness, industrial output, and the political stability on the environmental degradation in the MENA (Middle East and North African) region», *Energy*, vol. 84, pp. 382-389, may 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.004.
- [4] A. A. Rajput, Y. Jiang, S. Nayak, y A. Mostafavi, «Mapping Inequalities in Activity-based Carbon Footprints of Urban Dwellers using Fine-grained Human Trajectory Data», 26 de abril de 2023, *arXiv*: arXiv:2304.14417. doi: 10.48550/arXiv.2304.14417.
- [5] Y. Bu, E. Wang, D. Möst, y M. Lieberwirth, «How population migration affects carbon emissions in China: Factual and counterfactual scenario analysis», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 184, p. 122023, nov. 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2022.122023.
- [6] H. Shiraki, K. Matsumoto, Y. Shigetomi, T. Ehara, Y. Ochi, y Y. Ogawa, «Factors affecting CO2 emissions from private automobiles in Japan: The impact of vehicle occupancy», *Applied Energy*, vol. 259, p. 114196, feb. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114196.
- [7] «ELP_2050.pdf». Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/planes-y-estrategias/ELP_2050.pdf
- [8] «Total increase in energy-related CO2 emissions, 1900-2023 – Charts – Data & Statistics», IEA. Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-increase-in-energy-related-co2-emissions-1900-2023>
- [9] «Infografía: ¿Cuánto han disminuido las emisiones de CO2 en 2020?», Statista Daily Data. Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/grafico/23231/variacion-de-las-emisiones-de-co2-en-2020-respecto-a-2019>
- [10] «CO2 Emissions in 2023 – Analysis», IEA. Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- [11] L. H. Sanz, «TRABAJO FIN DE GRADO “EMISIONES DE CO2 Y HUELLA DE CARBONO EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS”».
- [12] «Qué es la descarbonización y principales claves para conseguirla», REPSOL. Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/cambio-climatico/descarbonizacion/index.cshtml>

- [13] E. José Gómez-Vizcaíno, C. P. Collazo, y A. Boehman, «Propulsión naval sostenible: Estudio de viabilidad tecno-económica para su implantación en el sector naval nacional y en particular en la Armada».
- [14] «Balearia presenta la construcción de dos ‘fast ferries’ 100% eléctricos de cero emisiones para operar el primer corredor verde entre España y Marruecos». Accedido: 17 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.balearia.com/es/sala-prensa/notas-prensa/balearia-presenta-la-construccion-de-dos-fast-ferries-100-electricos-de-cero-emisiones-para-operar-el-primer-corredor-verde-entre-espana-y-marruecos>
- [15] F. D’Agostino, M. Gallo, M. Saviozzi, y F. Silvestro, «Performance Investigation of an Optimal Control Strategy for Zero-Emission Operations of Shipboard Microgrids», 3 de mayo de 2024, *arXiv*: arXiv:2310.11760. doi: 10.48550/arXiv.2310.11760.
- [16] «TFG_Alvaro_Perez_Babiano.pdf». Accedido: 17 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/70126/1/TFG_Alvaro_Perez_Babiano.pdf
- [17] M. A. Rajaeifar *et al.*, «Decarbonize the military — mandate emissions reporting», *Nature*, vol. 611, n.º 7934, pp. 29-32, nov. 2022, doi: 10.1038/d41586-022-03444-7.
- [18] C. Aranzadi, «Energía y Geoestrategia 2024».
- [19] «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2020».
- [20] J. Velázquez Vázquez, «El medio ambiente en la Armada». *Revista General de Marina*, mayo de 2017.
- [21] P. S.L., «Publicación - NIEVES | Compañía Energética | NIEVES, una familia de energías», Nievesenergia. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nievesenergia.com/>
- [22] «HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) | Weidemann». Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.weidemann.com/es/empresas/innovacion-y-tecnologia/hvo-hydrotreated-vegetable-oil?utm_source=chatgpt.com
- [23] S. Manikandan, S. Vickram, y Y. Devarajan, «Cutting-edge technologies: Biofuel innovations in marine propulsion systems to lower black carbon emissions», *Results in Engineering*, vol. 25, p. 104095, mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104095.
- [24] L. Febrero Garrido, A. Cacabelos Reyes, A. González Gil, C. Pérez Collazo, y A. Boehman, «Experimental Assessment of Renewable Diesel (HVO) for Decarbonization: Emissions, Consumption, and Sustainability Insights».
- [25] C. Panoutsou *et al.*, «Advanced biofuels to decarbonise European transport by 2030: Markets, challenges, and policies that impact their successful market uptake», *Energy Strategy Reviews*, vol. 34, p. 100633, mar. 2021, doi: 10.1016/j.esr.2021.100633.
- [26] D. Garraín, I. Herrera, C. Lago, y Y. Lechón, «PRODUCCIÓN DE ACEITE VEGETAL HIDROTRATADO EN ESPAÑA: CONFORMIDAD CON LA DIRECTIVA 2009/28/EC EN EL AHORRO DE EMISIONES DE GEI», 2012.
- [27] 1 Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Instituto Tecnológico de Veracruz, V. G. Tacías Pascacio, A. Rosales Quintero, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, B. Torrestiana Sánchez, y Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Instituto Tecnológico de Veracruz, «EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GRASAS Y ACEITES RESIDUALES DE COCINA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL: UN CASO DE ESTUDIO», *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 32, n.º 3, pp. 303-313, ago. 2016, doi: 10.20937/RICA.2016.32.03.05.
- [28] «np03042024-repsol-produccion-planta-combustibles-renovables-cartagena.pdf». Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/sala-de-prensa/documentos-notas-de-prensa/2024/np03042024-repsol-produccion-planta-combustibles-renovables-cartagena.pdf>
- [29] META_AUTORES_CREADORES_DEL_SITIO, «META_NOMBRE_DEL_PROYECTO_70», CEPSA.com. Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.moevegloal.com/es/prensa/cepsa-inicia-la-comercializacion-de-diesel-renovable-hvo>

- [30] «HVO, carburante renovable para el transporte | bp España | Productos y servicios | Soluciones para Flotas | Productos y servicios | Home», España. Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.bp.com/es_es/spain/home/productos-y-servicios/soluciones-bp-para-flotas/soluciones-bajas-en-carbono/bp-bioenergy-hvo.html
- [31] «HVO – Oleofat». Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.oleofat.es/productos-avanzados/hvo/?utm_source=chatgpt.com
- [32] «La primera planta de producción de combustibles renovables a gran escala», REPSOL. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/conocenos/primer-planta-de-combustibles-renovables-gran-escala/index.cshtml>
- [33] «Repsol lleva a sus estaciones de servicio la economía circular y recoge aceite de cocina usado para fabricar combustible renovable», REPSOL. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2023/repsol-lleva-economia-circular-estaciones-servicio-recoge-aceite-cocina-usado-fabricar-combustible-renovable/index.cshtml>
- [34] «¿Qué son los combustibles renovables? Una elección sostenible», REPSOL. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/combustibles-renovables/index.cshtml>
- [35] «Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE».
- [36] «BOE-A-2022-8121.pdf». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2022/05/18/pdfs/BOE-A-2022-8121.pdf>
- [37] O. Ted, «MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO».
- [38] «ISCC EU – ISCC System». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.iscc-system.org/certification/iscc-certification-schemes/iscc-eu/?utm_source=chatgpt.com
- [39] «What is the Sustainable Biomass Program?», Sustainable Biomass Program. Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sbp-cert.org/>
- [40] «Certification - KZR INiG - Instytut Nafty i Gazu KZR INiG – Instytut Nafty i Gazu». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://kzr.inig.eu/en/certification/>
- [41] B. S. Chauhan, R. K. Singh, H. M. Cho, y H. C. Lim, «Practice of diesel fuel blends using alternative fuels: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1358-1368, jun. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.062.
- [42] J. Li, Z. Huang, B. Tao, X. Sun, y J. Pan, «Effects of EGR Rate and Temperature on Combustion and Emissions Characteristics of Compression Ignition Engines Fueled with Hydrotreated Vegetable Oil», *ACS Omega*, vol. 10, n.º 2, pp. 2081-2091, ene. 2025, doi: 10.1021/acsomega.4c08533.
- [43] Armada Española, «Manual de las Lanchas de Instrucción A-121». 2016.
- [44] «testo-340-manual-de-instrucciones.pdf». Accedido: 9 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://static.testo.com/image/upload/Instruction-manual-and-Software/Instruction-manuals/testo-340-manual-de-instrucciones.pdf>
- [45] «testo 340 - Analizador de gases de combustión para la industria», Testo. Accedido: 9 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.testo.com/es-PE/testo-340/p/0632-3340>
- [46] «¿Qué es el diésel renovable y por qué usarlo en tu vehículo?», REPSOL. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/que-es-el-diesel-renovable/>
- [47] «Combustibles Renovables: reduce tus emisiones», REPSOL. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.es/particulares/vehiculos/carburantes/combustibles-renovables/>

- [48] I. Bortel, J. Vávra, y M. Takáts, «Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine», *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 680-691, sep. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.067.
- [49] «¿Qué es Repsol MarDiésel e+?», REPSOL. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.es/particulares/faqs/carburantes/que-es-repsol-mardiesel-e/>
- [50] «ficha_producto_diesel_eplus_tcm19-51185.pdf». Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.repsol.es/content/dam/repsol-ecommerce/documentos/veh%C3%ADculos/carburantes-lubricantes/ficha_producto_diesel_eplus_tcm19-51185.pdf
- [51] L. M. de Haro, L. F. Garrido, y A. Boehman, «Evaluación del potencial de reducción de la intensidad de carbono mediante la adopción de diésel renovable en buques de la Armada», 2024.
- [52] «Hermanos Robles - Combustibles y Carburantes». Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hermanosrobles.com/gasoleo-de-automocion-repsol-diesel-e>
- [53] «Comparative Study of Marine Biofuels: MGO, HVO, and FAME – Spectra Fuels». Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.spectrafuels.com/comparative-study-of-marine-biofuels-mgo-hvo-and-fame/>
- [54] «Greenhouse gas reporting: conversion factors 2024», GOV.UK. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024>

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

La incorporación del HVO como combustible en las Lanchas de Instrucción empleadas por la ENM supone un avance relevante en el proceso de transición hacia modelos energéticos más sostenibles, con importantes repercusiones en los ámbitos ambiental, económico y social. Desde una perspectiva medioambiental, el uso de este biocombustible permite una notable reducción de las emisiones contaminantes asociadas a la navegación. Al ser producido a partir de aceites vegetales y grasas recicladas, el HVO presenta una composición libre de azufre y de hidrocarburos aromáticos, lo que no solo evita la emisión de dióxido de azufre, sino que también reduce considerablemente la generación de partículas en suspensión, como el hollín. Además, su estructura química más estable favorece una combustión más limpia y eficiente, lo que se traduce en una disminución significativa de gases de efecto invernadero como el CO₂, con reducciones que pueden alcanzar hasta un 90 % respecto al diésel marino convencional.

En el plano económico, el empleo de HVO presenta tanto oportunidades como desafíos. El principal obstáculo para su adopción generalizada radica en su mayor coste en comparación con el diésel fósil, derivado de una infraestructura de producción todavía incipiente y de una oferta limitada a escala global. No obstante, este sobrecoste debe analizarse en el contexto de una creciente inestabilidad en el mercado de combustibles fósiles, sujeto a fluctuaciones derivadas de factores geopolíticos, logísticos y regulatorios. En este sentido, el HVO, al proceder de fuentes renovables como residuos orgánicos y aceites reciclados, podría ofrecer a medio y largo plazo una mayor estabilidad de precios, especialmente si se incrementa su producción mediante inversiones estratégicas y el establecimiento de incentivos fiscales adecuados. Además, su utilización conlleva beneficios indirectos, como la reducción del desgaste en los motores y la menor necesidad de sistemas de depuración, lo cual podría traducirse en menores costes de mantenimiento y operación.

Desde el punto de vista social, la introducción del HVO en las Lanchas de Instrucción tiene implicaciones especialmente valiosas en el contexto formativo de los futuros oficiales de la Armada. La ENM, desempeña un papel fundamental en la transmisión de valores y competencias alineadas con los desafíos del presente y del futuro. En este sentido, el uso de combustibles alternativos sostenibles en los medios de instrucción permite que los alumnos se familiaricen desde etapas tempranas con tecnologías respetuosas con el medio ambiente, desarrollando una conciencia ambiental práctica y operativa que va más allá de los contenidos teóricos. Esta experiencia directa en el empleo de soluciones energéticas más limpias no solo refuerza su capacitación técnica, sino que también promueve una mentalidad orientada a la innovación, la eficiencia y la sostenibilidad.

Por otro lado, la implementación de HVO contribuye a proyectar una imagen institucional coherente con los principios de responsabilidad medioambiental, situando a las Fuerzas Armadas como actores activos en la transición ecológica. Tradicionalmente, el sector defensa ha estado menos expuesto a exigencias regulatorias en materia ambiental; sin embargo, la adopción voluntaria de medidas como esta envía un mensaje claro sobre el compromiso de la Armada con la sostenibilidad, sin que ello suponga una merma en su eficacia operativa. Esta coherencia entre los objetivos estratégicos y las prácticas cotidianas mejora la percepción social de la institución y puede servir de ejemplo para otras organizaciones, tanto del ámbito militar como del civil, que busquen reducir su huella de carbono. Asimismo, el conocimiento y los datos obtenidos a partir de la aplicación del HVO en las lanchas pueden emplearse para el desarrollo de materiales didácticos, sesiones formativas o guías técnicas, ampliando su impacto a otras unidades, favoreciendo así una evolución gradual pero firme hacia modelos energéticos más sostenibles dentro del entorno militar.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La realización de este Trabajo Fin de Grado ha permitido no solo avanzar en el conocimiento técnico relacionado con el rendimiento y las emisiones de distintos combustibles, sino también reflexionar sobre el papel ético y social de la ingeniería dentro del entorno militar. La aplicación de combustibles sostenibles como el HVO en embarcaciones no es únicamente una mejora operativa o medioambiental, sino también una manifestación del compromiso ético de las instituciones con la protección del entorno y el desarrollo responsable de la tecnología.

Desde este punto de vista, el trabajo plantea una cuestión esencial: ¿es moralmente aceptable mantener prácticas y técnicas que, pese a su eficacia, comprometen el futuro ambiental del planeta? La respuesta, implícita en la propia motivación del proyecto, apunta a la necesidad de buscar soluciones tecnológicas que reduzcan el impacto ecológico sin comprometer la eficacia de los sistemas que garantizan la seguridad y defensa. En este sentido, el uso de combustibles alternativos avanzados como el HVO en la Armada contribuye a un modelo más ético de actuación, en el que la sostenibilidad se integra como un criterio esencial en la toma de decisiones.

A nivel social, esta línea de investigación también aporta valor al formar a los futuros oficiales en el uso de energías más limpias y en la gestión responsable de los recursos. La sostenibilidad, entendida como un principio transversal, debe formar parte del liderazgo que se espera de quienes estarán al mando de unidades navales en los próximos años. Este trabajo, al centrarse en un entorno real y formativo como el de las Lanchas de Instrucción, permite que los alumnos participen activamente en el proceso de transición energética, desarrollando no solo competencias técnicas, sino también una sensibilidad ética ante los desafíos ambientales que afectan a toda la sociedad.

Este proyecto no solo persigue un objetivo técnico, sino que se enmarca en una reflexión más amplia sobre la responsabilidad de los ingenieros y de las instituciones a las que pertenecen. La incorporación de criterios éticos y sociales en el desarrollo de soluciones tecnológicas no es una opción, sino una exigencia de nuestro tiempo. Apostar por combustibles como el HVO en el entorno militar es una manera de anticiparse a los retos futuros, promoviendo una cultura operativa comprometida con el medioambiente, la eficiencia y la ejemplaridad institucional.

ANEXO III: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS COMBUSTIBLES

En este anexo se presenta el informe técnico que analiza la evolución de las propiedades fisicoquímicas de dos combustibles, NEXA y GOB, HVO y diésel convencional respectivamente, a lo largo de un periodo de dos meses. Se han evaluado parámetros clave como la densidad, el poder calorífico, el índice de cetano, la estabilidad a la oxidación y la curva de destilación, con el objetivo de determinar su estabilidad y rendimiento en condiciones de almacenamiento y uso.

Propiedad	Unidades	Norma	Resultados a tiempo 0		Resultados a tiempo 2 meses	
			GOB	NEXA	GOB	NEXA
					213783 88886	213784 88887
Aspecto		ASTM D4176	ByT	ByT	ByT	ByT
Densidad a 15°C	kg/m3	ISO 3675	834.2	784.9----	832.9	785.0
Poder calorífico superior	MJ/kg	ASTM D240	45.6	46.0----	44.8	46.8
Poder calorífico inferior	MJ/kg	-	42.6	42.7----	41.8	43.5
Poder calorífico inferior	MJ/L	-	35.5	33.5----	34.8	34.1
Índice de cetano		ASTM D4737	49	90.5----	49.6	90.0
POFF	°C	EN 116	-19	-10----	-18	-10
Punto de inflamación	°C	ASTM D93	60.5	94.5----	60.5	95.5
Estabilidad		ASTM D2274	-	-----	-	-
Residuos adherentes	g/m3		2.9	3.7----	1	0.5
Residuos filtrables	g/m3		1.4	1.7----	1	1
Residuos totales	g/m3		4.3	5.4----	2	1.5
Curva de destilación		ASTM D86	-	-----	-	-
IBP	°C		161.5	233.6----	162	226.8
T5	°C		184.7	257.9----	184.8	254.6
T10	°C		192.4	264.2----	190.8	261.5
T20	°C		207.2	271.4----	205.6	269.5
T30	°C		222.2	275.4----	221	274.9
T40	°C		238	278.5----	237.8	278.2
T50	°C		253.9	281.2----	254.9	280.9
T60	°C		270.4	283.8----	271.9	283.5
T70	°C		287.8	286.4----	289.5	286.2
T80	°C		307.5	289.3----	309.6	289.4
T90	°C		335.4	293.7----	338.2	294
T95	°C		355.9	297.8----	359.7	299.8
FBP	°C		365.2	302.2----	363.6	306.4
C elemental	%m/m		86.26	85.047	86.26	85.047
H elemental	%m/m		13.74	14.953	13.74	14.953
N elemental	%m/m		0	0	0	0
O elemental	%m/m		0	0	0	0
C			14.2971	15.6584	14.2971	15.6584
H			27.1368	32.8058	27.1368	32.8058
O			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Relación H/C			1.9	2.1	1.9	2.1
Relación O/C			0.0	0.0	0.0	0.0

Figura A III-1 Análisis fisicoquímico comparativo de los combustibles GOB y NEXA (Repsol Technology Lab).

ANEXO IV: PLANTILLA RECOGIDA DE DATOS DE CADA NAVEGACIÓN DE LAS L.L.I.I.

En el presente anexo, se muestra la plantilla usada para recopilar los datos de cada navegación, incluyendo información general de la salida como la fecha, hora de salida y llegada, distancia recorrida y velocidad media. También se reserva un espacio para apuntar todos los datos aportados por el motor al final de cada una de las salidas. Por último, a la derecha, se aprecia un espacio reservado para apuntar cualquier tipo de observación necesaria.

DATOS GENERALES DE LA SALIDA				LANCHA:																																																			
FECHA:				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">HORA:</th> <th>OBSERVACIONES:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="height: 300px;"></td><td></td></tr> </tbody> </table>	HORA:	OBSERVACIONES:																																																	
HORA:	OBSERVACIONES:																																																						
HORA DE SALIDA:																																																							
HORA DE LLEGADA:																																																							
Distancia recorrida:			millas																																																				
Velocidad promedio:			nudos																																																				
<i>Realizar un reset (*) de datos al inicio de cada salida y al finalizar registrar lo siguiente:</i> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">TOTALES ACTUALES DEL MOTOR</th> </tr> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">BABOR</th> <th style="text-align: center;">ESTRIBOR</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Horas de viaje del motor:</td> <td></td> <td></td> <td>horas</td> </tr> <tr> <td>Horas viaje marcha en vacío:</td> <td></td> <td></td> <td>horas</td> </tr> <tr> <td>Combustible de viaje:</td> <td></td> <td></td> <td>litros</td> </tr> <tr> <td>Combustible viaje en vacío:</td> <td></td> <td></td> <td>litros</td> </tr> <tr> <td>Consumo combustible promedio:</td> <td></td> <td></td> <td>LPH</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">BABOR</th> <th style="text-align: center;">ESTRIBOR</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Horas del motor en total:</td> <td></td> <td></td> <td>horas</td> </tr> <tr> <td>Horas marcha vacío en total:</td> <td></td> <td></td> <td>horas</td> </tr> <tr> <td>Combustible en total:</td> <td></td> <td></td> <td>litros</td> </tr> <tr> <td>Combustible marcha vacío total:</td> <td></td> <td></td> <td>litros</td> </tr> <tr> <td>Consumo combustible promedio:</td> <td></td> <td></td> <td>LPH</td> </tr> </tbody> </table> (*) Pulsar ➡ y ⬅ la vez y luego reajustar viaje ➡				TOTALES ACTUALES DEL MOTOR					BABOR	ESTRIBOR		Horas de viaje del motor:			horas	Horas viaje marcha en vacío:			horas	Combustible de viaje:			litros	Combustible viaje en vacío:			litros	Consumo combustible promedio:			LPH		BABOR	ESTRIBOR		Horas del motor en total:			horas	Horas marcha vacío en total:			horas	Combustible en total:			litros	Combustible marcha vacío total:			litros	Consumo combustible promedio:			LPH
TOTALES ACTUALES DEL MOTOR																																																							
	BABOR	ESTRIBOR																																																					
Horas de viaje del motor:			horas																																																				
Horas viaje marcha en vacío:			horas																																																				
Combustible de viaje:			litros																																																				
Combustible viaje en vacío:			litros																																																				
Consumo combustible promedio:			LPH																																																				
	BABOR	ESTRIBOR																																																					
Horas del motor en total:			horas																																																				
Horas marcha vacío en total:			horas																																																				
Combustible en total:			litros																																																				
Combustible marcha vacío total:			litros																																																				
Consumo combustible promedio:			LPH																																																				
<i>Registrar hitos importantes del viaje (fondeo, alarma, avería, ...)</i>																																																							

Figura A IV-1 Plantilla de recogida de datos de las salidas a la mar durante el desarrollo del trabajo.

ANEXO V: DATOS DE CONSUMO DURANTE LA SEMANA DE I+A

En este anexo se observan los datos recogidos de las salidas de las Lanchas de Instrucción durante la semana de I+A, desglosando los datos de cada uno de los motores, su tiempo de uso y la distancia recorrida durante la salida, tomando esta distancia y el tiempo transcurrido entre la desatracada y la atracada para calcular la velocidad media. Con estos datos se han obtenido los consumos en litros por hora, por milla navegada y por nudo.

BARRUTIA	A		B		C	
FECHA	I+A		I+A		I+A	
MOTOR	BR	ER	BR	ER	BR	ER
HORAS (h)	15	15	14,95	14,95	14	14
DISTANCIA (nm)	93		84		86	
VELOCIDAD MEDIA (kts)	7,25		5,67		6,77	
Consumo total (L)	434	445	510,5	522,5	507	514,5
Consumo (L/h)	28,9	29,7	34,1	34,9	36,2	36,8
Consumo (L/nm)	4,7	4,8	6,1	6,2	5,9	6,0
Consumo (L/kts)	59,9	61,4	90,0	92,2	74,9	76,0

CHEREGUINI	A		B		C	
FECHA	I+A		I+A		I+A	
MOTOR	BR	ER	BR	ER	BR	ER
HORAS (h)	14,1	14,1	14,45	14,45	17,4	17,4
DISTANCIA (nm)	90		106		97	
VELOCIDAD MEDIA (kts)	7		6,8		6,26	
Consumo total (L)	434,5	431	558	549,5	516,5	510,5
Consumo (L/h)	30,8	30,6	38,6	38,0	29,7	29,3
Consumo (L/nm)	4,8	4,8	5,3	5,2	5,3	5,3
Consumo (L/kts)	62,1	61,6	82,1	80,8	82,5	81,5

Figura AV-1 Datos obtenidos durante las salidas a la mar en la semana de I+A.