



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Motores de propulsión en las lanchas de instrucción de la ENM:
comparación de emisiones y funcionamiento*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Juan Pablo Mateos Solís

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes

Lara Febrero Garrido

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Motores de propulsión en las lanchas de instrucción de la ENM:
comparación de emisiones y funcionamiento*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado compara el comportamiento de los motores de propulsión instalados en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar: el Caterpillar C18 y el MTU 10V2000M84. El objetivo es identificar sus diferencias de funcionamiento en condiciones reales de servicio y evaluar su desempeño en consumo, eficiencia y emisiones contaminantes a distintos regímenes de giro y velocidades de navegación, con el fin de aportar una base técnica útil para la valoración operativa de ambas plantas propulsoras.

La metodología se basó en la adquisición de datos durante la navegación real, registrando variables del motor y de la embarcación, y en la medición de gases de escape mediante un analizador portátil Testo 340. En el caso del MTU, además, se incorporaron datos internos obtenidos mediante diagnosis con MTU DiaSys, lo que permitió ampliar el detalle del análisis comparativo.

Los resultados indican que ambos motores funcionan de forma estable en el rango estudiado, aunque con diferencias relevantes: el MTU ofrece mayores prestaciones propulsivas, mientras que el Caterpillar presenta una respuesta más uniforme desde el punto de vista de las emisiones.

PALABRAS CLAVE

Lanchas de instrucción, motores marinos, emisiones, consumo, diésel.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo Fin de Grado no habría sido posible sin la ayuda, el apoyo y la colaboración de muchas personas a lo largo de todo el proceso.

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento a mis tutores, por su tiempo, su dedicación y su orientación durante el desarrollo de este trabajo. Su ayuda ha sido fundamental para dar forma al estudio y encauzarlo correctamente desde el punto de vista técnico y académico.

Quiero agradecer también a mi familia, por su apoyo constante, su paciencia y su ánimo durante todo este tiempo. Su confianza y su respaldo, especialmente en los momentos de mayor presión, han sido esenciales para poder llegar hasta aquí.

Del mismo modo, agradezco a mis amigos y compañeros su cercanía, su ayuda y su apoyo durante este camino. Gracias por escucharme cuando lo he necesitado, por vuestra motivación y por hacer más llevadero el proceso en los momentos más exigentes.

Quisiera agradecer de forma especial a Javier, técnico de MTU, por su ayuda durante la toma de datos del motor MTU 10V2000M84 y por su disposición para facilitar el acceso a información técnica relevante para el desarrollo del trabajo. Su apoyo fue especialmente valioso en la obtención de parámetros del motor mediante herramientas de diagnóstico, lo que permitió enriquecer el análisis comparativo realizado en esta memoria.

Por último, agradezco a todas aquellas personas que, de una forma u otra, me han facilitado recursos, documentación y apoyo técnico durante la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Contexto y motivación	9
1.2 Justificación del estudio	10
1.3 Objetivos	10
1.4 Alcance y limitaciones	11
1.5 Estructura de la memoria	11
2 Estado del arte	12
2.1 Motores diésel marinos	12
2.1.1 Tipología de los motores marinos diésel	13
2.1.2 Aplicación en lanchas de pequeño y medio porte.....	16
2.2 Parámetros característicos del funcionamiento de un motor marino	17
2.2.1 Potencia, par y régimen de giro	18
2.2.2 Curva característica del motor	19
2.2.3 Factores que influyen en el consumo real.....	20
2.3 Consumo de combustible en motores marinos	20
2.3.1 Consumo horario	20
2.3.2 Consumo específico y consumo por distancia.....	21
2.4 Normativa aplicable a motores marinos y emisiones contaminantes	21
2.4.1 Normativa internacional sobre emisiones en el ámbito marítimo	21
2.4.2 Límites de emisiones para motores diésel marinos	22
2.4.3 Normativa europea.....	23
2.4.4 Aplicación de la normativa en el ámbito militar.....	24
2.5 Métodos de adquisición de datos en las embarcaciones	25
2.5.1 Influencia del desplazamiento y el estado de la mar	26
2.5.2 Adquisición y tratamiento de datos de navegación	26
3 Desarrollo del TFG.....	28
3.1 Descripción general del estudio	28
3.2 Plataforma de estudio.....	29
3.2.1 Lanchas de instrucción analizadas	29
3.2.2 Perfil de uso operativo	29

3.2.3 Descripción general de las lanchas de instrucción	30
3.3 Descripción de los sistemas propulsivos.....	32
3.3.1 Sistema de propulsión de la GM Barrutia.....	32
3.3.2 Sistema de propulsión de la GM Godínez	33
3.4 Análisis comparativo de prestaciones y parámetros de propulsión	34
3.5 Combustible empleado y sus propiedades fisicoquímicas	37
3.6 Instrumentación y equipos de medida.....	38
3.7 Metodología experimental	40
3.8 Tratamiento y análisis de datos	41
4 Resultados	43
4.1 Comparación de los datos obtenidos.....	43
4.1.1 Parámetros operativos y variables de funcionamiento	43
4.1.2 Emisiones de gases de escape.....	49
4.2 Discusión técnica de resultados	55
4.3 Reconstrucción del perfil operativo de una salida real y estimación comparativa de consumo y emisiones	58
5 Conclusiones y líneas futuras	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Cumplimiento de los objetivos	64
5.3 Líneas futuras de trabajo	65
6 Bibliografía.....	68
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	71
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	73
Anexo III: Características del combustible empleado.....	75
Anexo IV: Uso responsable de la inteligencia artificial.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Ciclo Diésel ideal [3]	13
Figura 2-2 <i>Waterjet</i> en los buques de la clase japonesa Hayabusa [12]	17
Figura 2-3 Ejemplo relación entre rpm, carga propulsiva y consumo (elaboración propia)	19
Figura 2-4 Zonas ECA en 2025 [6]	22
Figura 2-5 Arquitectura VDR y equipos asociados [27]	25
Figura 3-1 Lanchas de Instrucción atracadas al muelle Almirante Vierna (fuente propia)	28
Figura 3-2 Vista de planta y perfil de las lanchas de instrucción [31]	31
Figura 3-3 Planos de las lanchas de instrucción con vista de perfil y de planta [31]	32
Figura 3-4 Motor Caterpillar C18 a bordo de la GM Barrutia (fuente propia)	33
Figura 3-5 Motor MTU a bordo de la GM Godínez (fuente propia)	34
Figura 3-6 Codo gases de escape de la GM Godínez (fuente propia)	39
Figura 3-7 Testo 340 equipado con su sonda [32]	40
Figura 4-1 Relación velocidad-régimen de giro de ambas lanchas (elaboración propia).	45
Figura 4-2 Consumo instantáneo frente a la velocidad de navegación (elaboración propia)	45
Figura 4-3 Consumo por distancia frente a la velocidad de navegación (elaboración propia).	46
Figura 4-4 Carga relativa frente a la velocidad de navegación (elaboración propia)	47
Figura 4-5 Temperatura del refrigerante frente al régimen de giro (elaboración propia).	47
Figura 4-6 Presión de aceite lubricante frente al régimen de giro (elaboración propia)	48
Figura 4-7 Presión de aire de carga frente al régimen de giro (elaboración propia).	49
Figura 4-8 Temperatura de los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).	51
Figura 4-9 Concentración de O ₂ en los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 (izquierda) y MTU 10V2000M84 (derecha) (elaboración propia).	52
Figura 4-10 Concentración de CO frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia)	52
Figura 4-11 Concentración de CO ₂ en los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 (izquierda) y MTU 10V2000M84 (derecha) (elaboración propia).	53
Figura 4-12 Concentración de NO _x en los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).	54
Figura 4-13 Comparación del índice de carbono (IC) en función del régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).	54
Figura 4-14 Derrota de las lanchas de instrucción durante la semana I+A (fuente propia).	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Límites IMO de NO _x (Tier I–III) según régimen del motor [6].....	15
Tabla 3-1 Características generales de las Lanchas de Instrucción [31].....	31
Tabla 3-2 Comparación de las características principales de los sistemas propulsivos Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).....	36
Tabla 4-1 Valores medios del motor Caterpillar C18 según el régimen de giro (elaboración propia).	43
Tabla 4-2 Valores medios del motor MTU 10V2000M84 según el régimen de giro (elaboración propia).	44
Tabla 4-3 Media del porcentaje de carga de ambas lanchas (elaboración propia).	46
Tabla 4-4 Valores medios de las emisiones del motor Caterpillar C18 según el régimen de giro (elaboración propia).	50
Tabla 4-5 Valores medios de las emisiones del motor MTU 10V2000M84 según el régimen de giro (elaboración propia).	50
Tabla 4-6 Relación velocidades redondeadas con las rpm estimadas (elaboración propia).....	59
Tabla 4-7 Datos de consumo y emisiones de la GM Barrutia durante la navegación (elaboración propia).	60
Tabla 4-8 Datos de consumo y emisiones de la GM Godínez durante la navegación (elaboración propia).	61
Tabla 4-9 Resultados acumulados de rendimiento y consumo (fuente propia).	61
Tabla 4-10 Resultados acumulados de emisiones (elaboración propia).....	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

La capacidad de una embarcación para navegar, responder con rapidez a las órdenes de gobierno y sostener su autonomía depende, en gran medida, del motor y de cómo este entrega par y potencia en condiciones reales de servicio. En el entorno naval, y especialmente en plataformas de instrucción, donde son habituales los cambios continuos de régimen, las aceleraciones y los periodos largos de servicio, el motor no puede interpretarse únicamente a partir de sus datos nominales, sino como un sistema cuyo rendimiento y respuesta dependen de la carga, el número de revoluciones, las condiciones térmicas de operación y las características del combustible empleado. De hecho, los propios fabricantes definen sus prestaciones bajo condiciones normalizadas (temperatura del aire, presión barométrica y combustible), y especifican categorías de empleo (continuo, cíclico o intermitente) que condicionan el punto de operación esperado.

En este sentido, disponer de datos reales de funcionamiento se vuelve esencial para evaluar el comportamiento del motor. Los ensayos en banco permiten caracterizar potencia y consumo, y simular condiciones controladas para el ajuste del motor, pero no sustituyen la información obtenida en servicio, donde intervienen las condiciones ambientales y el perfil operativo de la embarcación. Por ello, la tendencia actual en motores marinos, y más concretamente en entornos con altas exigencias operativas, es explotar la instrumentación y la monitorización para registrar variables del motor y relacionarlas con su rendimiento, consumo, carga efectiva, temperaturas y otros parámetros que permiten interpretar si el motor está trabajando en una zona eficiente o si, por el contrario, se desplaza a regiones menos favorables.

El análisis de los motores instalados en lanchas de la Escuela Naval Militar (ENM) y la comparación de su funcionamiento y emisiones a partir de datos reales de operación responden a esa necesidad, prestando atención a su respuesta en diferentes regímenes que reproducen las condiciones reales de operación.

Estas lanchas suelen usarse siempre de una forma parecida. Normalmente pasan por fases que se repiten, una navegación a un régimen estable y, en algunos momentos, periodos más exigentes en los que el motor trabaja a más revoluciones y con mayor carga. Como es un patrón repetitivo, es más sencillo elegir varios puntos de medida y comparar motores en las mismas condiciones. Además, al ser embarcaciones de instrucción, realizan salidas y maniobras parecidas, lo que permite reunir bastantes datos y, con ellos, ver con más claridad las diferencias reales de funcionamiento entre los distintos motores.

En definitiva, el objetivo es realizar una comparación rigurosa entre los motores de las lanchas de instrucción, analizando no solo su funcionamiento, sino también las emisiones que generan en condiciones reales de servicio. Para que esta comparación tenga validez, no es suficiente con recurrir únicamente a datos teóricos o de catálogo, sino que resulta imprescindible obtener información durante la navegación real de las embarcaciones. Solo de este modo es posible evaluar el comportamiento de cada motor en situaciones representativas de operación, teniendo en cuenta las exigencias reales a las que están sometidos.

Para ello, es necesario llevar a cabo una toma de datos sistemática y ordenada, registrando variables de funcionamiento como el régimen del motor, el punto de operación y las condiciones en las que trabaja en cada momento. A su vez, estos datos deben sincronizarse con las mediciones de consumo de combustible y con los valores de emisiones de gases obtenidos durante la navegación. Esta relación entre parámetros operativos y resultados medidos es fundamental, ya que permite interpretar de manera precisa el rendimiento de cada motor y su impacto ambiental.

De esta forma, las diferencias que se observen entre unos motores y otros podrán atribuirse con mayor fiabilidad a sus propias características de funcionamiento y diseño, y no a factores externos o a variaciones en las condiciones de ensayo. En consecuencia, el análisis comparativo tendrá una base experimental sólida, apoyada en datos reales y comparables, lo que permitirá extraer conclusiones más precisas sobre la eficiencia, el comportamiento operativo y el nivel de emisiones de cada motor.

1.2 Justificación del estudio

La comparación entre los motores de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar responde a que, en este tipo de embarcaciones, el motor trabaja en condiciones muy variables y con cambios de régimen frecuentes, de modo que el consumo y el rendimiento reales no pueden evaluarse únicamente con datos de catálogo. Para que la comparación sea útil, es necesario observar cómo responde cada motor en puntos de operación representativos y repetibles durante la navegación que permiten medir en condiciones equivalentes y comparar el comportamiento de cada motor.

Además, los motores objeto de estudio pertenecen a familias con características diferentes y, por tanto, es razonable esperar diferencias apreciables en consumo y eficiencia a igualdad de condiciones. En la documentación de las lanchas se describen las características del motor Caterpillar C18 con potencia nominal de 746 kW a 2300 rpm, mientras que el motor MTU 10V2000M84 desarrolla una potencia nominal superior (1015 kW a 2450 rpm). Esta disparidad de potencia y de comportamiento del consumo específico hace pertinente contrastar qué motor resulta más eficiente en los regímenes típicos de instrucción.

Por último, el estudio no se limita al consumo, sino que, al incorporar mediciones de emisiones en condiciones reales, permite valorar el desempeño de ambos motores desde una perspectiva operativa y ambiental, obteniendo conclusiones aplicables tanto a su funcionamiento diario durante las salidas a la mar como a futuras decisiones técnicas.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es determinar y comparar el comportamiento de los motores de propulsión instalados en las lanchas de instrucción de la ENM, tomando los dos diferentes motores, Caterpillar y MTU, y evaluando su desempeño en términos de emisiones contaminantes, eficiencia y consumo bajo los distintos regímenes de revoluciones y velocidades de navegación.

Para alcanzar ese objetivo general, el estudio se orienta a recopilar y analizar datos experimentales obtenidos en diferentes salidas, relacionando las condiciones de operación (rpm y velocidad) con los indicadores de consumo y de eficiencia, y comparando los resultados entre ambos motores. A partir de esa comparación, se pretende establecer conclusiones técnicas y recomendaciones de uso que contribuyan a optimizar recursos y reducir emisiones, aportando además una base objetiva que pueda

servir de apoyo a futuras decisiones sobre la modernización de las lanchas en función del desempeño técnico y de criterios de sostenibilidad.

1.4 Alcance y limitaciones

El presente proyecto se limita al análisis comparativo del comportamiento de los motores diésel marinos instalados en las lanchas de instrucción de la ENM, tomando como base dos motores distintos (Caterpillar y MTU) y poniendo el foco en variables directamente observables como son el consumo, el rendimiento operativo y las emisiones medidas en condiciones reales de navegación. El alcance, por tanto, no persigue describir en detalle todo el sistema propulsivo, sino evaluar de forma práctica cómo se comportan los motores cuando la lancha trabaja en diferentes regímenes. Para cumplir con el objetivo, se tomarán datos de los motores durante las salidas a la mar de las lanchas.

Ahora bien, este planteamiento también impone limitaciones. La primera es inherente al entorno. En una navegación real intervienen factores difíciles de controlar como el estado de la mar, el viento, la corriente o la carga, entre otros, que pueden desplazar el punto de funcionamiento del motor aun manteniendo un régimen similar. La segunda limitación está asociada a la instrumentación disponible. Cuando se emplean analizadores portátiles y lecturas a bordo, la exactitud puede verse afectada por condiciones ambientales y por restricciones del propio equipo, y además las emisiones suelen obtenerse como concentraciones (ppm, %) que no siempre se traducen directamente a magnitudes normalizadas sin información adicional del motor y del punto de carga.

1.5 Estructura de la memoria

La memoria se organiza de forma progresiva, de lo general a lo particular, empezando por el planteamiento del problema y terminando por la interpretación de resultados.

- **Capítulo 1** introduce el trabajo, presenta el contexto, la motivación y los objetivos, y delimita el alcance del estudio.
- **Capítulo 2** reúne el estado del arte, que proporciona la base técnica necesaria para interpretar lo que se medirá y comparará: motores diésel marinos, parámetros de funcionamiento y consumo, así como el marco normativo relacionado con emisiones y la adquisición de datos en embarcaciones.
- **Capítulo 3** describe el desarrollo del TFG, explicando la plataforma de estudio, las dos lanchas analizadas y sus motores, la instrumentación empleada y la metodología seguida para registrar y tratar los datos.
- **Capítulo 4**, donde se presentan datos de los motores y su discusión comparativa (funcionamiento), de forma que pueda apreciarse cuáles son las diferencias.
- **Capítulo 5**: se presentan los resultados y su discusión comparativa (emisiones y consumos), de forma que pueda apreciarse sus diferencias en operaciones reales.
- **Capítulo 6** compila la bibliografía utilizada y, como complemento, los anexos reúnen material adicional (tablas, datos, consideraciones y documentación de apoyo).

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Motores diésel marinos

En el ámbito naval, los motores diésel marinos, son motores de combustión interna concebidos para trabajar de manera prolongada y estable en entornos exigentes, debido, no solo por la continuidad de su servicio sino también por las condiciones en las cuales son instalados y operados. Una de sus principales características, a la hora de su diseño y validación, es la idea de la operación continua, motores desarrollados para sostener cargas elevadas durante largos periodos de operaciones y con unos márgenes de fiabilidad acordes a su uso.

Para hablar de estos motores, hay que hacer una diferenciación, dado que en un buque coexisten diferentes tipos de motores diésel. Por un lado, están los motores principales, que se encargan de entregar la potencia a la hélice a través del eje, y por otro los motores auxiliares, cuya función es accionar los generadores eléctricos para los servicios de a bordo.

Muchos de los sistemas de propulsión de los buques, cuentan con motores diésel, desde pequeños barcos de uso recreativo, hasta grandes barcos dedicados al transporte de mercancías, con rangos de potencia muy variados, lo que da una idea de su gran versatilidad y de la variedad de configuraciones existentes.

Estructuralmente, un motor diésel se organiza alrededor de un bloque resistente que actúa como base y soporte del conjunto: la bancada, junto con los elementos que cierran y conforman el cárter, proporciona la rigidez necesaria para absorber pesos y esfuerzos y servir de apoyo al resto de componentes. Sobre esa estructura se monta el conjunto del cilindro, camisa y culata, y el tren alternativo, donde el pistón transmite el empuje de la combustión a través de la biela hasta el cigüeñal, que gira apoyado en sus cojinetes. Para que el ciclo se produzca de manera ordenada, interviene el sistema de distribución, el árbol de levas y su mecanismo asociado, encargado de coordinar con precisión los instantes de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape [1].

Alrededor de esta mecánica se integran los circuitos auxiliares que hacen viable el funcionamiento continuo del motor: el sistema de inyección que dosifica y pulveriza el combustible, los conductos de admisión y escape que gestionan la entrada de aire y la evacuación de gases, los sistemas de refrigeración que controlan la temperatura de los elementos sometidos a mayor carga térmica y el sistema de lubricación, donde el aceite se almacena en la parte baja del cárter y se impulsa mediante bomba para alimentar el engrase del motor [1].

En términos de funcionamiento, el proceso puede explicarse de forma general como un ciclo. El cilindro se llena de aire, el cual es comprimido, alcanzando altas temperaturas. Antes de finalizar la compresión, el combustible es inyectado de forma pulverizada, que, al entrar en contacto con el aire caliente, se auto enciende por lo que la presión aumenta y el pistón es impulsado, entregando el trabajo

al cigüeñal. Repitiéndose de manera continuada [2]. Para interpretar este proceso desde un punto de vista termodinámico se emplea el ciclo Diésel ideal tal y como se observa en la Figura 2-1, que no pretende reproducir cada detalle del motor real, sino ofrecer un modelo sencillo con el que entender de dónde provienen el trabajo y la eficiencia. En ese ciclo ideal se supone un gas ideal (aire) y se simplifican la combustión y el escape como procesos equivalentes de adición y rechazo de calor, despreciando, entre otras cosas, el intercambio de gases real y las pérdidas térmicas a las paredes. Bajo estas hipótesis, el ciclo se compone de cuatro transformaciones reversibles: una compresión isentrópica, un aporte de calor a presión aproximadamente constante, una expansión isentrópica y un rechazo de calor a volumen constante para cerrar el ciclo.

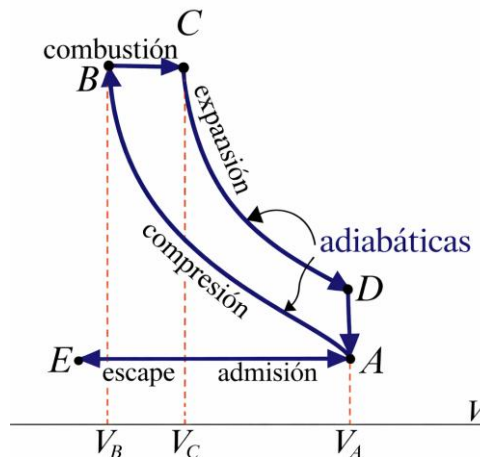


Figura 2-1 Ciclo Diésel ideal [3]

2.1.1 Tipología de los motores marinos diésel

La clasificación de los motores diésel empleados en el ámbito naval no debe entenderse solo como una cuestión de potencia, sino que, además, está determinada por la necesidad de contar con un sistema de propulsión acorde con la misión del buque, su modo de operación, las restricciones de espacio y peso, y las exigencias de disponibilidad operativa.

En el entorno naval, hablar de un tipo concreto de motor no significa limitarse a un único criterio, sino analizar un conjunto de factores que, combinados, dan lugar a distintas familias de motores. Aspectos como el ciclo de funcionamiento, la disposición mecánica, el régimen de giro, la tarea que debe cumplir a bordo o el modo en que trabaja a lo largo del tiempo son determinantes. A estos se suma, con una importancia creciente, el tipo de combustible empleado y la forma de adaptarse a las normas de emisiones. Todos estos elementos están estrechamente relacionados entre sí, de modo que la elección de una característica concreta suele condicionar de manera directa el resto del diseño.

La división entre motores diésel de dos y de cuatro tiempos en el ámbito naval responde a planteamientos de propulsión diferentes, asociados a las necesidades concretas de cada tipo de buque. Los motores de dos tiempos de gran cilindrada, normalmente con diseño de cruceta y destinados a altas potencias, se han consolidado en los grandes buques de navegación oceánica, como petroleros o grandes portacontenedores. Su capacidad para generar un elevado par a muy bajas revoluciones permite el acoplamiento directo a la hélice [4], sin necesidad de reductora, de modo que esta gira al mismo régimen que el motor, que además coincide con su punto de funcionamiento más eficiente. Esta configuración resulta especialmente adecuada para buques que realizan travesías largas y continuas, donde el consumo de combustible y la eficiencia del sistema propulsor son factores determinantes. Por ello, estos motores están optimizados para trabajar a carga sostenida durante largos periodos y con programas de mantenimiento adaptados a campañas de operación prolongadas.

Por el contrario, los motores de cuatro tiempos predominan en buques que requieren mayor flexibilidad operativa o donde la planta propulsora se concibe con varios motores en paralelo, ya sea para propulsión mecánica mediante reductora o para generación eléctrica en configuraciones diésel-eléctricas. Este tipo de motores es habitual en cruceros, ferris, buques militares o remolcadores [4], donde, además de la potencia instalada, influyen de forma decisiva el espacio disponible, la distribución de pesos, los niveles de ruido y vibraciones, y la necesidad de operar con regímenes variables. Su mayor densidad de potencia y menor altura los hacen más adecuados para este tipo de plataformas.

También es frecuente encontrarlos en buques que requieren alta maniobrabilidad en puerto o durante operaciones de posicionamiento [4], trabajando junto a hélices de paso controlable u otros sistemas que permiten variar el empuje sin depender únicamente del régimen de giro. En este contexto, la aportación del motor de cuatro tiempos es doble: por un lado, su compacidad facilita el diseño de la planta; por otro, su integración con reductoras y sistemas de control permite responder con mayor agilidad a perfiles de demanda cambiante.

Por otro lado, los motores de 4 tiempos predominan allí donde los buques necesitan una mayor flexibilidad en el desarrollo de sus operaciones o donde la planta es diseñada con varios motores en paralelo ya sea para la propulsión mecánica con reductora o para la generación eléctrica en configuraciones diésel-eléctricas. En buques como pueden ser cruceros o ferris [4], además de la potencia necesitada, también influyen de forma crítica el espacio disponible, la distribución de los pesos, así como el ruido o las fuertes vibraciones y el hecho de que el barco alterna sus maniobras con periodos de régimen variable. Una mayor densidad de potencia y la menor altura de los motores los hacen más atractivos para este tipo de buques. Asimismo, es también habitual encontrárselos en buques que demandan una alta maniobrabilidad en puerto o en operaciones de posicionamiento junto con hélices de paso controlable u otros sistemas de propulsión que permitan adaptar el empuje sin depender de la variación del régimen de giro. La contribución del motor de cuatro tiempos es por tanto doble, por un lado, su compacidad facilita el diseño; por otro lado, su integración con reductoras y sistemas de control permiten operar con agilidad frente a perfiles de demanda diferentes.

Si se atiende a otros criterios de clasificación, el régimen de giro aparece como uno de los factores más determinantes, ya que establece una relación directa con el tipo de buque y su forma de operar. Los motores lentos, que normalmente trabajan por debajo de las 300 rpm, se emplean en buques de gran desplazamiento destinados a navegación oceánica, donde se busca obtener la máxima eficiencia a velocidad de servicio y garantizar un funcionamiento continuo y fiable durante largos periodos [5].

En un escalón intermedio se sitúan los motores de velocidad media, que abarcan aproximadamente desde las 300 hasta las 1.000 rpm [5]. Estos se utilizan en una gran variedad de buques, como cruceros, ferris, remolcadores o unidades de apoyo, ya que ofrecen un compromiso equilibrado entre densidad de potencia, tamaño de la instalación y capacidad de adaptación a variaciones de carga.

Por último, los motores de alta velocidad se destinan a buques en los que el peso y el volumen son factores críticos, y donde se requiere una elevada potencia específica junto con una respuesta rápida del sistema propulsor. Este es el caso de patrulleras rápidas, embarcaciones policiales o lanchas de salvamento las cuales necesitan que el motor proporcione compacidad y aceleración, aunque el diseño operativo asume que gran parte del tiempo se trabajará con regímenes variables y no a plena carga sostenida.

Esto enlaza con otro criterio fundamental dentro de la tipología de motores navales, el perfil de carga y el rating de servicio. En este ámbito, un mismo modelo de motor puede ofrecer distintas potencias nominales según el tiempo que se prevea que opere a plena carga o cerca de ella, ya que el dimensionamiento térmico y la vida útil dependen directamente del ciclo real de funcionamiento.

Los buques de alta velocidad requieren motores capaces de suministrar aumentos de potencia de forma rápida y repetida, sin que necesariamente deban mantener ese régimen de manera continua durante largos periodos. Esto conduce a configuraciones en las que se prioriza una elevada potencia específica,

recurriendo a sobrealimentaciones más intensas y a sistemas de control avanzados que regulan con precisión la inyección de combustible y el suministro de aire en función de la carga. Gracias a ello, el motor puede responder con mayor rapidez a las demandas de potencia.

Sin embargo, este planteamiento implica que el motor funcione a regímenes de giro elevados, lo que hace imprescindible el uso de una reductora para adaptar las revoluciones al régimen óptimo de la hélice. Además, al trabajar con cargas específicas más altas, el sistema requiere un control más estricto de las temperaturas, una refrigeración eficaz y programas de mantenimiento más exigentes para asegurar la fiabilidad a lo largo del tiempo.

Otro ejemplo de clasificación, que cada día es más decisivo, es el cumplimiento normativo de las emisiones y su impacto en la arquitectura del motor y del buque. La Organización Marítima Internacional (IMO) y el Convenio MARPOL establecen unos requisitos del control de óxidos de nitrógeno (NOx) aplicados a motores diésel navales. Estos límites se clasifican en *tiers* en función de la fecha exacta de construcción del buque y del régimen nominal del motor [6] (Tabla 2-1). Esto conlleva a que la selección del motor ya no dependa solo de factores como el consumo específico o de potencia, sino de la selección de un motor que cumpla con los requisitos según si operará o no en una Zona de Control de Emisiones designadas para NOx, también llamadas ZCE o ECA [6]. Un buque que opera con frecuencia en zonas ECA, o en rutas costeras intensivas, presenta la necesidad de cumplir con el reglamento sin sacrificar disponibilidad.

Nivel/Tier	Fecha de construcción del buque a partir de	n < 130 (g/kWh)	n = 130 -1999(g/kWh)	n ≥2000 (g/kWh)
I	1 de enero de 2000	17,0	$45 \cdot n^{(-0,2)}$ - Ej.: n = 720 rpm → 12,1	9,8
II	1 de enero de 2011	14,4	$44 \cdot n^{(-0,23)}$ - Ej.: n = 720 rpm → 9,7	7,7
III	1 de enero de 2016	3,4	$9 \cdot n^{(-0,2)}$ - Ej.: n = 720 rpm → 2,4	2,0

Tabla 2-1 Límites IMO de NOx (Tier I–III) según régimen del motor [6]

En la Tabla 2-1 de la Regla 13 de la IMO se fijan los límites máximos de emisión de NOx en g/kWh para motores diésel marinos según dos factores: el Tier aplicable por la fecha de construcción del buque y la velocidad nominal del motor, n, en rpm. Cuanto más reciente es el Tier, más estrictos son los límites, y para motores de velocidad intermedia el valor permitido se calcula con una fórmula en función de las rpm.

Por último, dentro de la tipología de motores diésel navales, debe incorporarse una visión de sistema en donde el motor no es solo un generador de par sino un sistema integrado en una plataforma de control y mantenimiento. A medida que los buques se desarrollan, las tripulaciones se reducen por lo que surge la necesidad de automatizar el control y la vigilancia de estos sistemas propulsores, permitiendo así la disponibilidad de estos.

2.1.2 Aplicación en lanchas de pequeño y medio porte

La presencia de motores diésel en lanchas de pequeño y mediano tamaño responde a la necesidad de concentrar una potencia elevada en espacios reducidos, sin renunciar a la capacidad de adaptarse a cambios rápidos de carga y a un rendimiento adecuado durante las horas de operación. En este tipo de embarcaciones, la propulsión está sometida a transitorios constantes: aceleraciones, reducciones de velocidad, cambios de rumbo, maniobras y navegación en condiciones de mar variables. Por este motivo, el motor más apropiado no es únicamente el que ofrece una alta potencia, sino aquel capaz de soportar ese ciclo de servicio real manteniendo la durabilidad, el consumo y la seguridad dentro de márgenes aceptables.

La primera adaptación fundamental consiste en dimensionar el motor según el perfil de misión y en seleccionar adecuadamente el régimen de servicio o *rating*. El *rating* es definido como una combinación entre la potencia nominal, el factor de carga y el porcentaje de tiempo admisible a plena potencia, con el objetivo de evitar exigencias superiores a las previstas para el uso real del motor.

Este criterio cobra especial relevancia en las lanchas, donde, aun teniendo la misma potencia instalada que otros buques, el motor suele operar a regímenes relativamente elevados y con variaciones de carga frecuentes, ya sea por efecto del oleaje o de las maniobras. Estas condiciones afectan directamente a los componentes térmicos y mecánicos si el motor ha sido dimensionado para un servicio intermitente, por lo que la elección correcta del *rating* resulta decisiva para garantizar la durabilidad y el buen funcionamiento del conjunto propulsor [7].

Otro aspecto determinante es la forma en que el motor se integra con el tren propulsor. En el caso de las lanchas, el régimen de giro del motor no suele coincidir con el requerido por el elemento propulsivo, por lo que es necesario adaptar ambas partes para que trabajen de manera coordinada. Cuando la propulsión se realiza mediante hélice y línea de ejes, los motores diésel de cuatro tiempos, que funcionan a altas revoluciones, necesitan una reductora que disminuya ese régimen hasta el intervalo más adecuado para la hélice.

El dimensionamiento del conjunto se realiza de manera que, a plena carga, el motor pueda alcanzar su régimen nominal sin verse sometido a esfuerzos excesivos. De este modo, la correspondencia entre las características del motor y la carga hidrodinámica que introduce la hélice se convierte en un criterio central durante la selección del sistema propulsor, ya que de ella dependen tanto el rendimiento como la fiabilidad del conjunto.

Este acoplamiento no influye únicamente en el rendimiento, sino que también tiene un efecto directo sobre las vibraciones, el nivel de ruido y la fiabilidad del conjunto propulsor [8]. En embarcaciones rápidas, la hélice puede entrar en cavitación cuando se trabaja bajo condiciones desfavorables de presión o carga sobre las palas, lo que se traduce en pérdidas de rendimiento, incremento de vibraciones y mayores solicitaciones estructurales. Por este motivo, existen procedimientos técnicos de referencia destinados a estudiar la cavitación en ensayos y a documentar sus distintos patrones de manera sistemática y comparable [8].

En lanchas rápidas y de misión específica, la adaptación del diésel puede darse también con propulsores alternativos como el *waterjet*, especialmente cuando se priorizan maniobrabilidad, operación en poco calado y seguridad, al carecer de una hélice externa [9]. El *waterjet* (Figura 2-2) se aplica con frecuencia en embarcaciones rápidas y pequeñas, debido a su principio de funcionamiento con tobera, dirección por boquilla y reversa por *bucket*, así como la mejora de maniobra mediante instalación en pares [10]. Este tipo de sistema propulsivo cuenta con ventajas prácticas como alta maniobrabilidad a baja y alta velocidad y resistencia a cavitación en el impulsor, además de una aceleración elevada, lo que casa a la perfección con los perfiles típicos de misión de lanchas [9]. En estudios comparativos, se analiza la viabilidad y la eficiencia relativa de *waterjet* frente a propulsión convencional en distintos rangos de velocidad, lo cual refuerza que la elección del propulsor debe justificarse por misión y velocidad objetivo [11].



Figura 2-2 Waterjet en los buques de la clase japonesa Hayabusa [12]

Sobre esta base de integración, los requisitos operativos clásicos de fiabilidad, respuesta y consumo se entienden mejor como propiedades del sistema completo y no del bloque motor aislado.

La fiabilidad en lanchas se construye, primero, evitando operar fuera del rating previsto lo que aumenta temperaturas y fatiga, y, segundo, diseñando una instalación que permita mantenimiento y diagnóstico eficaces. En motores modernos, la electrónica contribuye a esta fiabilidad mediante control más preciso de la combustión y diagnóstico. Un ejemplo claro es la documentación técnica de MTU, importante empresa fabricante de motores, que describe la gestión electrónica del motor como tecnología clave para control inteligente, orientada a reducir consumo y mejorar prestaciones mediante control preciso y evolución de unidades de control (ECU) [13].

La respuesta, entendida como la capacidad de variar empuje de forma rápida y controlable, depende del par disponible, del control de inyección/sobrealimentación y del emparejamiento con el propulsor. La importancia del *matching* se resalta debido a que una hélice mal dimensionada puede impedir al motor alcanzar su régimen nominal o forzarlo térmicamente en transitorios [4].

El consumo, en lanchas, debe leerse como eficiencia en el ciclo real de operación (cruce, maniobra, transitorios), y vuelve a depender del punto de trabajo del motor y del rendimiento propulsivo.

Finalmente, en lanchas, debido a su ligereza frente a otros y mayores aceleraciones, la adaptación del diésel exige especial cuidado en alineación, el soporte del conjunto y las vibraciones.

De forma global, el empleo de motores diésel marinos en lanchas de pequeño y medio porte se entiende, sobre todo, como un reto de integración del sistema propulsivo. No basta con elegir un motor por potencia, hay que seleccionar el rating más apropiado para el perfil de servicio, comparar potencia y consumo en condiciones homogéneas y asegurar un acoplamiento correcto entre motor, reductora y propulsor para evitar cavitación y situaciones de sobrecarga.

2.2 Parámetros característicos del funcionamiento de un motor marino

En un sistema de propulsión naval compuesto por motor diésel, reductora, línea de ejes y hélice, el comportamiento de la embarcación se entiende a partir de un conjunto de magnitudes que relacionan la potencia que el motor puede suministrar con la que el casco y la hélice requieren para superar la resistencia al avance. Estos son los parámetros que vinculan la capacidad del sistema propulsor con las necesidades reales de la navegación y que permiten ver cómo se equilibra el conjunto cuando el buque opera en condiciones reales.

El describir el funcionamiento del motor equivale a definir su punto de operación, el régimen de giro al que trabaja, el par que transmite, la potencia efectiva disponible en el eje y el consumo de combustible necesario para mantener ese nivel de rendimiento. Estos parámetros resultan útiles por una doble razón. Por un lado, permiten conocer el estado del sistema en un momento determinado; por otro, facilitan la comparación entre distintas situaciones operativas. Así, por ejemplo, es posible detectar si el casco presenta suciedad o incrustaciones, ya que cualquier aumento de la resistencia al avance se traduce en una mayor demanda de par o de potencia para mantener la misma velocidad.

A lo largo de este apartado conviene distinguir dos ideas que suelen confundirse. La primera es que el motor no consume según las rpm, sino por potencia demandada y por cómo de eficiente es capaz de producirla en ese punto. La segunda es que las rpm, aun no siendo la causa directa del consumo, son una variable clave porque determinan la velocidad de giro de la hélice y, por tanto, el punto de trabajo del conjunto casco-hélice. Esta dependencia es la base de las curvas características y de los diagramas de carga.

2.2.1 Potencia, par y régimen de giro

La potencia es la tasa a la que se realiza trabajo. En rotación, la potencia mecánica instantánea se expresa como:

$$P = M \cdot \omega \quad (1)$$

donde P es la potencia, M el par y ω velocidad angular. Si se sustituyen unidades y se desea una forma práctica en kW con M en $[\text{N}\cdot\text{m}]$ y n en $[\text{rpm}]$, aparece la expresión (2):

$$P = \frac{M \cdot 2\pi n}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

Esta ecuación (2) explica un comportamiento típico de los motores: se puede tener mucho par a bajas rpm y, sin embargo, no tener tanta potencia, ya que la potencia depende también de la velocidad de giro. Por eso, en muchas curvas de motor, el par máximo aparece en una zona media de rpm, mientras que la potencia máxima suele aparecer cerca del régimen nominal.

Para analizarlo, es necesario diferenciar entre la potencia indicada y la potencia efectiva. La primera representa la energía generada por la combustión dentro del cilindro, es decir, el trabajo teórico producido por los gases sobre el pistón. La potencia efectiva, en cambio, es la que finalmente se obtiene en el cigüeñal y puede transmitirse al eje propulsor, una vez descontadas las pérdidas debidas a los rozamientos internos y al accionamiento de los sistemas auxiliares del motor. La relación entre ambas se expresa mediante el rendimiento mecánico, que indica qué parte de la energía generada en el interior del cilindro llega realmente a convertirse en potencia útil [14].

Esta distinción resulta fundamental para interpretar el comportamiento de los motores en servicio, ya que permite comprender que dos máquinas con la misma potencia disponible en el eje no tienen por qué presentar el mismo consumo ni las mismas prestaciones. Las diferencias en el diseño, en las pérdidas internas o en la eficiencia del proceso de combustión pueden hacer que, aun entregando la misma potencia efectiva, uno de los motores necesite más combustible que el otro para conseguirla [14].

El par motor o momento torsor es la capacidad de giro que el motor ejerce sobre el eje. Representa el efecto de una fuerza aplicada con un brazo de palanca y se mide en $\text{N}\cdot\text{m}$. El par es la magnitud que equilibra o supera el par resistente del sistema. Cuando el par del motor es mayor que el par resistente,

el conjunto tiende a acelerar; si es menor, tiende a decelerar. Esta visión es especialmente útil en marina, porque el par resistente de la hélice cambia con el estado de mar, el ensuciamiento y la velocidad.

El régimen de giro del motor se expresa normalmente en revoluciones por minuto [rpm] y describe cuántas vueltas da el cigüeñal en un minuto.

2.2.2 Curva característica del motor

Las variables anteriores cobran sentido cuando se representan como curvas características. La más clásica es la curva par-régimen y su correspondiente curva potencia-régimen. Como la potencia depende del par y de la velocidad angular, la forma típica es que el par alcance un máximo en una zona intermedia y, aun cuando el par comience a caer, la potencia puede seguir aumentando hasta el régimen nominal. Esta interpretación del par y la potencia resulta clave para entender por qué el motor ofrece mayor capacidad de empuje en ciertos regímenes y alcanza velocidades más altas en otros.

En aplicaciones marinas aparece además un concepto decisivo, la curva de demanda de la hélice. Para las hélices de paso fijo (FPP) y condiciones razonablemente similares, se emplea la llamada ley cúbica, la potencia absorbida por la hélice por lo que esta demanda propulsiva aumenta aproximadamente con el cubo del régimen de giro. Esta idea se utiliza en arquitectura naval para describir la curva de toma de potencia del conjunto del buque y la hélice. El motor no funciona en un punto arbitrario, sino en aquel donde la potencia que puede entregar se iguala con la que exige la hélice para una determinada posición de control. Por eso la comparación entre la curva de potencia disponible del motor y la curva n^3 de la hélice permite analizar si existe margen suficiente, como puede ser para evitar sobrecargas, y cómo se desplaza el punto de operación cuando cambian las condiciones (Figura 2-3).

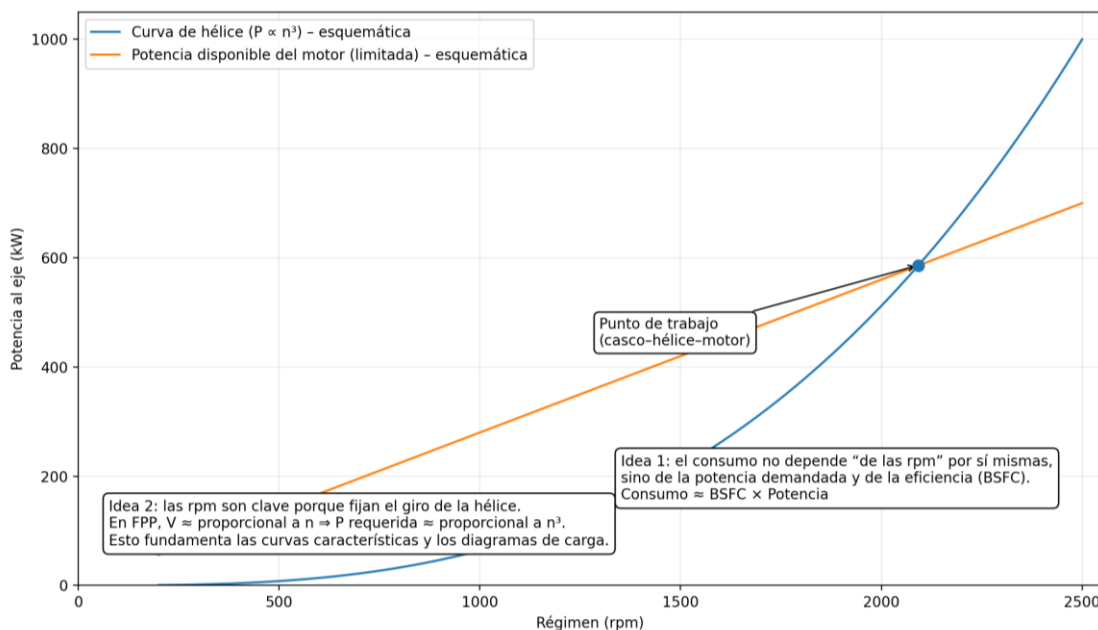


Figura 2-3 Ejemplo relación entre rpm, carga propulsiva y consumo (elaboración propia)

También se suele representar la curva de consumo específico frente al régimen y la carga. En motores térmicos aparece una zona de mejor rendimiento, menor consumo específico, que, de forma general, se sitúa alrededor de regímenes próximos a la zona de par elevado y con carga significativa; fuera de esa zona, el consumo específico empeora [15].

2.2.3 Factores que influyen en el consumo real

El consumo de combustible no depende únicamente del motor, sino del conjunto del motor, del propulsor, del buque y de su entorno. Una primera familia de factores es puramente operativa, el punto de carga y el régimen seleccionados. Como el consumo específico varía con el punto de funcionamiento, mantener el motor lejos de la zona de mejor rendimiento suele traducirse en mayor consumo por kWh útil.

Otro grupo de factores que explica la diferencia entre el consumo real y el valor indicado en el catálogo está relacionado con las condiciones en las que el fabricante obtiene esos datos. Las cifras de potencia y consumo se determinan bajo unas condiciones de referencia bien definidas, que incluyen ciertos valores de temperatura ambiente, presión atmosférica y características de los sistemas de admisión y escape. Estas condiciones de referencia no son en las que opera siempre el motor. Cambios como un aire de admisión más caliente, mayores pérdidas de carga en el filtro o en el escape, o temperaturas más elevadas del agua de refrigeración alteran el funcionamiento del motor. Por ello, aunque el régimen de giro sea el mismo, el consumo puede diferir del valor nominal proporcionado por el fabricante.

Una tercera familia corresponde al combustible. Propiedades como densidad y poder calorífico condicionan cuánta energía se introduce por unidad de masa o volumen, y por tanto pueden desplazar el consumo volumétrico a igualdad de potencia demandada.

Finalmente, en el ámbito marítimo hay una fuente relevante, las resistencias del buque (estado del casco, oleaje, viento, corriente) y su efecto en la demanda de potencia. Es por ello por lo que el mismo nudo de velocidad puede exigir más potencia si la resistencia aumenta, y eso desplaza el punto de trabajo del motor hacia zonas de mayor consumo. Al combinar consumo y par con datos de navegación y meteorología, se puede inferir el efecto de factores como el estado del casco y determinar velocidades óptimas para optimizar costes de combustible.

2.3 Consumo de combustible en motores marinos

El consumo de combustible es uno de los parámetros más relevantes para evaluar el comportamiento de un motor marino porque conecta directamente con la autonomía, los costes operativos y, de forma indirecta, con las emisiones de CO₂ asociadas a la operación del buque. En el ámbito marítimo, además, el consumo se maneja con distintas métricas ya sea por unidad de tiempo, por unidad de potencia útil y por unidad de distancia recorrida, ya que cada una sirve para responder a preguntas diferentes: cuánto quema el motor en un régimen concreto, cuán eficiente es transformando energía química en potencia de eje, o cuánto combustible se necesita para recorrer una milla náutica a una velocidad dada.

2.3.1 Consumo horario

La norma ISO 3046 define el consumo de combustible como la cantidad de combustible consumida por un motor por unidad de tiempo, a una potencia indicada y bajo unas condiciones ambientales declaradas; y establece que, para combustibles líquidos, esa cantidad puede expresarse en unidades de masa [kg] o en unidades de energía [J] [16]. Esta precisión es importante porque, aunque a bordo muchas veces se hable en litros/hora, las comparaciones técnicas y las bases de cálculo suelen apoyarse en la masa, ya que evita errores debidos a variaciones de densidad por temperatura o por tipo de combustible.

En una operación, la estimación más directa del consumo horario parte de la relación entre la potencia efectiva demandada y el consumo específico del motor. Si se conoce la potencia [kW] y el SFOC (Consumo Específico de Combustible) [g/kWh], el consumo horario en masa se obtiene multiplicando ambos [17].

Cuando el consumo se expresa en volumen [L/h], aparece la necesidad de convertir entre caudal volumétrico y caudal másico, siendo el caudal másico igual a la multiplicación del caudal volumétrico

por la densidad. Este vínculo entre masa, densidad y volumen es una consecuencia directa de la conservación de masa y de la definición física de densidad en un flujo.

En cuanto a cómo se mide o registra el consumo, organizaciones internacionales han consolidado metodologías que también son representativas para campañas de medición a bordo, el sistema de recogida de datos de la OMI obliga a recopilar consumos y exige definir una metodología de recopilación, y en la divulgación sectorial se recogen como métodos habituales la combinación de notas de entrega de combustible con lecturas de tanques, el uso de medidores a bordo o el seguimiento periódico del tanque.

Por último, conviene subrayar que el consumo horario no es solo una propiedad del motor, sino del conjunto propulsivo y de la condición de operación, a igualdad de motor, la potencia requerida y, por tanto, el kg/h puede variar mucho con resistencia al avance, con el estado del casco o de la hélice o las condiciones de mar [17].

2.3.2 Consumo específico y consumo por distancia

El consumo específico de combustible, que se suele expresar en g/kWh, se utiliza para cuantificar la eficiencia con la que un motor transforma combustible en energía mecánica útil, y se define como el consumo de combustible por unidad de potencia efectiva obtenida [17].

Una característica importante es que el consumo específico varía con el punto de operación (régimen y carga), encontrándose el mínimo consumo específico en torno a zonas cercanas al par máximo, al coincidir condiciones favorables de llenado y rendimiento, lo que explica por qué no todos los puntos de operación son igual de eficientes, aunque el motor funcione correctamente.

El consumo por distancia, en cambio, traslada el problema desde el motor a la misión del buque: no interesa solo “cuánto quema por hora”, sino “cuánto quema para recorrer una milla”. Operacionalmente, si se conoce el consumo horario y la velocidad, el combustible por milla náutica se obtiene como cociente.

2.4 Normativa aplicable a motores marinos y emisiones contaminantes

La regulación de los motores diésel marinos se organiza en dos ámbitos. En primer lugar, existe un marco internacional que fija los límites de emisión y los procedimientos de certificación y control a bordo. En segundo lugar, determinadas normas regionales, especialmente en el contexto europeo, introducen requisitos adicionales en función del tipo de buque y de la zona en la que opera. El cumplimiento de esta normativa no se limita a respetar unos valores máximos de emisiones, sino que también implica la realización de ensayos normalizados, la disponibilidad de la documentación técnica del motor, las inspecciones periódicas y, en muchos casos, decisiones operativas relacionadas con el combustible utilizado o con la aplicación de métodos equivalentes de reducción de emisiones. En el caso de los buques militares, estos no suelen estar sometidos al mismo régimen normativo que los buques comerciales, ya que con carácter general quedan exentos de la aplicación de MARPOL prevista para la marina mercante, aunque, según el país, suelen procurar ajustarse a este marco normativo de la forma más fiel posible.

2.4.1 Normativa internacional sobre emisiones en el ámbito marítimo

Los motores diésel marinos, tanto principales como auxiliares, se encuentran regulados por el marco que manda a escala internacional la OMI (Organización Marítima Internacional) a través del Convenio MARPOL, concretamente su Anexo VI, que fija reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques. Esta regulación condiciona el diseño, la certificación y la explotación del motor, porque convierte parte de la ingeniería del motor en la necesidad de cumplir los límites numéricos, ensayos estandarizados, documentación a bordo y controles por el Estado de abanderamiento [18].

En este contexto, los contaminantes regulados de forma directa por el Anexo VI que a su vez son los que más impactan en motores diésel, son los NO_x (óxidos de nitrógeno), estipulado en la regla 13, y los SO_x (óxidos de azufre), además de la materia particulada, partículas sólidas y pequeñas gotas que salen con los gases de escape como resultado de una combustión que no ha sido completamente homogénea, regulados en la regla 14.

Para los NO_x, la OMI estipula el control a través del propio motor mediante el reconocimiento, la certificación y el seguimiento, que exige que cada motor diésel certificado disponga a bordo de un Expediente Técnico aprobado sometiéndose posteriormente a un régimen de inspecciones y documentando las modificaciones [6]. Este enfoque es determinante para entender por qué el cumplimiento se integra desde la fase de diseño del motor y no solo como una medida tras la instalación completa del motor.

La verificación de la conformidad en NO_x se apoya en el Código Técnico sobre los NO_x 2008 [19], que establece normas sobre los motores diésel marinos con el objetivo de asegurar el cumplimiento de los límites de la Regla 13 del Anexo VI. Este Código es relevante para “motores marinos en general” porque estandariza cómo se demuestra el cumplimiento, qué documentación es obligatoria y cómo se controla que el motor siga siendo conforme tras modificaciones o ajustes.

En relación con los SO_x y partículas, se basa principalmente en el combustible, los controles se aplican a los equipos y dispositivos de quema de combustible, incluyendo motores principales y auxiliares, y establecen límites de contenido de azufre en él, con exigencias más estrictas dentro de las Zonas de Control de Emisiones (ZCE o ECA) como el Báltico o el Mar del Norte (Figura 2-4) [20], o en la futura ECA del Atlántico Norte, en abril de 2026. Esto afecta a la explotación del motor porque obliga a planificar suministro y procedimientos de cambio de combustible.



Figura 2-4 Zonas ECA en 2025 [6]

2.4.2 Límites de emisiones para motores diésel marinos

En motores diésel marinos, los límites que más condicionan el diseño y la explotación son los parámetros asociados a los NO_x y SO_x y partículas, porque están directamente vinculados a la combustión y al combustible empleado. A escala internacional, la OMI fija los límites de NO_x en la Regla 13 del Anexo VI de MARPOL mediante un sistema escalonado por niveles (Tier I, Tier II y Tier III) que depende, entre otros factores, de la fecha de construcción del buque y del régimen nominal del motor, expresándose el límite en g/kWh con valores diferentes según el rango de revoluciones [6].

El sistema “Tier” es relevante para entender estos motores dado que obliga a considerar el cumplimiento como una combinación del motor, el área de operación y la fecha de construcción del buque. El Tier III, por ejemplo, no es una exigencia universal en todo el mundo, sino que se activa para determinados buques cuando operan en Zonas de Control de Emisiones (ECA) designadas, mientras que fuera de esas zonas el marco habitual aplicable a buques nuevos es el Tier II. Además, la OMI indica que el valor de emisiones debe determinarse conforme al Código Técnico sobre los NOx 2008, que estandariza la forma de medir, documentar y verificar la conformidad del motor con los límites exigidos.

Para SOx y materia particulada, el control se materializa principalmente mediante límites al contenido de azufre del fuelóleo. La OMI establece el límite general del 0,50% m/m (fuera de ECA) desde el 1 de enero de 2020, mientras que dentro de las ECA rige un límite más estricto del 0,10% m/m [20]. Esta regulación afecta a motores diésel marinos de forma muy directa, porque condiciona qué combustibles pueden usarse, cómo se gestionan cambios de combustible y, en consecuencia, cómo se planifica la operación del buque. La propia OMI recoge que los buques que navegan dentro y fuera de ECA suelen utilizar combustibles distintos y que, antes de entrar en una ECA, debe haberse completado el cambio al combustible conforme, aplicando a bordo un procedimiento por escrito que describa cómo se realiza el cambio, así como el registro de cantidades, fecha, hora y posición del buque durante la operación. Esto es importante porque convierte el cumplimiento en una obligación no solo técnica, sino también documental y verificable en inspecciones.

Cuando el cumplimiento según la selección del combustible no es la opción elegida, el Anexo VI permite otro tipo de métodos autorizados. La OMI distingue entre métodos: los primarios, dentro de los cuales se busca evitar la formación del contaminante, y secundarios, donde sí se forma el contaminante, pero este es reducido antes de que sea descargado [20]. De este modo, el cumplimiento de SOx/PM puede lograrse por combustible o por equivalentes aprobados, con implicaciones diferentes en costes, mantenimiento y operación.

Este marco se ha vuelto especialmente relevante en el entorno español por la entrada en vigor de la Med SOx ECA. La OMI confirma que el Mar Mediterráneo se convirtió oficialmente en zona de control de emisiones de azufre el 1 de mayo de 2025, aplicándose en la zona el límite del 0,10% de azufre en el combustible, lo que eleva de forma inmediata la exigencia sobre el combustible para cualquier buque que opere en el Mediterráneo.

2.4.3 Normativa europea

En el ámbito europeo, la normativa que impacta en motores diésel marinos puede entenderse desde dos perspectivas complementarias. Por un lado, existen normas orientadas a producto y comercialización en ciertos tipos de buques, como pueden ser las embarcaciones de recreo, que imponen límites de emisiones del motor para poder introducirlo en el mercado o, por otro lado, el desarrollo del seguimiento y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo, que condiciona combustibles, tecnologías y operación.

El contenido de azufre en los combustibles es otra de las medidas en las cuales la UE se implica en el mercado europeo mediante la Directiva (UE) 2016/802, cuyo objetivo es fijar contenidos máximos autorizados de azufre para, entre otros, el gasóleo para uso marítimo y el combustible diésel para uso marítimo utilizados en la Unión Europea reforzando en el ámbito europeo el control sobre la calidad del combustible y, por tanto, sobre SOx/partículas asociadas a motores diésel marinos [21].

El punto de partida europeo específico para el transporte marítimo fue el Reglamento 2015/757 (MRV), que establece el sistema de seguimiento y verificación de emisiones, dedicado a las emisiones de CO₂ en el transporte marítimo hacia puertos europeos, transporte con dirección a ellos o entre ellos y sus emisiones en puerto. Esta medida empuja a una gestión más estricta del consumo de combustible y de la eficiencia energética, porque las emisiones se contabilizan y verifican con metodología común [22].

Además de estas medidas, en los últimos años se han aprobado en la Unión Europea instrumentos con un impacto económico y operativo aún mayor. Destaca, en primer lugar, la inclusión del transporte marítimo en el régimen europeo de comercio de derechos de emisión a través de la Directiva (UE) 2023/959 [23], que convierte la contabilidad de emisiones en una obligación de cumplimiento y en un coste asociado a la emisión de gases de efecto invernadero. De forma complementaria, el Reglamento (UE) 2023/1805 impulsa el uso de combustibles renovables y de baja huella de carbono, condicionando de manera indirecta pero muy significativa la evolución tecnológica de la propulsión naval y, en particular, el papel futuro del motor diésel marino, su compatibilidad con combustibles alternativos y su integración en arquitecturas híbridas.

2.4.4 Aplicación de la normativa en el ámbito militar

En los buques militares el punto de partida jurídico no es el mismo que en la marina mercante, esto se debe a que el MARPOL dibuja una frontera explícita, deja fuera de su ámbito de aplicación a los buques de guerra, a los auxiliares navales y, en general, a los buques estatales empleados únicamente en servicios gubernamentales no comerciales. Esto hace que las obligaciones que el MARPOL exige a los buques mercantes, no opere de manera idéntica cuando hablamos de una unidad militar, aunque en ambos casos la planta propulsora se base en motores diésel marinos.

Esa excepción, sin embargo, no es una carta blanca ambiental. El propio artículo que excluye a los buques militares añade una cláusula de responsabilidad: cada Estado Parte debe adoptar medidas apropiadas para que esos buques actúen de forma coherente con el objetivo del Convenio, siempre que no se menoscaben las operaciones ni la capacidad operativa. Traducido al terreno de los motores diésel, el efecto real es un modelo de cumplimiento por aproximación, puede no existir la misma cadena formal de certificaciones o controles pensada para el tráfico comercial, pero sí una expectativa normativa de reducir emisiones cuando el contexto operativo lo permita, especialmente en escenarios sensibles como proximidad a costa y entornos portuarios.

En España, ese equilibrio entre prioridad operativa y deber de aproximación se ve con mucha claridad en el Real Decreto 61/2006, que regula, entre otras cuestiones, las especificaciones de combustibles y el contenido de azufre, crítico para limitar SOx. En su régimen general establece que los buques atracados o fondeados en puertos del territorio nacional no pueden utilizar combustibles marinos con más de un 0,10 % de azufre, exige dejar constancia de las operaciones de cambio de combustible y, además, prevé que las autoridades competentes en materia de puertos fomenten el suministro de electricidad desde tierra para buques atracados. Pero, a la vez, incorpora una exclusión expresa para el combustible empleado por buques de guerra y otros buques destinados a usos militares, matizada con la misma idea de fondo: las autoridades deberán tratar de asegurar, mediante medidas que no dañen la operatividad, que esos buques funcionen dentro de lo razonable y práctico en consonancia con el real decreto [24].

A partir de ahí, la aplicación en la Armada se articula principalmente por política interna y gestión, más que por obligación externa de certificación. En el propio BOE se recoge que la política medioambiental del Ministerio de Defensa se apoya, entre otras, en la Directiva 107/97

En el BOE, la Orden DEF/427/2021 recuerda expresamente que la política medioambiental del Ministerio de Defensa se define, entre otras, por la Directiva 107/97 y la Instrucción 56/2011, y formula el compromiso institucional con la protección y mejora del medio ambiente bajo el principio de desarrollo sostenible, siempre compatible con la misión de las Fuerzas Armadas. Esta lógica encaja con el patrón general: no se elimina la exigencia ambiental, sino que se canaliza mediante reglas y sistemas propios, subordinando su intensidad a la viabilidad operativa, pero manteniendo una obligación clara de orientar decisiones técnicas hacia el propósito ambiental cuando sea posible.

2.5 Métodos de adquisición de datos en las embarcaciones

En un barco, los datos se obtienen porque tanto la navegación como la operación del buque dependen de sensores y sistemas que están midiendo continuamente lo que ocurre, dónde está el buque, cómo se mueve, el rumbo que sigue, a qué velocidad avanza y en qué condiciones están trabajando los equipos principales y auxiliares. En los buques actuales, además, muchos de esos sistemas están conectados para que la información de los sensores sea accesible desde estaciones de trabajo en el puente, con el objetivo de gestionar el buque de forma más segura y eficiente [25].

Con esa base, la adquisición de datos suele combinar dos lógicas que conviven en casi cualquier tipo de barco. Por un lado, está el registro operativo, el de toda la vida, que consiste en anotar en un cuaderno o formulario los datos relevantes del viaje, posiciones, rumbos, distancias, condiciones meteorológicas y de la mar, cambios en el plan de viaje, etc. Este registro existe porque, además de ser útil para la operación diaria, es un documento formal que debe permitir reconstruir lo sucedido durante la navegación.

Por otro lado, está el registro automático, que aparece cuando los sistemas del barco guardan información de manera continua o cuando existe un equipo dedicado a conservar lo que pasaba alrededor de una situación relevante. El ejemplo más claro de esta idea, ya muy asentada en la industria, es el Voyage Data Recorder (VDR). El VDR, representado de forma esquemática en la Figura 2-5, un sistema cuya función es registrar y almacenar información relevante de la navegación, de forma similar a una caja negra. En ella se observan la grabeta VDR, la unidad principal y el módulo de energía, conectados a distintos equipos de a bordo como el radar, el VHF, el micrófono, la brújula y el GPS, de los que obtiene los datos que posteriormente pueden reproducirse y analizarse [26].



Figura 2-5 Arquitectura VDR y equipos asociados [27]

En el caso de la planta propulsora y auxiliares, la adquisición suele apoyarse en sistemas de monitorización y control que recogen medidas de sensores distribuidos por el buque y las presentan en pantallas, además de registrar alarmas y tendencias. Es decir, el dato se mide en el equipo y luego se centraliza en un sistema de supervisión.

2.5.1 Influencia del desplazamiento y el estado de la mar

Cuando se mide cualquier parámetro en navegación real ya sea velocidad, consumo, potencia necesaria, entre otros, hay dos factores que tienden a explicar gran parte de las diferencias entre unas salidas y otras, aunque el barco y el régimen del motor parezcan los mismos como la condición de carga (desplazamiento/calado) y el entorno (viento, olas y corriente). La razón es física, la potencia que necesita un buque para avanzar está ligada a la resistencia que el agua opone, y esa resistencia depende de la forma del casco y de su condición de navegación.

El desplazamiento influye porque, al aumentar la carga, el buque suele navegar con más calado, cambiando su superficie mojada por lo que cambian los componentes de resistencia. Eso termina reflejándose en que, para una misma velocidad, se necesita más potencia o, visto al revés, para una misma potencia disponible, se obtiene menos velocidad. Por eso, cuando se quieren comparar resultados entre días distintos o entre buques, no basta con mirar una cifra aislada, hay que saber en qué condición de carga iba el barco.

El estado de la mar y el viento introducen todavía más variabilidad porque añaden también una resistencia y producen pérdidas de velocidad. En oleaje aparece la resistencia añadida en olas, el barco no solo avanza, sino que además se mueve (cabecea, balancea) y pierde energía por esa interacción con el mar, lo que puede traducirse en aumento de potencia requerida y, por tanto, aumento de consumo para mantener la misma velocidad [28].

Por esta razón, cuando se hacen mediciones orientadas a caracterizar rendimiento (por ejemplo, relación velocidad-potencia o consumo-velocidad), se intenta separar dos situaciones. Una es la de condiciones controladas, donde se busca que el entorno afecte lo mínimo posible. El objetivo es determinar el rendimiento del buque en términos de velocidad, potencia y revoluciones bajo condiciones prescritas, y que la influencia del entorno debe minimizarse o corregirse en el análisis.

La otra situación es la operación real, donde lo normal es que el entorno no sea estable ni ideal. En ese caso, la forma correcta de trabajar no es ignorar el mar y el viento, sino registrarlos para poder interpretar resultados. Si un día el barco consume más a igual velocidad, puede deberse a un aumento de resistencia por oleaje, a corriente contraria o a una condición de carga distinta, y sin ese contexto el dato pierde valor comparativo. De hecho, en análisis modernos de rendimiento se utiliza precisamente la combinación de datos de posición y velocidad con datos meteorológicos para entender exposición a condiciones y apoyar decisiones operativas.

Para describir esas condiciones ambientales de forma comprensible y comparable, se suele recurrir a referencias estandarizadas. La escala Beaufort relaciona velocidad media del viento con efectos observables en el mar, y se usa ampliamente en el entorno marítimo. Al igual sucede con el mar, con la escala Douglas, una referencia muy empleada para clasificar el estado de la mar por rangos de altura de ola.

2.5.2 Adquisición y tratamiento de datos de navegación

En un barco, los datos que luego se usan para analizar una navegación o el rendimiento de la propulsión no se crean en un único sitio, sino que salen de muchos sensores y equipos repartidos entre el puente y la cámara de máquinas, y se reúnen en sistemas que los presentan a la dotación y, en muchos casos, también los guardan para poder revisarlos después. En el puente, los sistemas integrados buscan precisamente que la información de navegación (posición, rumbo, velocidad y situación) esté centralizada y disponible para apoyar la decisión durante la guardia; en máquinas ocurre algo parecido con los sistemas de automatización, que concentran medidas, estados, alarmas y tendencias del motor y auxiliares en las estaciones de control [26].

La adquisición suele combinar registro manual y registro automático. El manual aparece cuando se anotan datos relevantes de navegación y de operación (por ejemplo, condiciones meteorológicas, cambios de régimen, incidencias), porque sigue siendo una forma de dejar constancia y de sintetizar

lo importante. El automático aparece cuando los propios sistemas del buque registran de forma continua lo que está pasando, no solo lecturas puntuales, sino también eventos en determinados momentos o alarmas, que permiten ver cómo evolucionan las variables. Este enfoque de registrar de manera secuencial lo que ocurre con el buque y sus equipos está muy alineado con la lógica del VDR, cuyo objetivo es conservar de forma automática y recuperable datos sobre el estado y la salida de equipos del buque, además del mando y control.

Cuando se lleva esta idea al motor, la diferencia clave es que el dato útil casi nunca es una cifra aislada, sino una serie temporal, cómo cambian el régimen, la carga, temperaturas, presiones, alarmas o consumos durante un tramo concreto. Por eso, los sistemas de automatización y monitorización de máquinas suelen registrar puntos de medida y alarmas, de forma que se pueda reconstruir qué pasó (por ejemplo, una subida anómala de temperatura antes de una alarma, o un aumento de carga para mantener velocidad).

En los últimos años, además, el consumo de combustible se ha convertido en una variable muy importante porque ya no interesa solo desde el punto de vista económico, sino también por exigencias de reporte y eficiencia. La IMO describe el sistema de recopilación de datos de consumo de combustible como un marco en el que los buques deben registrar y reportar su consumo, lo que refuerza que medir y consolidar ese dato forma parte de la práctica real en muchos barcos [29]. En ese contexto, es habitual que el consumo se obtenga a partir de registros de operación con consumos diarios, o mediante medición más directa en líneas de combustible.

El tratamiento de datos es lo que convierte todo lo anterior en resultados comparables. En navegación y en motor, el primer paso suele ser ordenar y sincronizar, asegurar que tiempos, tramos y eventos coinciden (porque no se debe comparar velocidad media de un tramo con consumos tomados en otro tramo). Después se filtra lo que no representa un estado estable, cuando buscamos esa velocidad media, como maniobras, aceleraciones, cambios fuertes de rumbo o periodos con mar muy variable tienden a distorsionar medias y relaciones como consumo-velocidad o rpm-velocidad. Por último, se revisa la calidad del dato (valores imposibles, sensores con deriva, saltos) y se corrigen o excluyen tramos, porque en la práctica los datos operacionales de buques suelen necesitar depuración antes de usarse para modelos o comparaciones de rendimiento.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción general del estudio

En el presente estudio se realizará una comparación técnica de sistemas de propulsión en lanchas de instrucción, con el objetivo de analizar su comportamiento en condiciones reales de navegación y evaluar cómo este se refleja en el consumo, las emisiones de escape y la eficiencia global del sistema. Este planteamiento en condiciones operativas es coherente con metodologías ya empleadas en trabajos previos sobre lanchas de instrucción [30], donde la caracterización se apoya en la toma de datos durante navegación y en la medición directa de gases de escape con instrumentación portátil, complementando con el registro de parámetros de máquina para interpretar los resultados.

El banco de estudio lo constituyen las Lanchas de Instrucción (LLII) (Figura 3-1) empleadas para el adiestramiento a flote, cuyo empleo se encuentra programado dentro de una planificación semanal. Estas lanchas de instrucción realizan salidas todos los martes, miércoles y jueves, si la meteorología lo permite, y además realizan otras salidas extraordinarias de una mayor duración llamadas nocturnas y pernoctas. Este patrón repetitivo resulta muy valioso a la hora de la recogida de datos al ser salidas en condiciones similares.



Figura 3-1 Lanchas de Instrucción atracadas al muelle Almirante Vierna (fuente propia).

Este trabajo analizará, por un lado, los parámetros obtenidos del motor Caterpillar C18; y por otro, los del MTU, concretamente un motor de la serie 2000 (10V2000M84) ampliamente orientado a

aplicaciones de embarcaciones rápidas y de patrulla. Esta aproximación permite comparar tendencias de eficiencia.

Para que la comparación tenga sentido, el estudio integrará el registro de variables de funcionamiento del motor y del sistema de control. En estos motores, se pueden observar directamente magnitudes como velocidad de giro, presiones de aceite, temperaturas de refrigerante y temperaturas de escape, entre otras, que son clave para interpretar emisiones y rendimiento.

3.2 Plataforma de estudio

3.2.1 Lanchas de instrucción analizadas

Las lanchas de instrucción son el medio donde se busca que el alumno no sea un mero observador de las maniobras que realizan los buques de la Armada en la mar, sino que se busca que se integre en una organización de buque real. Habilitar a los alumnos para que se familiaricen y se entrenen en el medio en el que el día de mañana ejercerán su trabajo, familiarizarlos en la organización de los buques, así como con el buque, su vida a bordo y las maniobras y operaciones realizadas dentro de ellos, además de entrenar su don de mando y poner en práctica lo que se ha aprendido de forma teórica como ejercicios de navegación o de operaciones y táctica.

Este adiestramiento se lleva a cabo en salidas programadas durante el curso escolar con el objetivo de elevar el nivel básico de las dotaciones de alumnos asignadas y, además, comprobar, manejar y mantener los equipos y sistemas instalados. Como se ha mencionado anteriormente, estas salidas se llevan a cabo de manera semanal (saliendo las diferentes dotaciones un día a la semana), además de con otras salidas en las que el tiempo de adiestramiento es mayor como en las semanas I+A (Instrucción y Adiestramiento), en las pernoctas o en las nocturnas, salidas que se realizan una vez por cuatrimestre por cada dotación.

La Escuela Naval Militar dispone de seis lanchas de instrucción. De ellas, cuatro pertenecen a una primera serie, entregada en los años 2006 y 2007, mientras que las dos restantes forman parte de una segunda serie, entregada en 2024. Las embarcaciones de la primera serie son la “GM Barrutia” (A-121), la “GM Chereguini” (A-122), la “GM Rull” (A-123) y la “GM Salas” (A-124); por su parte, las de la segunda serie son la “GM Godínez” (A-127) y la “GM Herrero” (A-128). Entre todas ellas, el presente estudio se ha centrado en el motor de la GM Godínez, por ser la lancha disponible en el momento de la visita del técnico, y en la GM Barrutia, sobre la que ya existían estudios previos y una base de datos consolidada relativa a su motor.

3.2.2 Perfil de uso operativo

El perfil de uso de las lanchas, como ya se ha mencionado anteriormente, es repetitivo, siendo las salidas semanales. Están diseñadas para el adiestramiento a flote de los alumnos dentro de la programación formativa, orientadas a elevar el nivel básico de los alumnos en el manejo de los equipos y sistemas de navegación.

La organización del alumnado durante estas salidas se lleva a cabo mediante rotaciones y dotaciones, de manera que cada grupo asume funciones de navegación y maniobra en su jornada asignada. Esta lógica de rotaciones aparece reflejada en el registro de actividad semanal, donde se indica que las salidas se reparten por días y se estructuran para que cada dotación constituya el equipo funcional de la embarcación durante la navegación.

El uso típico de las lanchas, en relación con los motores, se concentra en regímenes bajos y medios, porque la propia doctrina de empleo limita la velocidad según el tipo de ejercicio. En el manual de las lanchas de instrucción se fijan tres referencias que ordenan la navegación, una velocidad normal asociada a 600 rpm (aproximadamente 6 nudos), una velocidad de evolución en torno a 1100 rpm (aproximadamente 10 nudos) y una velocidad máxima de referencia de 1500 rpm (aproximadamente 14

nudos). Además, se establece que los ejercicios de maniobra, siendo ejemplos de ello los ejercicios de remolque o fondeo, se realicen como máximo a velocidad de evolución, mientras que en entradas y salidas de puerto y en navegación de precisión se use la velocidad normal; la velocidad máxima queda para reposicionamientos entre ejercicios, y solo se contempla superar ese umbral en emergencias con autorización del comandante de la lancha.

Por ello, los regímenes altos suelen reservarse para situaciones puntuales, fundamentalmente tránsitos entre rías o escenarios excepcionales, mientras que la mayor parte del tiempo de actividad se desarrolla en condiciones compatibles con enseñanza, repetición de procedimientos y márgenes de seguridad más amplios.

Cuando se realizan periodos de instrucción de mayor entidad, el perfil se amplía en tiempo y distancia, incorporando pernocta y tránsito entre rías, ya sea la Ría de Aldán, la de Vigo o incluso la Ría de Arousa. En una semana de instrucción y adiestramiento, mencionada anteriormente, las salidas incluyen la navegación y ejercicios en la ría de Pontevedra, un tránsito posterior a cualquiera de las rías mencionadas anteriormente con pernocta en puerto, y el regreso al día siguiente con tránsito inverso y entrada en la Escuela Naval Militar.

Para caracterizar este perfil de uso de forma objetiva (y trasladarlo a resultados en capítulos posteriores), en cada salida se registran variables operativas como duración, distancia recorrida, velocidad media y consumo, y se complementa con información del parte de máquinas (revoluciones, temperaturas y presiones) tomada desde las pantallas de puente. Esta forma de registro permite describir la navegación como una sucesión de escalones de régimen y fases de operación ya sean tránsitos o ejercicios.

3.2.3 Descripción general de las lanchas de instrucción

Las Lanchas de Instrucción se basan en el modelo Rodman 66, por lo que comparten la mayor parte de sus características principales. Ambas series se diferencian principalmente en el sistema propulsivo, así como en algunos sistemas y equipos que incorporan para la navegación.

Estas embarcaciones están construidas en PRFV (poliéster reforzado con fibra de vidrio), con casco en “V” y propulsión diésel, lo que permite disponer de una plataforma para la navegación costera.

La geometría del casco, con las líneas de obra viva (véase Figura 3-2), y la flotabilidad están orientadas a un comportamiento predecible en mar de proa, con un cabeceo relativamente suave, baja tendencia a embarcar agua y una forma que reduce la posibilidad de atravesarse a la mar, permitiendo navegar a régimen elevado dentro de condiciones acordes a su porte sin pantocazos peligrosos. Esta característica es especialmente valiosa en un entorno docente, porque facilita repetir maniobras y ejercicios con mayor margen de seguridad.

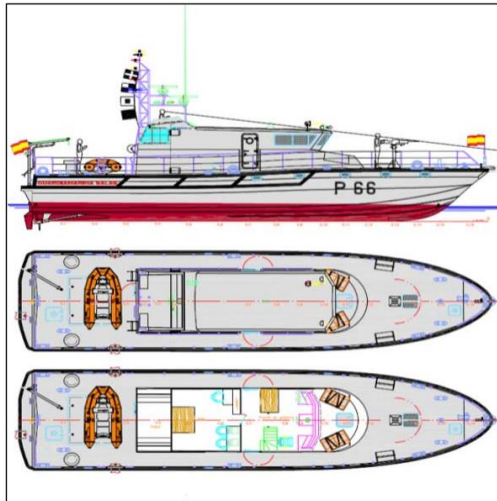


Figura 3-2 Vista de planta y perfil de las lanchas de instrucción [31]

En la siguiente Tabla 3-1 podemos observar las principales características de las lanchas:

Características	Valor
Eslora total	20,50 m
Eslora del casco	20,00 m
Manga del casco	4,90 m
Puntal	2,56 m
Calado en rosca	0,9 m
Capacidad de combustible	(varía según la lancha)
Capacidad de agua	500 l
Propulsión	Ejes y hélices
Velocidad máxima	23 nudos
Velocidad de crucero	15 nudos
Desplazamiento en rosca	29,5 T
Tripulación prevista	16 personas
Alojamiento	16 personas

Tabla 3-1 Características generales de las Lanchas de Instrucción [31]

En la Tabla 3-1 , en lo relativo a la capacidad de combustible, es necesario señalar que no todas las lanchas presentan la misma capacidad. Aunque varias unidades se sitúan en torno a los 5.000 litros, existen diferencias significativas entre ellas. Así, la GM Barrutia es la que dispone de menor capacidad, con un máximo de 4.800 litros, mientras que otras embarcaciones superan ampliamente esa cifra, como la GM Rull, la Godínez y la Herrero con 6.000 litros, o la GM Salas, que alcanza los 7.000 litros.

En su organización interior, el casco se estructura mediante mamparos transversales estancos que separan zonas funcionales. Entre ellas se identifican espacios como el pañol del ancla en proa (destinado

a material de amarre y fondeo), el área de tanques, la cámara de máquinas y la camareta (habitabilidad), además del pañol/espacio de popa asociado al servo y al timón. Esta compartimentación, junto con los procedimientos asociados, facilita que la instrucción incluya rutinas reales de preparación, navegación, maniobra y control de averías (Figura 3-3).

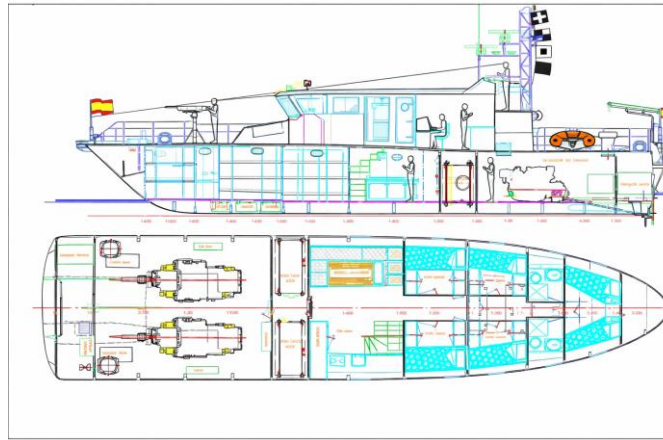


Figura 3-3 Planos de las lanchas de instrucción con vista de perfil y de planta [31]

3.3 Descripción de los sistemas propulsivos

3.3.1 Sistema de propulsión de la GM Barrutia

En las lanchas de instrucción, de la primera serie, donde se encuadra la GM Barrutia (A-121), el sistema propulsivo responde a una configuración típica de embarcación rápida con doble línea de ejes, es decir, dos plantas propulsoras simétricas, una en babor y otra en estribor, que trabajan de forma independiente pero que pueden operar de manera coordinada. En la cámara de máquinas, situada en popa, se alojan los dos motores principales y los sistemas auxiliares asociados a la propulsión, inmediatamente a proa de este compartimento se disponen los tanques de combustible, separados por mamparos estancos, con una capacidad total de 4800 litros en el caso de la GM Barrutia, lo que condiciona tanto la autonomía como el perfil de operación habitual de la unidad.

La generación de potencia mecánica se realiza mediante dos motores marinos diésel Caterpillar C18 (Figura 3-4), uno por banda. Este motor diésel marino de alta potencia está sobrealimentado y refrigerado por agua de mar, y fija su potencia para servicio continuo en 746 kW de potencia máxima a 2300 rpm, relación de compresión de 16,5 y con arranque eléctrico a 24 Vcc. Estos motores se caracterizan por ser de cuatro tiempos, seis cilindros en línea, inyección directa, cilindrada del orden de 18 litros, y admisión con turboalimentación y postenfriamiento, lo que explica la elevada densidad de potencia y la necesidad de una vigilancia cuidadosa de temperaturas y presiones en operación continuada, razón por la cual se lleva a cabo un registro de máquinas durante la salida a la mar.

En el manual de las lanchas de instrucción se describen parámetros del cárter, de tipo profundo, que admite 40 litros de aceite de lubricación, en este caso, lubricante de 15W-40. Estos motores están refrigerados por un circuito interno de refrigeración el cual trabaja con 80 litros de agua dulce tratada. Estos volúmenes influyen en la inercia térmica del motor y en el margen de estabilidad ante transitorios de carga.

La cadena cinemática desde el cigüeñal hasta el propulsor se completa con dos cajas reductoras de acoplamiento hidráulico ZF 550A, una por motor, con relación de reducción 1,971:1. Entre cada motor y su reductora, que utiliza un aceite ATF, se instala un acoplamiento elástico VULKAN L301S, como solución orientada para la amortiguación de vibraciones y para suavizar el acoplamiento de cargas en un sistema sometido a cambios de régimen frecuentes. Con esta relación de reducción, el régimen de giro de la hélice queda aproximadamente a la mitad del régimen del motor, lo que responde a la necesidad

clásica de casar el régimen óptimo del motor con un régimen de hélice compatible con eficiencia hidrodinámica y con limitación de esfuerzos y vibraciones en la línea.

La transmisión de ese par se realiza mediante las dos líneas de ejes dimensionadas para la potencia máxima de los motores, fabricadas en acero inoxidable AISI 329 y con 70 mm de diámetro. Esta línea de ejes que une el motor con la hélice es crítica para limitar pérdidas mecánicas, calentamientos y vibraciones.

El sistema propulsivo se gobierna desde el puente mediante interruptores con llave para el arranque, tacómetros, indicadores de temperatura del agua dulce y del aceite, alarmas de alta temperatura, indicadores y alarma de presión de aceite y pulsadores de parada. Además, existen mandos electrónicos Caterpillar para controlar motores y reductoras desde los puestos de mando. Dado que ambos motores son idénticos y están ubicados simétricamente, pueden operar de forma sincronizada, mediante la función SYNC en los mandos de control, permitiendo el uso conjunto como si se tratara de un único bloque propulsor.

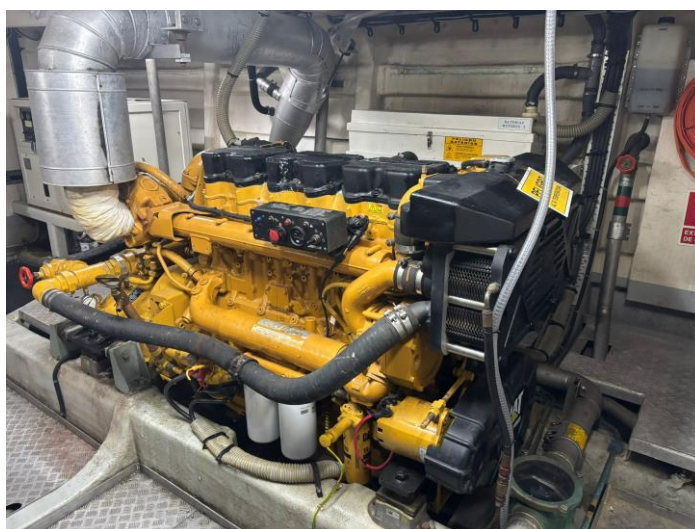


Figura 3-4 Motor Caterpillar C18 a bordo de la GM Barrutia (fuente propia)

3.3.2 Sistema de propulsión de la GM Godínez

En las lanchas de instrucción de la segunda serie, donde se encuadran la GM Godínez (A-127), el sistema propulsivo responde a una configuración típica de embarcación rápida con doble línea de ejes, es decir, dos plantas propulsoras simétricas, una en babor y otra en estribor, al igual que en la primera serie de las lanchas, que trabajan de forma independiente, pero pueden operar de manera coordinada. En esta serie se mantiene el mismo concepto general de instalación: la cámara de máquinas se sitúa bajo cubierta en popa y el combustible se almacena en tanques distribuidos en un compartimento estanco a proa de la cámara de máquinas, lo que condiciona el reparto de pesos y la autonomía. Además, se fija una capacidad de combustible de 6.000 L, con 15 nudos como velocidad económica y 30 nudos como velocidad máxima, y una autonomía mínima de 500 millas a la velocidad económica.

La generación de potencia mecánica se realiza mediante dos motores diésel marinos MTU 10V2000M84, uno por banda (Figura 3-5). Para esta familia se define una potencia nominal del orden de 1015 kW a 2450 rpm, con configuración V10, arranque eléctrico, una relación de compresión de 13,5:1, un sistema de admisión turboalimentado y postenfriado, refrigeración por agua dulce con intercambiador e inyección electrónica, cumpliendo IMO II.

Estos motores se describen como diésel marinos de cuatro tiempos refrigerados por líquido, con tecnología *common rail* e inyección directa y turboalimentación gobernada por los gases de escape, lo que explica su elevada densidad de potencia y la necesidad de vigilar presiones y temperaturas durante

la operación. En cuanto a parámetros de diseño, la especificación del buque consigna una cilindrada de 22,3 L, como orden de magnitud operativo, en datos de capacidades se recogen 81 L de aceite total en el llenado inicial del sistema estándar y 114 L de refrigerante del motor con el equipo de refrigeración, volúmenes que influyen en la inercia térmica del conjunto y en el margen frente a transitorios de carga.

La cadena cinemática desde el cigüeñal hasta el propulsor se completa con dos cajas reductoras ZF 2050, una por motor, con relación de reducción 2,519:1. Se trata de una reductora montada en brida con componente inversor, dotada de embragues multidisco accionados hidráulicamente, cojinete de empuje integrado, bombas de aceite, filtro de aceite e intercambiador de calor aceite-agua cruda, y preparada para mando a distancia eléctrico (con control de emergencia manual).

La transmisión de ese par se realiza mediante dos líneas de ejes finalizando la propulsión con dos hélices de paso fijo *Teignbridge*.

El sistema propulsivo se gobierna desde el puente mediante un control remoto, con palanca electrónica de doble control para accionamiento combinado de motor y caja de cambios, que incorpora, entre otras funciones, la sincronización del motor. Para la supervisión y alarmas se contempla instrumentación con pantalla gráfica y una visualización casi analógica y digital de parámetros clave, incluyendo tacómetro, presión de aceite del motor, temperatura del refrigerante, y presión y temperatura del aceite de la caja de cambios, junto con elementos de mando.



Figura 3-5 Motor MTU a bordo de la GM Godínez (fuente propia)

3.4 Análisis comparativo de prestaciones y parámetros de propulsión

En las lanchas analizadas aparecen dos configuraciones de propulsión claramente diferenciadas. Por un lado, la instalación con dos motores Caterpillar C18 acoplados a reductoras ZF 550 A con relación 1,971:1; por otro, la instalación con motores MTU 10V2000M84 asociados a una reductora ZF 2050 con relación de 2,519:1.

Desde el punto de vista de la arquitectura mecánica, se encuentran diferencias que condicionan vibraciones y regularidad del par. El C18 es un seis cilindros en línea de aproximadamente 18 litros (3L por cilindro), con dimensiones internas en torno a 145 mm de diámetro y 183 mm de carrera en las configuraciones de referencia de esta familia, lo que implica cilindros grandes y, por tanto, pulsos de combustión más separados, así como relaciones de compresión de 13,5 en el MTU frente a 16,5 del C18. El 10V2000M84, en cambio, es un V10 a 90° con 135 mm de diámetro y 156 mm de carrera, y una cilindrada total que se define como 22,30 L en la propia serie (2,23 L por cilindro), lo que supone más eventos de combustión por unidad de tiempo y, en general, un giro más uniforme del cigüeñal. Esa uniformidad por aumento del número de cilindros es precisamente uno de los mecanismos clásicos para

reducir la irregularidad del par, y se aprecia especialmente cuando se comparan motores de pocos frente a muchos cilindros en servicio marino.

Al comparar las potencias nominales tal como se declaran en sus respectivos ratings, la diferencia se acentúa: pasar de 746 kW (C18 en servicio continuo) a 1.015 kW (10V2000M84 en rating 1D, carga media de hasta el 60 % de la potencia nominal) supone un salto notable, además de obtenerse a distinto régimen (2.300 rpm frente a 2.450 rpm). Esto refleja que el MTU está homologado para entregar una potencia de placa más alta dentro de un perfil de utilización 1D, es decir, un ciclo de servicio que admite picos y variaciones de carga más exigentes siempre que se respeten las condiciones asociadas a ese rating (carga media/horas anuales, según el fabricante). En paralelo, en el C18 el concepto de servicio continuo vincula su potencia máxima a un uso sostenido, lo que operativamente implica que su punto de trabajo alto está más cerca del régimen de empleo permanente, mientras que en el MTU la potencia 1D debe interpretarse como capacidad dentro de un sobre de aplicación más intermitente, no como potencia continua equivalente.

A partir de esos valores nominales de potencia y régimen, el par en el cigüeñal (en el punto nominal) queda en el entorno de 3.098 N·m para el C18 (746 kW a 2.300 rpm) y 3.956 N·m para el MTU (1.015 kW a 2.450 rpm). Es decir, incluso antes de entrar en la reductora, el V10 se coloca alrededor de +28% en par nominal frente al C18. Este incremento se vuelve más relevante cuando se combina con la relación de reducción instalada, porque es ahí donde el sistema convierte potencia de giro rápido en potencia útil para mover una hélice a menor velocidad angular.

En transmisión, el C18 trabaja con $i = 1,971:1$, mientras que el MTU se asocia con $i = 2,519:1$. Esto significa que, a régimen nominal, el eje de la hélice gira aproximadamente a 1.167 rpm en el caso del C18 (2.300/1,971) y a 973 rpm en el caso del MTU (2.450/2,519). Dicho de otra forma, la línea MTU reduce más, baja más las rpm en el eje y, como contrapartida, eleva más el par disponible para el propulsor. Con una estimación ideal, el par a la salida de la reductora quedaría alrededor de 6.105 N·m para el C18 y 9.966 N·m para el MTU. Esta diferencia de par en eje es especialmente importante porque condiciona la selección de hélice (diámetro/paso), el margen frente a cavitación y la capacidad de mantener velocidad en condiciones exigentes.

Otra comparación útil, porque mezcla potencia y tamaño, es la densidad de potencia (kW/L). Tomando 18,1 L y 746 kW para el C18, se obtiene aproximadamente 41,2 kW/L. Para el MTU, con 22,3 L y 1.015 kW, se obtiene aproximadamente 45,5 kW/L. El resultado indica que el V10 no solo entrega más potencia absoluta, sino que además lo hace con una densidad algo mayor, lo que suele implicar un diseño de sobrealimentación y gestión del ciclo más orientado a alto rendimiento dentro de un rating definido.

En cuanto a sobrealimentación y admisión, ambos motores comparten turboalimentación y postenfriamiento del aire de carga, pero la implementación difiere. En el C18 se emplea un postenfriador de circuito separado y el motor se ofrece con soluciones de enfriamiento mediante intercambiador o refrigeración por quilla. En el MTU, la sobrealimentación es secuencial con refrigeración del aire de admisión, y el control del soplado integra válvulas de descarga gobernadas a partir de la presión de aire de carga, lo que ayuda a sostener un mapa de par amplio sin rebasar los límites de velocidad del turbocompresor.

En operación real, un indicador técnico especialmente útil para vigilar la admisión y compararla entre salidas, es la pérdida de carga en admisión. En el MTU, el rango de referencia para condiciones de potencia máxima fija 15 mbar con filtro nuevo y un límite de 30 mbar. Alcanzar el límite significa que el sistema de admisión está imponiendo una restricción suficientemente alta como para comprometer la masa de aire disponible y, con ello, el margen de combustión limpia bajo carga (humo, temperatura de escape y consumo tienden a deteriorarse cuando falta exceso de aire).

En capacidades de fluidos, los cuales afectan tanto a mantenimiento como a estabilidad térmica, el conjunto con C18 dispone de 40 L de aceite en cárter profundo y 80 L de agua dulce tratada en el circuito

de agua de circulación de la instalación. En el MTU, los valores de referencia para el motor se sitúan alrededor de 81 L de aceite y 114 L de refrigerante (con el equipo de refrigeración asociado), con un peso en seco en el entorno de 2.240 kg según configuración considerada. Esta diferencia de volúmenes y masa es coherente con el salto de cilindrada y potencia.

Finalmente, en el marco regulatorio de emisiones, el C18 en configuración marina aparece asociado a cumplimiento IMO II y, según rating, también EPA Tier 3 y EU Stage IIIA. En el MTU 10V2000M84, la optimización declarada se alinea con IMO II.

Toda esta información queda recogida en la Tabla 3-2.

Aspecto	Caterpillar C18	MTU
Configuración general	2 motores C18 con reductora ZF 550 A, i = 1,971:1	2 motores MTU 10V2000M84 con reductora ZF 2050, i = 2,519:1
Arquitectura del motor	6 cilindros en línea, 4 tiempos	V10 a 90°, 4 tiempos
Cilindrada total	18,1 L	22,30 L
Cilindrada unitaria	≈ 3,02 L/cilindro	2,23 L/cilindro
Diámetro x carrera	145 x 183 mm	135 x 156 mm
Relación de compresión	16,5:1	13,5:1
Potencia nominal	746 kW a 2300 rpm	1015 kW a 2450 rpm
Par nominal en cigüeñal	≈ 3098 N·m	≈ 3956 N·m
Relación de reducción	1,971:1	2,519:1
rpm del eje a régimen nominal	≈ 1167 rpm	≈ 973 rpm
Par ideal a la salida de reductora	≈ 6105 N·m	≈ 9966 N·m
Densidad de potencia	≈ 41,2 kW/L	≈ 45,5 kW/L
Sobrealimentación y admisión	Turboalimentado y postenfriado	Turboalimentación secuencial con refrigeración del aire de carga
Sistema de inyección	Inyección directa	<i>Common rail</i> electrónico
Aceite lubricante	40 L	81 L
Refrigerante	80 L	114 L
Masa en seco	1580 kg	2240 kg
Emisiones	IMO II; según versiones también EPA Tier 3 y EU Stage IIIA	IMO II

Tabla 3-2 Comparación de las características principales de los sistemas propulsivos Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).

3.5 Combustible empleado y sus propiedades fisicoquímicas

Aunque el objetivo principal de este trabajo es comparar el funcionamiento, el consumo y las emisiones de los motores instalados en las lanchas de instrucción de la ENM, resulta necesario incorporar una breve caracterización del combustible empleado, ya que el comportamiento real de un motor diésel no depende únicamente del régimen de giro, de la carga o de las condiciones de operación, sino también de las propiedades del combustible que alimenta el sistema de inyección y condiciona el proceso de combustión. Esta idea encaja plenamente con el planteamiento general del TFG, porque la propia memoria sitúa el combustible entre los factores que afectan al rendimiento real del motor, y porque la comparación entre motores se apoya en datos obtenidos en navegación real, donde consumo y emisiones no pueden interpretarse de forma aislada respecto al combustible utilizado.

El combustible utilizado en las lanchas de instrucción, aportado por la empresa de Repsol, se trata de gasóleo B marino. Para la caracterización del combustible empleado se dispone de dos momentos de análisis. El primero corresponde a la muestra tomada tras el repostaje realizado por Repsol, y el segundo a la muestra analizada después de dos meses de permanencia en los tanques. Esta comparación permite valorar si el almacenamiento a bordo introduce variaciones apreciables en propiedades que, directa o indirectamente, pueden afectar al consumo, a la combustión o a la interpretación de los resultados experimentales (Anexo III: Características del combustible empleado).

La primera característica relevante es la densidad a 15 °C. En la muestra tomada tras el repostaje, el gasóleo B presenta un valor de 834,2 kg/m³. Dos meses después, la densidad pasa a 832,9 kg/m³. La variación es pequeña, pero apunta a una ligera reducción de la masa contenida por unidad de volumen. Este dato es importante porque, cuando el consumo se expresa en litros, no basta con mirar cuánta energía hay por kilogramo: también influye cuánta masa real transporta cada litro de combustible.

También se aprecia una variación en el contenido energético. El poder calorífico superior pasa de 45,6 MJ/kg en la muestra del repostaje a 44,8 MJ/kg tras dos meses, mientras que el poder calorífico inferior pasa de 42,6 MJ/kg a 41,8 MJ/kg. Si se expresa en base volumétrica, el poder calorífico inferior descende de 35,5 MJ/L a 34,8 MJ/L. Estos valores indican que, en la segunda muestra, el combustible aporta ligeramente menos energía, tanto por kilogramo como por litro. Desde el punto de vista del TFG, este matiz es importante, porque una diferencia de este tipo puede influir en la lectura del consumo si después se comparan litros consumidos, horas de funcionamiento y régimen del motor.

El índice de cetano se mantiene prácticamente constante, aunque con una pequeña subida, pasando de 49 a 49,6. Esto indica que la aptitud del combustible para autoencenderse en un motor diésel no empeora de forma apreciable durante el periodo analizado. Algo parecido ocurre con el punto de inflamación, que se mantiene en 60,5 °C en ambas muestras. Por tanto, ni la calidad de ignición ni este parámetro de seguridad muestran un deterioro claro en los dos meses considerados.

En comportamiento a baja temperatura, el parámetro POFF (Punto de Obstrucción del Filtro en Frío) pasa de -19 °C a -18 °C. El cambio es mínimo, pero puede interpretarse como una ligera pérdida de comportamiento frente al frío. No es una diferencia grande, pero sí encaja con la idea de que el almacenamiento puede modificar de forma leve algunas propiedades operativas del combustible, aunque sin alterar de forma drástica su aptitud general de uso.

Los datos de estabilidad y de residuos merecen comentarse con cuidado, porque aquí no se observa una pérdida lineal de calidad, sino más bien un comportamiento mixto. Los residuos adherentes bajan de 2,9 g/m³ a 1 g/m³, los residuos filtrables bajan de 1,4 g/m³ a 1 g/m³ y los residuos totales descienden de 4,3 g/m³ a 2 g/m³. Con estos resultados, no sería correcto decir que el combustible pierde propiedades durante el almacenamiento, sino que algunas propiedades energéticas disminuyen ligeramente, mientras que otras magnitudes medidas en el ensayo de estabilidad no muestran un deterioro y, de hecho, presentan valores menores en la segunda muestra.

La curva de destilación también muestra cambios pequeños, pero útiles para describir la evolución del combustible. El IBP (*Initial Boiling Point*) pasa de 161,5 °C a 162,0 °C; el T10 baja de 192,4 °C a 190,8 °C; el T50 sube ligeramente de 253,9 °C a 254,9 °C; el T90 pasa de 335,4 °C a 338,2 °C; y el FBP (*Final Boiling Point*) desciende de 365,2 °C a 363,6 °C. Estos cambios no indican una transformación radical del combustible, pero sí muestran que la muestra almacenada no es exactamente idéntica a la del repostaje y que su comportamiento de destilación se desplaza ligeramente en algunos tramos.

En cuanto a la composición elemental, los valores permanecen constantes entre ambas muestras. El contenido en carbono elemental es de 86,26 % m/m, el de hidrógeno elemental de 13,74 % m/m, y la relación H/C se mantiene en 1,9. Esto indica que, al menos en esta caracterización, la composición elemental global del gasóleo B no cambia durante los dos meses de almacenamiento considerados.

En conjunto, la comparación entre la muestra tomada tras el repostaje y la muestra analizada dos meses después permite afirmar que el gasóleo B mantiene de forma general sus propiedades básicas, aunque presenta ligeras variaciones en parámetros relevantes como la densidad y el poder calorífico.

3.6 Instrumentación y equipos de medida

La adquisición de datos en este trabajo se plantea priorizando el uso de la instrumentación ya integrada en los propios motores y en la embarcación, con el objetivo de registrar variables representativas del funcionamiento real en explotación sin introducir sensores adicionales.

En motores diésel marinos modernos, el equipo de medida principal no es un instrumento externo, sino la propia arquitectura de control y monitorización del motor, una unidad electrónica (ECU) recibe señales de una red de sensores, gobierna el funcionamiento y, a la vez, habilita la supervisión del estado operativo (medidas, alarmas y registro).

En la serie MTU 2000 el motor trabaja gobernado por una unidad de control electrónica que recibe continuamente señales de sensores repartidos por los circuitos de lubricación, refrigeración, admisión y sobrealimentación, combustible y escape, y con esa información ajusta el funcionamiento para mantenerlo dentro de márgenes seguros. En condiciones normales, esa unidad regula parámetros como la dosificación y el avance de la inyección, de forma que el par y la potencia entregados se correspondan con la consigna sin llevar el conjunto fuera de sus límites térmicos o mecánicos. Cuando detecta desviaciones, su lógica de protección actúa de manera escalonada, primero genera avisos y registra la anomalía; si el valor supera umbrales más severos o persiste durante un tiempo definido, puede ordenar una limitación de carga para reducir esfuerzos y temperaturas; y, en situaciones consideradas críticas para la integridad del motor, ejecuta una parada controlada o inmediata según el tipo de fallo.

Para tomar esas decisiones se monitoriza un conjunto amplio de variables que permite cubrir tanto la salud del motor como la del sistema de alimentación y la sobrealimentación. Entre las magnitudes más relevantes están la velocidad de giro del motor, las presiones y temperaturas del aceite de lubricación, la temperatura, presión y nivel del refrigerante, la temperatura del aire de admisión y del aire de sobrealimentación, la presión de colector, la presión y temperatura del combustible, las temperaturas de gases de escape, y variables vinculadas al turbocompresor. Con todo ello, la unidad de control no solo protege frente a fallos que se producen de forma repentina como una pérdida de presión de aceite, sino también frente a degradaciones lentas como altas temperaturas progresivas o cavitación que podrían comprometer la fiabilidad si no se corrigen a tiempo.

En la arquitectura electrónica de los MTU, el *Engine Interface Module* (EIM) funciona como un punto central de interconexión del motor donde se concentra y ordena en el propio mazo de cables las señales que entran y salen del conjunto motor, sensores y actuadores, y a partir de ahí ofrece una salida de comunicaciones hacia el sistema de la planta mediante un bus abierto basado en CAN bajo el estándar SAE J1939. En paralelo, el diseño incorpora una interfaz serie RS422 orientada a tareas de diagnosis y mantenimiento. Con este planteamiento, la adquisición y disponibilidad de parámetros queda resuelta dentro del sistema electrónico del propio motor.

En el caso del motor Caterpillar, la obtención de datos se realizará mediante registro de máquinas (parte de máquinas), recogiendo en cada salida los valores operativos que aporta la instalación en condiciones normales de servicio. Para ello se anotarán, por un lado, los datos de navegación y consumo que proporciona el propio sistema del motor desde las pantallas de puente (millas navegadas, horas de uso, combustible consumido, consumo medio y horas de funcionamiento) y, por otro, las variables que se consignan en el parte de máquinas, como revoluciones por minuto, temperaturas de refrigeración y presiones, empleándose estas últimas principalmente como verificación de que el motor se mantiene dentro de rangos de funcionamiento estables durante la salida.

Este registro se apoya en que la información disponible para el operador procede de la electrónica del motor (ECM), que gestiona valores medidos por sensores y estados calculados internamente, presentándolos como parámetros operativos utilizables para supervisión. La lectura y anotación sistemática se facilita además por la presencia en la consola del puente de indicadores del funcionamiento del motor y alarmas asociadas, lo que permite consignar los valores requeridos sin instalar instrumentación de medida adicional.

Finalmente, y como excepción a la premisa general de no emplear instrumentación externa, se recurrió a la aplicación móvil GPSLogger y Geotracker para registrar parámetros como la duración de las salidas, la distancia recorrida y la velocidad media. Asimismo, se utilizó el analizador de gases Testo 340, imprescindible para cuantificar las emisiones en el escape, ya que la composición de los gases no se encuentra disponible en la instrumentación estándar del motor. Conforme al procedimiento descrito, las mediciones se efectuaron en el codo de escape a través del orificio de toma, cerrado normalmente mediante un tornillo, introduciendo la sonda sin que llegara a contactar con la pared interior del conducto y sellando posteriormente con la pieza cónica, con el fin de evitar tanto la entrada de aire exterior como la fuga de gases al ambiente (Figura 3-6).



Figura 3-6 Codo gases de escape de la GM Godínez (fuente propia)

El equipo Testo (Figura 3-7) se basa en una configuración modular de sensores: incorpora O₂ de serie y permite equipar el instrumento con sensores adicionales intercambiables para especies relevantes en motores diésel, como CO, NO/NO₂ (y por extensión NO_x) y SO₂, en función de la configuración instalada. El diseño contempla ranuras de sensor definidas, lo que facilita adaptar el equipo al tipo de prueba y mantenerlo operativo mediante sustitución o recalibración de sensores cuando corresponda.

La toma de muestra en la lancha se realizó directamente en el sistema de escape, utilizando el punto de registro existente en el codo de los gases de escape, que normalmente permanece cerrado con un tornillo roscado. Para medir, se retira ese tornillo y se introduce la sonda del analizador procurando que el extremo quede en el flujo de gases sin rozar la pared interior del conducto. A continuación, se coloca un adaptador cónico metálico que tapona el espacio libre alrededor de la sonda para reducir fugas al compartimento y evitar que, entre aire exterior, ya que esa entrada de aire puede alterar la muestra y sesgar los valores.

Durante la navegación, el equipo permite visualizar las lecturas de forma continua y el registro queda almacenado en el propio dispositivo. Para ganar representatividad, se realizan varias lecturas a un mismo régimen y se trabaja posteriormente con valores medios, anotando en paralelo el régimen de máquinas para poder correlacionar emisiones y condición de operación. En regímenes más altos puede ser necesario sujetar la sonda para evitar que la velocidad del chorro de escape la desplace y se pierda el sellado en el codo de escape de los gases.



Figura 3-7 Testo 340 equipado con su sonda [32]

3.7 Metodología experimental

A lo largo del trabajo se realizaron dos salidas específicas a la mar con el objetivo de obtener datos comparables de navegación, funcionamiento del motor y emisiones en condiciones reales de uso de las Lanchas de Instrucción Rodman 66 de la ENM. Estas embarcaciones se agrupan en dos series: una primera (entregada entre 2006–2007) equipada con motores CATERPILLAR C18, la GM Barrutia, y una segunda (entregada en 2024) con motores MTU 10V2000M84, entre las que se encuentra la GM Godínez.

En la primera salida, realizada a bordo de la GM Barrutia, se planteó un perfil de prueba sencillo pero repetible: navegar en una zona segura y con margen de maniobra, y estabilizar la propulsión a distintos regímenes de revoluciones para relacionar cada régimen con su comportamiento. En esta salida se registraron datos básicos de navegación como tiempo total, distancia recorrida, velocidad media y velocidad máxima, empleando una aplicación de seguimiento de derrota (GeoTracker), de forma que cada medición de emisiones quedase asociada a una derrota y a unas condiciones de operación concretas. Asimismo, durante la prueba se tomaron también parámetros de funcionamiento del sistema propulsor, entre ellos presiones y temperaturas, con el fin de complementar la caracterización del comportamiento de los motores en cada régimen de trabajo.

A partir de ahí se pasó a la toma de emisiones con el Testo 340, que exige introducir una sonda en el punto de muestreo del escape. La medición se realizó en el codo de gases de escape, retirando el tornillo que cierra el orificio de registro e introduciendo la sonda sin que tocara la pared interior, sellando después el hueco restante para evitar entrada de aire exterior que falseara la lectura. Con el equipo se fueron guardando lecturas a regímenes desde 600 rpm (mínima de gobierno) hasta 1600 rpm, en incrementos regulares, de 200 en 200 revoluciones, anotando en cada punto las variables que el propio

procedimiento define como relevantes: temperatura de gases, temperatura ambiente en cámara, O₂ (%), CO (ppm), CO₂ (%), NO (ppm) y NO_x (ppm).

En la segunda salida, a bordo de la GM Godínez, el objetivo fue realizar el estudio con una recogida de datos del motor MTU 10V2000M84, aprovechando la asistencia de un ingeniero de campo para acceder a parámetros que permiten la comparación entre ambos motores. Al tratarse de una lancha de la segunda serie, su planta propulsora (2 MTU 10V2000M84) y su filosofía de operación permiten apoyarse en sistemas de control/monitorización que integran y muestran datos de funcionamiento del propulsor, lo que facilita registrar variables como carga (%), régimen real, consumos instantáneos, temperaturas y presiones características. Además de estos datos, se tomaron datos de emisiones con el Testo 340, mismo proceso que en los motores Caterpillar.

Finalmente, para reforzar la parte de motores Caterpillar con un volumen de datos más representativo que una prueba puntual, se realizó durante la semana I+A (instrucción y adiestramiento) un registro sistemático de cada salida, completando una plantilla por navegación con los datos que aportan las pantallas y partes de máquinas: millas navegadas, horas de uso, combustible consumido y consumo medio, junto con rpm, temperaturas de refrigeración y presiones.

3.8 Tratamiento y análisis de datos

Una vez recopilada la información experimental, se procedió a su ordenación, depuración y tratamiento con el objetivo de construir una base de datos homogénea que permitiese comparar el comportamiento de los motores estudiados en condiciones reales de servicio. Para ello se reunieron, por una parte, los datos operativos obtenidos durante las navegaciones y, por otra, los datos técnicos extraídos directamente del motor MTU, así como los registros de funcionamiento y emisiones tomados sobre el motor Caterpillar.

En el caso del motor MTU 10V2000M84, una parte relevante de los datos se obtuvo mediante conexión de diagnóstico con el software MTU DiaSys, empleado para la lectura y registro de parámetros de funcionamiento y variables de proceso del motor. Esta información permitió incorporar al análisis datos internos del sistema de control, ampliando la base de comparación más allá de la simple observación de los parámetros visibles durante la operación.

Para el motor Caterpillar, el tratamiento de datos se apoyó en los registros de máquinas y en las mediciones efectuadas con el analizador de gases Testo 340. De este modo, la información empleada para su estudio procedió del seguimiento operativo realizado durante el servicio y de los valores de emisiones obtenidos experimentalmente en campaña. El Testo 340 se utilizó como instrumento de medida de gases de combustión, al tratarse de un analizador portátil diseñado para aplicaciones industriales y capaz de trabajar con sensores de O₂ y otros gases como CO, NO, NO_x o SO₂.

Una vez reunidos todos los datos válidos, se llevó a cabo una depuración de variables para seleccionar únicamente aquellas con verdadero interés comparativo. Se priorizaron los parámetros directamente relacionados con el funcionamiento del motor, el régimen de operación, el consumo, la respuesta del sistema y el comportamiento de las emisiones, descartando o relegando aquellas variables cuya precisión no resultaba suficiente o cuya aportación al análisis final era escasa. Esta fase permitió trabajar con una estructura de datos más uniforme y evitar que la interpretación quedase condicionada por registros puntuales o por parámetros de valor limitado.

Posteriormente, toda la información se organizó en hojas de cálculo para su tratamiento numérico y su representación gráfica. A partir de esta base se elaboraron comparaciones entre parámetros operativos, registros de funcionamiento y resultados de emisiones, integrando en un mismo análisis los datos extraídos del MTU mediante DiaSys, los datos del registro de máquinas y los valores obtenidos con el Testo 340. Este procedimiento permitió contrastar el comportamiento observado en operación real con los datos técnicos disponibles de cada motor, mejorando la trazabilidad del estudio y reforzando la consistencia del análisis comparativo.

Desde el punto de vista metodológico, el tratamiento de los datos combinó información procedente de la operación real, registros manuales y mediciones instrumentales. Esta integración permitió disponer de una base de análisis más robusta y adecuada para valorar el comportamiento de los motores estudiados, no solo desde el punto de vista operativo, sino también en términos de emisiones y respuesta funcional. El resultado fue una metodología de trabajo coherente con los objetivos del estudio y suficiente para sustentar técnicamente las conclusiones posteriores del trabajo.

4 RESULTADOS

4.1 Comparación de los datos obtenidos

4.1.1 Parámetros operativos y variables de funcionamiento

Antes de abordar el análisis de emisiones, resulta necesario estudiar el comportamiento operativo de ambos motores a partir de las variables de funcionamiento registradas durante las navegaciones. Este bloque permite comparar la respuesta del motor Caterpillar C18 de la GM Barrutia y del motor MTU 10V2000M84 de la GM Godínez en distintos regímenes de giro, prestando atención al consumo, al estado térmico y a varias magnitudes de control representativas del punto de operación. El interés de este apartado no reside únicamente en presentar valores aislados, sino en interpretar cómo evoluciona cada motor cuando aumenta la demanda propulsiva y cómo se relacionan entre sí el régimen, la carga, el combustible consumido y las condiciones internas de funcionamiento.

Como punto de partida del análisis, se han calculado los valores medios del motor Caterpillar C18 para cada escalón de régimen ensayado (Tabla 4-1). Esta tabla resume las variables principales de funcionamiento registradas durante la operación del motor y constituye la base a partir de la cual se construyen las figuras comparativas posteriores.

Régimen de giro (rpm)	Presión del aceite (kPa)	Temperatura refrigerante (°C)	Presión sobrealimentación (kPa)	Temperatura aire admisión (°C)	Temperatura combustible (°C)	Presión del combustible (kPa)	Consumo instantáneo (L/h)
600	437,3	39,3	105,3	16,0	17,7	560,0	10,9
800	483,5	56,3	106,4	16,0	19,0	570,0	19,9
1000	521,0	67,4	110,2	16,2	19,2	591,2	31,1
1200	517,0	78,3	118,2	17,0	20,0	595,3	46,9
1400	503,4	84,0	132,9	17,1	20,4	613,7	69,3
1600	497,6	84,6	157,7	19,0	21,0	624,4	94,7

Tabla 4-1 Valores medios del motor Caterpillar C18 según el régimen de giro (elaboración propia).

Los valores medios del Caterpillar muestran una evolución coherente con el aumento del régimen. El consumo instantáneo crece de forma clara a medida que se pasa de los escalones bajos a los medios y altos, mientras que la temperatura del refrigerante, la presión de aceite y la presión de sobrealimentación evolucionan hacia una zona de funcionamiento más exigente, pero estable. La tabla permite identificar de forma preliminar en qué zonas de funcionamiento el consumo empieza a incrementarse con mayor intensidad y constituye una base útil para interpretar después la relación entre velocidad, punto de operación y coste energético.

De forma análoga al caso del motor Caterpillar, se han obtenido los valores medios del motor MTU 10V2000M84 (Tabla 4-2) para distintos puntos de régimen a partir del registro directo de la ECU. Este tratamiento permite disponer de un conjunto de variables más amplio y detallado, aunque en esta fase el interés principal se centra en aquellas magnitudes que pueden compararse de forma homogénea con las del Caterpillar.

Régimen de giro (rpm)	Presión del aceite (kPa)	Temperatura refrigerante (°C)	Presión sobrealimentación (kPa)	Temperatura aire admisión (°C)	Temperatura combustible (°C)	Presión combustible (kPa)	Consumo instantáneo (L/h)
600	557,5	27,67	105,2	16,7	23,6	803	6,1
800	658,6	48,6	113,7	17,4	28,6	835,1	12,5
1000	572,0	71,8	129,5	18,9	41,3	853,9	23,1
1200	652,5	76,8	168,6	20,5	52,2	871,7	36,1
1400	724,9	76,7	226,4	21,3	61,0	890,0	66,0
1600	790,8	77,7	299,9	22,3	66,7	914,0	100,5

Tabla 4-2 Valores medios del motor MTU 10V2000M84 según el régimen de giro (elaboración propia).

Los valores medios del Caterpillar muestran una evolución coherente con el aumento del régimen. El consumo instantáneo crece de forma clara a medida que se pasa de los escalones bajos a los medios y altos, mientras que la temperatura del refrigerante, la presión de aceite y la presión de sobrealimentación evolucionan hacia una zona de funcionamiento más exigente, pero estable. La tabla permite identificar de forma preliminar en qué zonas de funcionamiento el consumo empieza a incrementarse con mayor intensidad y constituye una base útil para interpretar después la relación entre velocidad, punto de operación y coste energético.

Para continuar con este punto, resulta conveniente representar la relación entre el régimen de giro del motor y la velocidad alcanzada por la embarcación (Figura 4-1). Esta figura permite conectar directamente el comportamiento del propulsor con la respuesta efectiva de la lancha en navegación, mostrando qué velocidad se obtiene para cada punto de operación. De este modo, el análisis no se inicia únicamente desde variables internas del motor, sino desde una magnitud de interés claramente operativo, que servirá además como referencia para interpretar después el consumo asociado a cada banda de servicio.

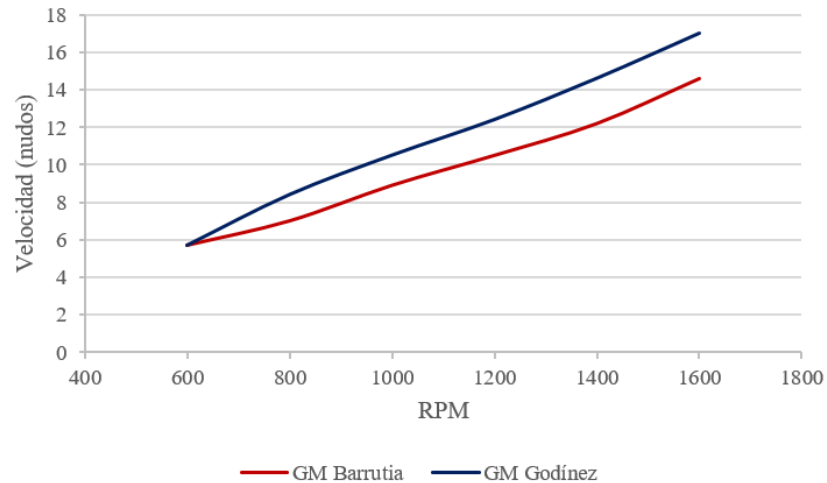


Figura 4-1 Relación velocidad-régimen de giro de ambas lanchas (elaboración propia).

A partir de estos valores, puede observarse que ambas embarcaciones parten de una situación prácticamente equivalente a bajo régimen, pero que conforme aumentan las revoluciones la GM Godínez consigue una velocidad sistemáticamente superior para los mismos escalones de rpm. Por tanto, la lectura principal de esta figura no es solo que la velocidad aumenta con el régimen en ambos casos, sino que la separación entre ambas lanchas se hace cada vez mayor a medida que se avanza hacia regímenes medios y altos, lo que indica una respuesta propulsiva más favorable en la GM Godínez dentro del rango analizado.

Una vez establecida la relación entre régimen y velocidad, el siguiente paso consiste en analizar cuánto combustible requiere la embarcación para navegar a cada velocidad (Figura 4-2). Por este motivo, en lugar de representar el consumo únicamente frente a las rpm, se ha optado por relacionarlo con la velocidad de navegación, ya que esta magnitud ofrece una lectura más directa desde el punto de vista operativo y permite valorar el coste energético asociado a cada banda de servicio.

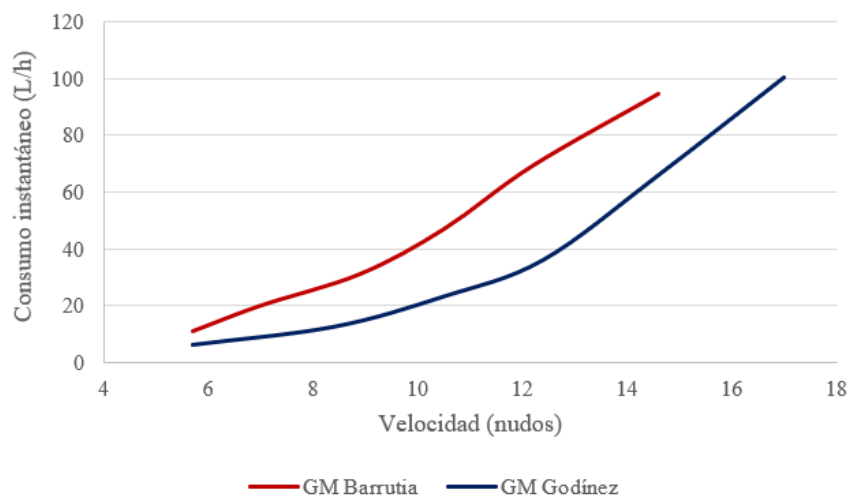


Figura 4-2 Consumo instantáneo frente a la velocidad de navegación (elaboración propia).

Cuando se representa el consumo frente a la velocidad, se observa con claridad el coste energético asociado a cada escalón de navegación. En la GM Barrutia el consumo aumenta de manera prácticamente lineal con la velocidad mientras que, en la GM Godínez, el consumo aumenta de forma no lineal con la velocidad: el incremento es moderado en la zona baja, pero se acentúa claramente a partir de velocidades medias-altas, hasta superar los 100 L/h en el extremo superior del intervalo analizado. La representación

muestra que el consumo aumenta de forma cada vez más acusada a medida que crece la velocidad, y pone de relieve que la comparación entre ambas embarcaciones no debe hacerse solo a igualdad de rpm, sino también a igualdad de velocidad alcanzada.

Para completar el análisis operativo, resulta útil expresar el consumo en función de la distancia recorrida (Figura 4-3), ya que la lectura del gráfico facilita valorar con mayor claridad la eficiencia propulsiva de la embarcación. Mientras que el consumo instantáneo informa del gasto horario, el consumo por distancia muestra cuánto combustible se necesita para recorrer una determinada milla náutica a cada velocidad de navegación.

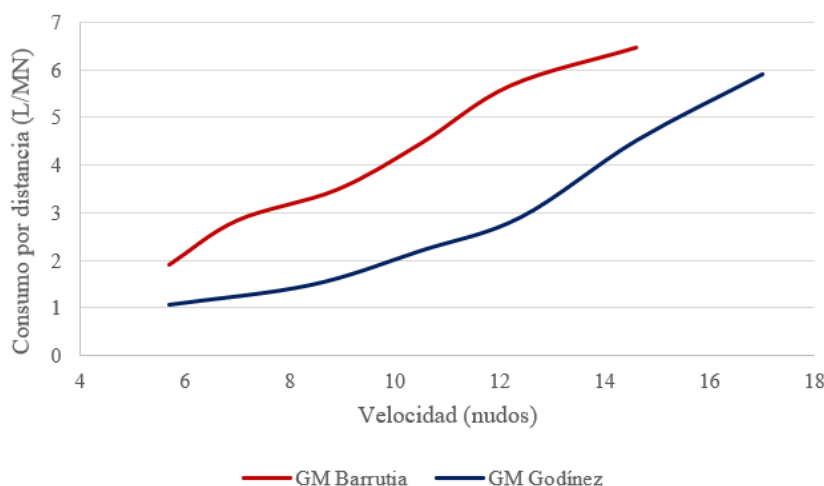


Figura 4-3 Consumo por distancia frente a la velocidad de navegación (elaboración propia).

Antes de representar gráficamente la carga relativa, se recogen en la Tabla 4-3 los valores medios asociados a cada punto de funcionamiento. Esta presentación numérica resulta útil porque permite ver de forma directa qué nivel de carga necesita cada motor para alcanzar las velocidades consideradas, facilitando así la interpretación posterior de la figura comparativa.

Régimen de giro (rpm)	Velocidades (nudos)	% carga Barrutia	% carga Godínez
600	5,7	21	19,9
800	7/8,4	29,5	23,5
1000	8,9/10,5	41,7	24,3
1200	10,5/12,4	53	32,3
1400	12,2/14,6	60,1	45,1
1600	14,6/17	61,3	52,6

Tabla 4-3 Media del porcentaje de carga de ambas lanchas (elaboración propia).

La relación entre velocidad y régimen de giro debe interpretarse junto con la carga relativa, ya que la velocidad alcanzada depende también del esfuerzo que asume el motor en cada punto de funcionamiento. En la GM Barrutia, la carga relativa pasa de valores del entorno del 21 % en la zona baja hasta aproximadamente el 61 % en los escalones altos, mientras que en la Godínez la magnitud relativa crece desde valores próximos al 20 % hasta cerca del 53 %. La tabla resume de forma numérica la evolución de la carga relativa y sirve como base para interpretar con mayor claridad la representación gráfica posterior.

Una vez establecidos los valores medios de carga relativa, su representación gráfica permite apreciar con más claridad cómo varía el esfuerzo exigido a cada motor a medida que aumenta la velocidad de navegación. Así, el análisis deja de centrarse en valores aislados y pasa a mostrar la tendencia general seguida por ambas embarcaciones en todo el intervalo estudiado (Figura 4-4).

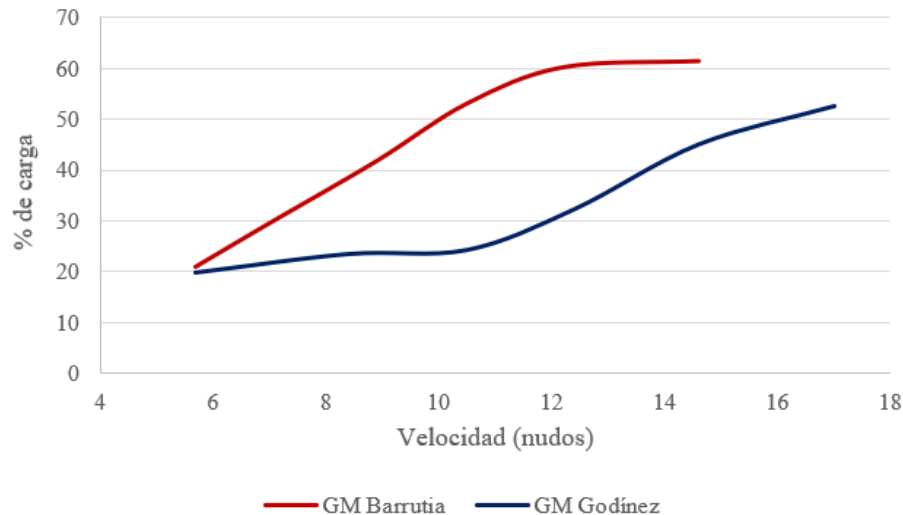


Figura 4-4 Carga relativa frente a la velocidad de navegación (elaboración propia)

Tras observar la respuesta de la embarcación en términos de velocidad, consumo y carga relativa, resulta conveniente estudiar algunas variables internas del motor que ayudan a interpretar por qué el comportamiento observado evoluciona de esa manera. De este modo, el análisis pasa de una lectura operativa, centrada en la navegación, a una lectura mecánica y térmica, centrada en el punto de funcionamiento del propulsor. A continuación, se analiza la respuesta térmica del motor frente al aumento del régimen de giro. La temperatura del refrigerante resulta especialmente útil para comprobar si el motor entra en una zona térmicamente estable y si los puntos comparados pueden considerarse representativos del funcionamiento real (Figura 4-5).

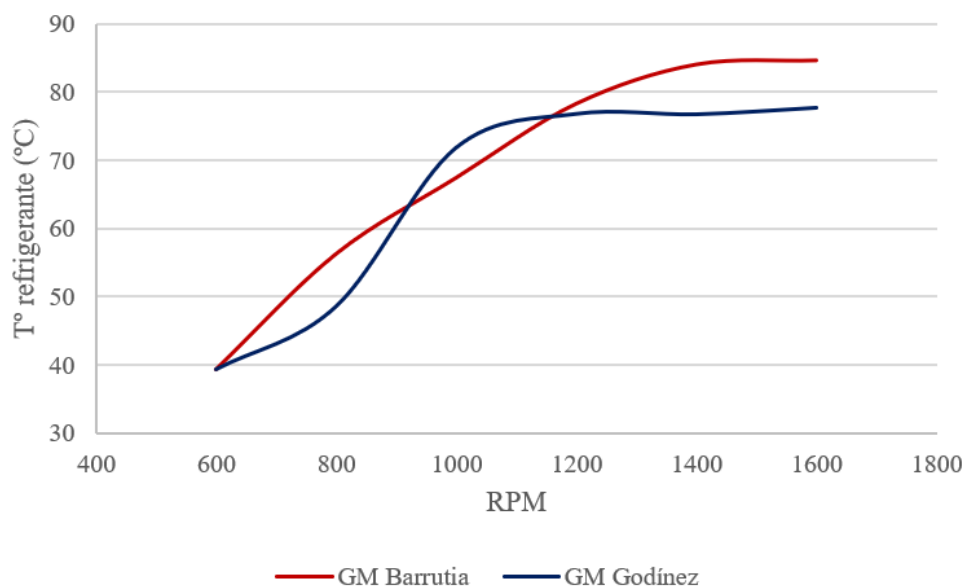


Figura 4-5 Temperatura del refrigerante frente al régimen de giro (elaboración propia).

La temperatura del refrigerante aumenta con el régimen de giro en ambas embarcaciones hasta alcanzar una zona de estabilidad térmica. En la GM Barrutia, la subida es progresiva desde 39,33 °C

hasta una meseta próxima a 84 °C, mientras que en la GM Godínez el ascenso parte de 45,25 °C y se estabiliza antes, en torno a 77 °C. En conjunto, ambos motores alcanzan un funcionamiento térmicamente estable, aunque el MTU lo hace a una temperatura algo menor.

Junto al comportamiento térmico, conviene analizar la presión de aceite (Figura 4-6), ya que se trata de una variable directamente relacionada con el estado de lubricación y con la estabilidad mecánica del motor. Su evolución con el régimen permite verificar que el estudio del consumo se está realizando en condiciones operativas normales y sin indicios aparentes de una alteración relevante del sistema de engrase.

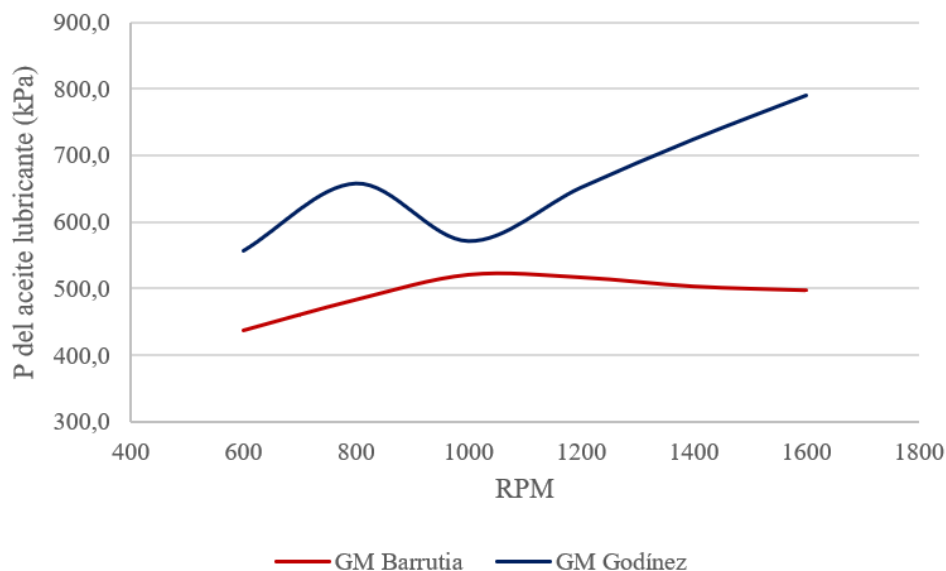


Figura 4-6 Presión de aceite lubricante frente al régimen de giro (elaboración propia)

En la Figura 4-6 se aprecia que ambos motores mantienen valores elevados en todo el rango de revoluciones, lo que indica un funcionamiento correcto del circuito de engrase. No obstante, el comportamiento no es exactamente igual en ambas lanchas. En la GM Barrutia la evolución es más estable, con un aumento suave hasta la zona media del régimen y una ligera disminución posterior, mientras que en la GM Godínez la presión se mantiene siempre por encima y presenta variaciones más marcadas, con una caída intermedia antes de volver a aumentar de forma clara a altas rpm. En conjunto, la figura sugiere que los dos motores conservan una lubricación adecuada, aunque el de la GM Godínez muestra una respuesta más sensible al cambio de régimen. Por último, en los motores sobrealimentados, la presión del aire de carga constituye una magnitud especialmente representativa del punto de operación, ya que conecta el aumento del régimen con la capacidad del sistema de admisión para suministrar el aire necesario al proceso de combustión. Su representación resulta particularmente útil para enlazar el comportamiento del motor con la evolución observada del consumo (Figura 4-7).

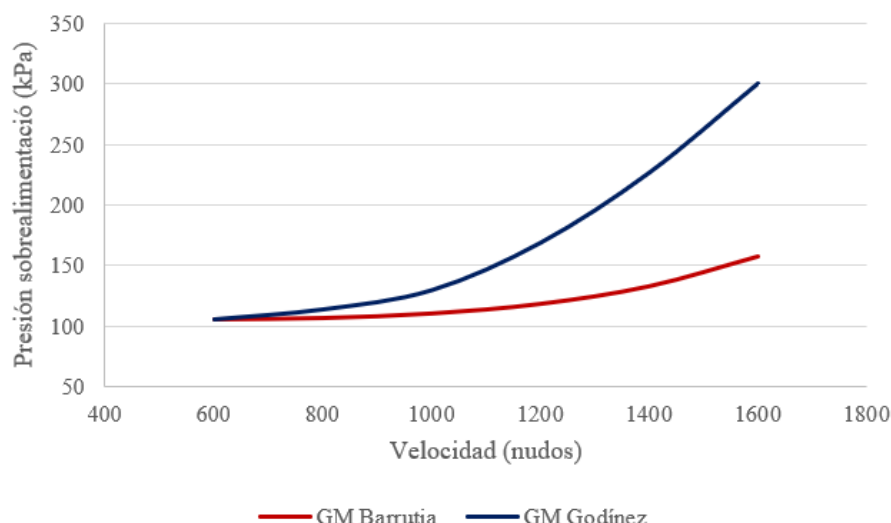


Figura 4-7 Presión de aire de carga frente al régimen de giro (elaboración propia).

La evolución obtenida muestra que ambos motores parten de valores próximos en la zona de bajo régimen, pero su comportamiento diverge claramente a medida que aumenta la carga. En el Caterpillar el incremento de la presión es progresivo y moderado, mientras que en el MTU el crecimiento se intensifica de forma mucho más acusada a partir de la zona media del régimen. Este comportamiento no debe interpretarse como un error de medida, sino como una diferencia real en la respuesta de ambas plantas propulsoras, coherente con una estrategia de sobrealimentación más intensa en el MTU. En consecuencia, la comparación correcta confirma que el MTU desarrolla una capacidad de sobrealimentación significativamente mayor cuando aumenta la exigencia propulsiva.

El análisis desarrollado en este subapartado permite pasar de una lectura puramente mecánica del motor a una interpretación operativa más completa. En primer lugar, la relación entre régimen y velocidad muestra cómo responde la embarcación en navegación real; en segundo lugar, las gráficas de consumo frente a velocidad permiten valorar el coste energético asociado a cada banda de servicio; y, finalmente, las variables internas del motor ayudan a explicar por qué ese comportamiento evoluciona de una determinada manera. Una vez establecido este marco, el estudio puede desplazarse hacia el análisis de emisiones, que debe interpretarse precisamente a la luz del punto de operación, de la carga y de las condiciones de funcionamiento descritas en este subapartado.

4.1.2 Emisiones de gases de escape

Para el análisis de las emisiones de los motores se han seleccionado las mediciones obtenidas durante los ensayos en los que se incrementó progresivamente el régimen de giro del motor desde las 600 rpm hasta 1600 rpm. Este criterio permite relacionar cada valor registrado con un punto de funcionamiento concreto y comparar la evolución de las emisiones de forma ordenada. La toma de datos se realizó en el conducto de escape mediante analizador de gases Testo 340.

En primer lugar, se presentan los valores medios obtenidos para cada motor en los distintos regímenes de giro analizados. La Tabla 4-4 y la Tabla 4-5 recogen, respectivamente, la temperatura de gases, la temperatura ambiente y las concentraciones medidas de NO_x, NO, CO, O₂ y CO₂ para el motor Caterpillar C18 y para el motor MTU 10V2000M84. Esta presentación previa permite disponer de una base numérica común antes de pasar a la interpretación gráfica de las tendencias observadas.

Régimen de giro (rpm)	T° gases (°C)	T° ambiente (°C)	NOx (ppm)	NO (ppm)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
600	127,3	21,1	1283,8	1222,7	83,2	12,5	6,1
800	182,3	21,6	1350,4	1286,2	85,8	11,6	6,7
1000	241,8	21,8	1287,2	1226,0	92,6	12,5	6,1
1200	312,2	22,1	1381,5	1315,7	78,8	11,1	7,0
1400	376,0	22,9	1274,6	1213,8	86,8	12,6	6
1600	403,9	23,3	1291,8	1230,2	88,7	12,4	6,2

Tabla 4-4 Valores medios de las emisiones del motor Caterpillar C18 según el régimen de giro (elaboración propia).

En la Tabla 4-4 se recogen los valores medios registrados para el motor Caterpillar C18 en los regímenes comprendidos entre 600 y 1600 rpm. Estos datos constituyen la referencia de comparación para analizar la evolución de las emisiones del segundo sistema propulsor estudiado.

Del mismo modo, en la Tabla 4-5 se presentan los valores medios correspondientes al motor MTU 10V2000M84 para los mismos regímenes de giro. De esta forma, la comparación entre ambos motores puede realizarse directamente a igualdad de rpm y con las mismas variables de análisis.

Régimen de giro (rpm)	T° gases (°C)	T° ambiente (°C)	NOx (ppm)	NO (ppm)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
600	117,6	17,3	560,8	534,2	319,0	12,6	6,0
800	184,3	18,0	926,5	882,2	125,7	12	6,4
1000	262,5	20,0	1381,6	1315,6	72,2	11,4	6,9
1200	283,0	20,6	1501,6	1430,0	43,2	11,2	7,0
1400	272,0	21,8	1112,2	1059,2	35,0	11,8	6,6
1600	263,8	22,4	820,9	781,7	42,1	12,2	6,3

Tabla 4-5 Valores medios de las emisiones del motor MTU 10V2000M84 según el régimen de giro (elaboración propia).

A partir de los valores recogidos en las tablas anteriores, se representan a continuación las principales variables de emisiones en función del régimen de giro, con el fin de identificar de forma visual las diferencias de comportamiento entre ambos motores y facilitar la interpretación conjunta de las tendencias observadas.

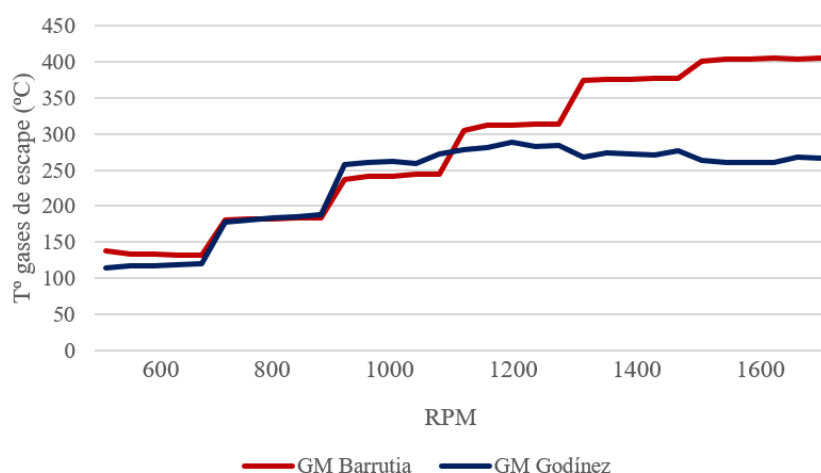


Figura 4-8 Temperatura de los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).

La figura permite observar la evolución de la temperatura de los gases de escape en función del régimen de giro del motor para los dos casos analizados. De forma general, ambas presentan una tendencia ascendente conforme aumentan las revoluciones, lo que resulta coherente con el incremento de la carga térmica asociado al funcionamiento del motor a mayores regímenes. No obstante, el comportamiento no es lineal, sino que se desarrolla por escalones, lo que indica transiciones entre distintos estados de funcionamiento.

Asimismo, se aprecia que, aunque en la zona de bajas revoluciones ambas mediciones muestran una evolución similar, a medida que aumenta el régimen la separación entre las dos curvas se hace más evidente. En este sentido, la serie correspondiente a la GM Barrutia refleja un incremento térmico más acusado, mientras que GM Godínez mantiene una evolución más moderada y relativamente estable en la parte final del rango analizado. La gráfica pone de manifiesto diferencias en la respuesta térmica del motor entre ambos casos, especialmente en regímenes medios y altos (Figura 4-8).

A continuación, se presentan los principales parámetros de emisiones y composición de los gases de escape medidos mediante el analizador Testo 340, equipo empleado para caracterizar el comportamiento del motor en los distintos puntos de funcionamiento ensayados. Entre las variables registradas destacan el oxígeno residual (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono (CO), todas ellas especialmente relevantes para evaluar la calidad de la combustión y el nivel de emisiones generado por el motor. El análisis conjunto de estos parámetros permite interpretar de forma más completa la eficiencia del proceso de combustión, la relación aire-combustible y la evolución de los contaminantes a medida que varía el régimen de giro y la carga del motor.

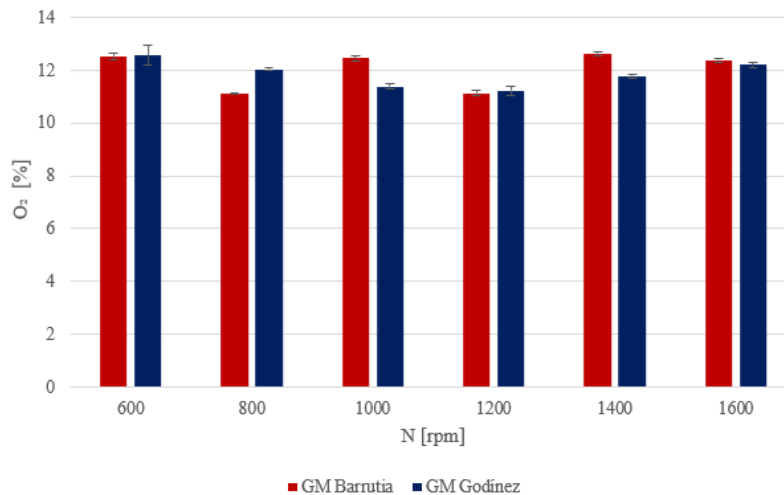


Figura 4-9 Concentración de O₂ en los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 (izquierda) y MTU 10V2000M84 (derecha) (elaboración propia).

Si se atiende al oxígeno residual en los gases (Figura 4-9), la comparación entre GM Barrutia y GM Godínez muestra un comportamiento próximo en términos generales, aunque con diferencias apreciables en algunos regímenes intermedios. En ambos casos, el contenido de O₂ se mantiene dentro de una banda relativamente reducida, con valores máximos cercanos al 12,6 % y mínimos en torno al 11,1–11,2 %, lo que refleja una variación moderada del exceso de aire a lo largo del ensayo. No obstante, GM Barrutia presenta oscilaciones más marcadas, alternando descensos y recuperaciones más visibles, mientras que GM Godínez sigue una evolución algo más uniforme. Las mayores separaciones entre ambos aparecen en la zona media del intervalo, mientras que a bajo y alto régimen los valores vuelven a aproximarse, lo que sugiere un comportamiento global similar con diferencias puntuales en determinados puntos de funcionamiento. Por ello el oxígeno residual no marca una diferencia tan fuerte entre ambos motores como sí ocurre con otras variables, pero sí ayuda a entender que las mayores divergencias deben buscarse en la forma en que cada propulsor transforma esa mezcla aire-combustible en la zona media y alta de funcionamiento, donde el funcionamiento del motor es más exigente y cualquier variación en el proceso se refleja con mayor intensidad en su comportamiento y en sus emisiones.

Esa diferencia se aprecia con mucha más claridad al observar el monóxido de carbono (Figura 4-10).

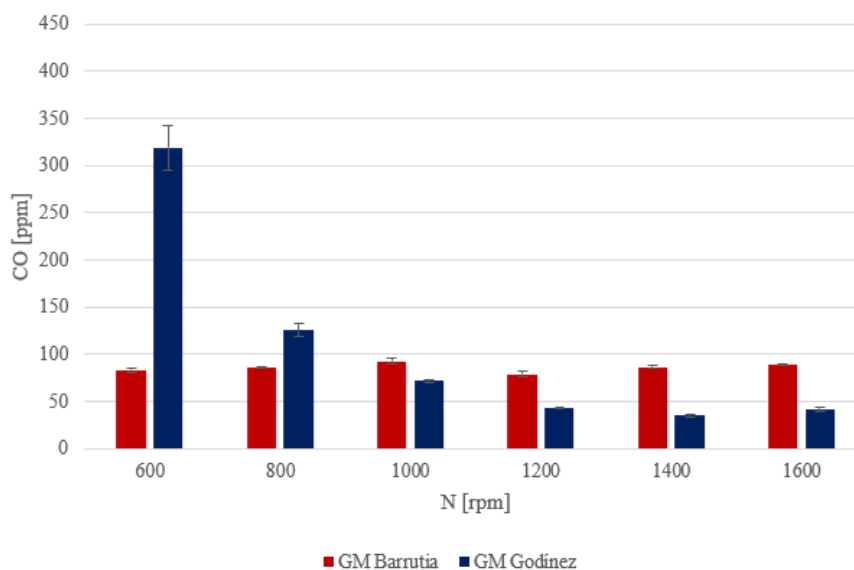


Figura 4-10 Concentración de CO frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).

En la gráfica se puede ver que el MTU presenta a bajo régimen unas emisiones de CO claramente más elevadas que el Caterpillar, con un máximo muy acusado en el primer punto del ensayo, mientras que este último se mantiene en valores bastante más contenidos. Ese valor que sobresale de forma tan marcada puede asociarse a un funcionamiento especialmente desfavorable para la oxidación completa del monóxido de carbono, ya que a muy bajo régimen la combustión suele desarrollarse con menor temperatura efectiva, peor atomización del combustible y una renovación de aire menos favorable, de modo que parte del CO generado no llega a transformarse completamente en CO₂. A medida que aumenta el régimen, el MTU reduce de forma muy intensa sus emisiones hasta alcanzar su mínimo en la zona media-alta de funcionamiento, pasando incluso a situarse por debajo del Caterpillar. Frente a ello, el Caterpillar muestra una evolución mucho más uniforme, moviéndose dentro de una banda relativamente estable durante todo el intervalo ensayado. En conjunto, la gráfica pone de manifiesto que el MTU penaliza de forma clara el funcionamiento a bajo régimen en términos de CO, pero mejora notablemente en regímenes medios y altos, donde llega a ofrecer un comportamiento más favorable.

La lectura del CO₂ (Figura 4-11) completa bien esta interpretación, ya que permite observar cómo evoluciona la fracción de dióxido de carbono en los gases de escape a medida que varía el punto de funcionamiento. En este caso, ambos motores presentan una tendencia bastante parecida. El Caterpillar presenta una variación moderada del CO₂, con un mínimo próximo al 6,0 % y un máximo en torno al 7,0 %. El MTU muestra un comportamiento muy parecido, moviéndose igualmente entre un valor mínimo cercano al 6,0 % y un máximo también próximo al 7,0 %. Por tanto, a diferencia de lo observado en el CO, en este caso las diferencias entre ambos motores son reducidas, lo que apunta a un comportamiento bastante similar en cuanto a la proporción de CO₂ presente en los gases de escape.

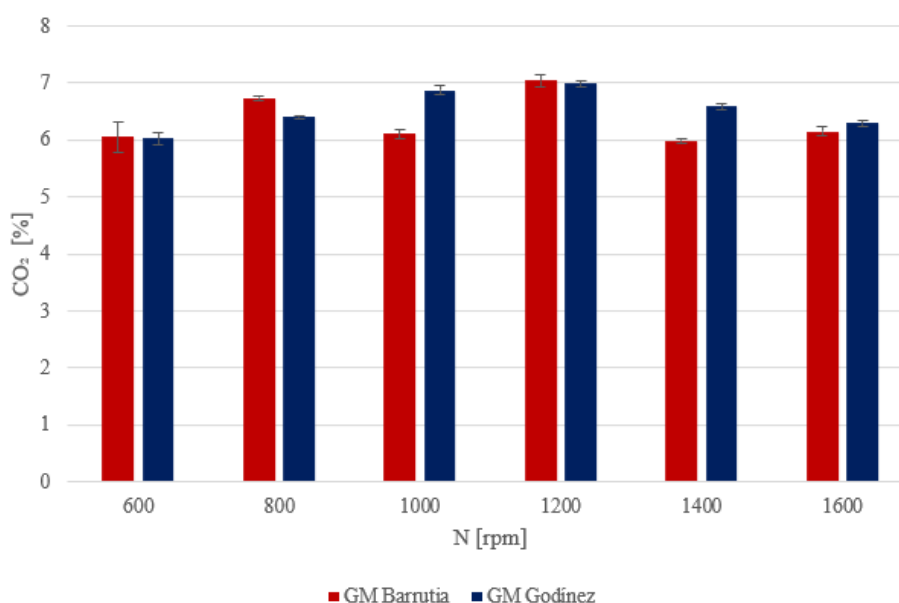


Figura 4-11 Concentración de CO₂ en los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 (izquierda) y MTU 10V2000M84 (derecha) (elaboración propia).

La comparación de los NO_x (Figura 4-12) es la variable que mejor resume las diferencias de comportamiento entre ambos motores en términos ambientales. El Caterpillar presenta una evolución bastante uniforme del NO_x, moviéndose en una banda estrecha y con un máximo próximo a 1380 ppm y un mínimo en torno a 1275 ppm, lo que refleja un comportamiento relativamente estable a lo largo de todo el intervalo ensayado. El MTU, en cambio, muestra una variación mucho más acusada, con un mínimo cercano a 560 ppm a bajo régimen y un máximo próximo a 1500 ppm en la zona media, para descender de nuevo en los regímenes más altos. En términos comparativos, esto indica que el MTU parte con emisiones claramente inferiores, llega a superar al Caterpillar en la zona central de funcionamiento

y vuelve a situarse por debajo al final del intervalo. Esta evolución resulta coherente con un comportamiento térmico más cambiante en el MTU, frente a la respuesta más sostenida y regular que presenta el Caterpillar.

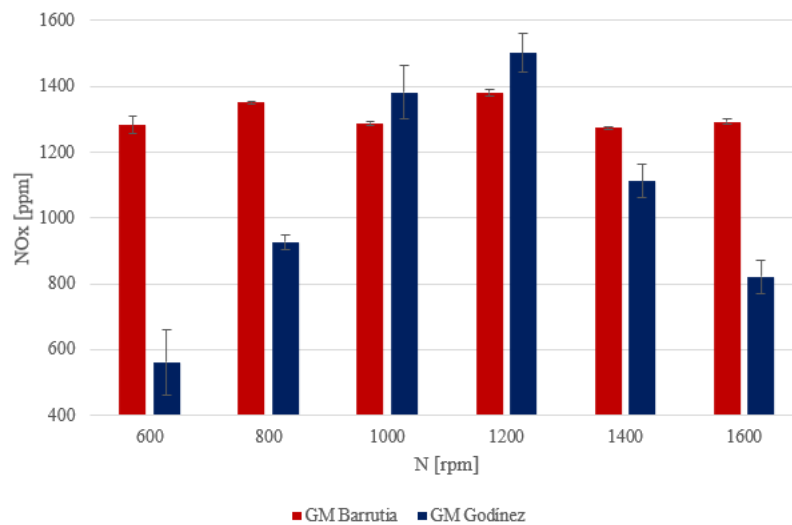


Figura 4-12 Concentración de NOx en los gases de escape frente al régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).

Con el fin de complementar el análisis conjunto del CO y del CO₂, se ha calculado el índice de carbono (IC) (ecuación (3)) (Figura 4-13), definido como la relación entre la cantidad de monóxido de carbono y el total formado por CO y CO₂, expresando este último en ppm. Este parámetro permite valorar de forma sintética la calidad de la combustión, de manera que valores más bajos del IC indican una combustión más completa, al transformarse una mayor proporción del carbono en CO₂ en lugar de CO. En la comparación entre ambos motores se observa que el MTU presenta un índice de carbono muy superior a bajo régimen, especialmente a 600 rpm, mientras que en la zona media y alta reduce notablemente sus valores y pasa a situarse por debajo del Caterpillar. El Caterpillar, por su parte, muestra una evolución más uniforme en todo el intervalo ensayado. En consecuencia, el índice de carbono confirma que el comportamiento relativo de ambos motores depende del régimen de funcionamiento y que la combustión del MTU mejora de forma apreciable al aumentar las rpm.

$$IC = \frac{CO(ppm)}{CO(ppm) + CO_2(ppm)} \cdot 100 \quad (3)$$

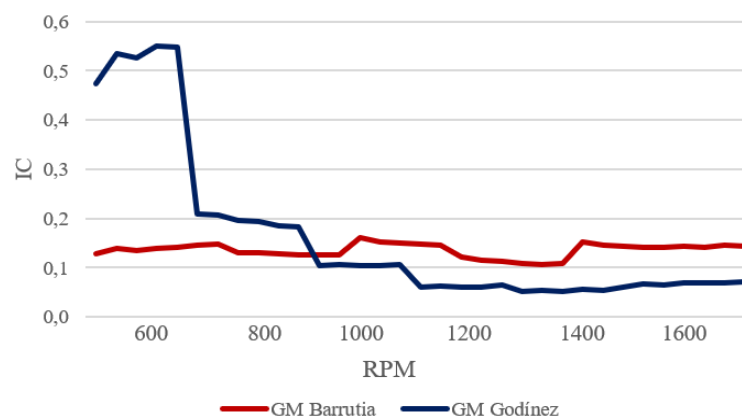


Figura 4-13 Comparación del índice de carbono (IC) en función del régimen de giro para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 (elaboración propia).

Los resultados obtenidos muestran que ninguno de los dos motores presenta un comportamiento claramente superior en todos los regímenes analizados. El Caterpillar C18 destaca por una respuesta más uniforme a lo largo de todo el intervalo de funcionamiento, con valores relativamente estables de CO y NOx y una evolución térmica creciente con el régimen. Por el contrario, el MTU 10V2000M84 presenta una respuesta más dependiente del punto de operación, con valores elevados de CO a bajas rpm, una mejora clara en la zona media y alta del régimen y una evolución de NOx más variable, con un máximo en la zona intermedia. En términos generales, la comparación pone de manifiesto que las diferencias entre ambos motores no pueden valorarse a partir de un único contaminante o de un único régimen de giro, sino que deben interpretarse teniendo en cuenta el perfil real de utilización de las lanchas de instrucción. Por ello, la valoración final de las emisiones confirma que el comportamiento ambiental de cada sistema propulsor está estrechamente ligado a sus condiciones de operación y que la comparación entre ambos solo resulta representativa cuando se realiza sobre puntos equivalentes de funcionamiento. Esta misma idea queda reforzada por el índice de carbono, que resume de forma sintética la calidad de la combustión y confirma que el MTU penaliza especialmente la zona baja del régimen, mientras que el Caterpillar mantiene un comportamiento más regular.

4.2 Discusión técnica de resultados

La interpretación de los resultados obtenidos debe hacerse desde una visión de conjunto y no como una suma aislada de variables. En una embarcación de este tipo, el motor no trabaja de forma independiente, sino integrado en un sistema formado por el propio motor, la reductora, la línea de ejes, la hélice y el casco. Por ello, las variaciones observadas en velocidad, consumo, carga relativa, temperaturas y emisiones no responden únicamente al aumento del régimen de giro, sino al modo en que cada instalación propulsiva transforma ese régimen en par útil sobre el eje, en empuje hidrodinámico y en unas determinadas condiciones de combustión. Esta forma de interpretar los datos es coherente con el planteamiento general de la memoria, que persigue comparar ambos motores en condiciones reales de navegación, y no únicamente a partir de valores de catálogo o de ensayos en banco.

La primera diferencia que ayuda a explicar los resultados aparece en la propia arquitectura de ambos sistemas propulsivos (véase Tabla 3-2). La comparación desarrollada en la memoria muestra que el Caterpillar C18 es un motor de seis cilindros en línea, 18,1 L de cilindrada total, relación de compresión 16,5:1, potencia nominal de 746 kW a 2300 rpm y reductora con relación 1,971:1. Frente a él, el MTU 10V2000M84 es un V10 a 90°, 22,30 L, relación de compresión 13,5:1, potencia nominal de 1015 kW a 2450 rpm y reductora con relación 2,519:1. La misma tabla recoge además una diferencia clara en el par ideal a la salida de la reductora, del orden de 6105 N·m para el C18 frente a 9966 N·m para el MTU. Por tanto, no se están comparando solo dos motores distintos, sino dos soluciones propulsivas diferentes: una instalación más simple y lineal en el C18, y otra más potente, con mayor multiplicación de par y mayor complejidad de control, en el MTU.

Esta diferencia estructural afecta directamente a la navegación. La reductora del conjunto MTU reduce más el régimen del eje y multiplica más el par disponible para la hélice, de manera que la cadena cinemática trabaja en unas condiciones más favorables para transformar potencia de motor en empuje útil. Por eso, cuando se comparan ambas embarcaciones a igualdad de régimen (Figura 4-1 y Figura 4-4), la Godínez alcanza velocidades superiores y lo hace con menores porcentajes de carga relativa. A 1600 rpm, por ejemplo, la Barrutia alcanza 14,6 nudos con una carga del 61,3 %, mientras que la Godínez llega a 17 nudos con una carga del 52,6 %, y esa diferencia se mantiene en todo el intervalo analizado. En consecuencia, la ventaja de la Godínez no debe atribuirse únicamente a que monte un motor de mayor potencia nominal, sino a que el conjunto motor–reductora parece estar mejor acoplado al propulsor para sostener la demanda creciente de navegación.

La propia arquitectura interna de ambos motores también influye en el modo en que se entrega la potencia. El C18 concentra su cilindrada en seis cilindros de mayor volumen unitario, mientras que el MTU reparte una cilindrada total superior entre diez cilindros más pequeños y en disposición en V. Esta diferencia puede interpretarse, desde un punto de vista mecánico, como una entrega de par potencialmente más repartida en el MTU y una respuesta más sencilla y directa en el C18. A ello se suma que la comparación técnica de la memoria caracteriza al MTU por una mayor densidad de potencia, un sistema de inyección *common rail* electrónico y una sobrealimentación secuencial con refrigeración del aire de carga, mientras que el C18 queda definido como un motor turboalimentado y postenfriado, con una arquitectura más convencional. En otras palabras, el MTU no solo dispone de más potencia, sino que responde como un motor diseñado para sostener mayor demanda propulsiva dentro de un mapa operativo más complejo.

La subida del consumo con el régimen y con la velocidad debe entenderse a partir de dos mecanismos que actúan simultáneamente. El primero es interno al motor: al aumentar las rpm, el motor completa más ciclos por unidad de tiempo y, por tanto, necesita inyectar más combustible. El segundo es propulsivo: a medida que la embarcación gana velocidad, la resistencia al avance y la demanda hidrodinámica sobre la hélice aumentan, por lo que cada nudo adicional exige un esfuerzo energético cada vez mayor. Esa es la razón por la que el consumo no crece de forma lineal (Figura 4-2). En la Barrutia pasa de 10,9 L/h a 94,7 L/h entre 600 y 1600 rpm, y en la Godínez de 6,1 L/h a 100,5 L/h en el mismo intervalo. Por tanto, el fuerte incremento del consumo en la zona media y alta del régimen no se explica solo porque el motor gire más deprisa, sino porque el conjunto entra en una zona donde el coste energético de la navegación aumenta de forma muy acusada.

Esa misma lógica explica la evolución de la carga relativa. La carga no aumenta únicamente porque aumenten las revoluciones, sino porque el motor debe entregar cada vez más par efectivo para vencer una demanda propulsiva creciente. La Figura 4-4 muestra con claridad que, a medida que se pasa de la zona baja a la alta del intervalo ensayado, la Barrutia incrementa su carga desde el 21 % hasta el 61,3 %, mientras que la Godínez pasa del 19,9 % al 52,6 %. En ambos casos la tendencia es ascendente, pero la Godínez mantiene un mayor margen operativo en todos los escalones. La lectura técnica de esta diferencia es importante: el MTU no solo alcanza más velocidad, sino que lo hace sin acercarse tanto a su límite relativo de funcionamiento. Eso refuerza la idea de que la arquitectura del conjunto MTU está mejor adaptada a absorber incrementos de demanda propulsiva sin penalizar tanto la carga.

La evolución de la temperatura del refrigerante (Figura 4-5) puede interpretarse como el paso desde la fase de calentamiento hacia una zona de equilibrio térmico. En ambos motores, la temperatura aumenta al abandonar los regímenes más bajos y después tiende a estabilizarse, lo que indica que el sistema de refrigeración empieza a evacuar calor al mismo ritmo al que el motor lo genera. En el Caterpillar, la temperatura del refrigerante pasa de 39,3 °C a 84,6 °C entre 600 y 1600 rpm, mientras que en el MTU evoluciona de 27,67 °C a 77,7 °C. En el MTU esta estabilización aparece apoyada por una arquitectura térmica más elaborada. La documentación funcional del 10V2000M84 incluye de forma específica apartados dedicados al sistema de refrigeración y al sistema de lubricación, y la propia comparación de la memoria le atribuye mayores volúmenes de aceite y refrigerante y una masa en seco superior a la del C18. Por ello, la forma más contenida y estable de su curva térmica puede relacionarse no solo con el punto de operación, sino también con una mayor inercia térmica y con una gestión de la refrigeración más sofisticada.

La presión de aceite sigue una lógica distinta, pero igualmente coherente (Figura 4-6). Al aumentar el régimen, la bomba de lubricación incrementa su caudal y la presión tiende a elevarse hasta quedar modulada por el propio circuito y por los elementos de regulación. En el C18 la presión pasa de 437,3 kPa a 497,6 kPa entre 600 y 1600 rpm, mientras que en el MTU evoluciona de 557,5 kPa a 790,8 kPa. Más allá del valor absoluto, lo relevante es que ambas curvas muestran un comportamiento consistente con un motor que trabaja a carga creciente y necesita asegurar un caudal suficiente para el engrase y la protección térmica. En el MTU, además, la documentación funcional asocia la monitorización del aceite

al sistema global de control del motor, junto con otras variables de admisión, combustible y escape, lo que refuerza la interpretación de que su respuesta está más intensamente gestionada.

La variable que mejor ayuda a explicar la diferencia de comportamiento entre ambos motores es la presión de aire de carga (Figura 4-7). El Caterpillar C18 pasa de 105,3 kPa a 157,7 kPa entre 600 y 1600 rpm, mientras que el MTU 10V2000M84 evoluciona de 105,2 kPa a 299,9 kPa en el mismo intervalo. Por tanto, la diferencia entre ambos no está en el punto inicial, donde los valores son muy parecidos, sino en la forma en que crece la sobrealimentación al aumentar el régimen: en el C18 el incremento es progresivo y moderado, mientras que en el MTU se vuelve mucho más acusado a partir de la zona media. Esta evolución es coherente con la arquitectura descrita en la memoria, donde el C18 aparece como un motor turboalimentado y postenfriado, mientras que el MTU incorpora turboalimentación secuencial con refrigeración del aire de carga, además de control del soplado mediante válvulas de descarga gobernadas por la propia presión de aire de carga. Desde el punto de vista físico, esto significa que el MTU dispone de una mayor capacidad para aumentar la masa de aire admitida cuando crece la demanda propulsiva, lo que le permite sostener mayores aportes de combustible y de par con un margen de funcionamiento más favorable. En consecuencia, la fuerte subida de la presión de aire de carga en el MTU se relaciona de forma directa con su mejor respuesta en velocidad y con su menor carga relativa en los puntos comparados.

La temperatura de los gases de escape (Figura 4-8) también ayuda a entender la diferencia de comportamiento. En el Caterpillar aumenta de forma casi continua desde 127,3 °C hasta 403,9 °C, mientras que en el MTU pasa de 117,6 °C a un máximo de 283,0 °C en la zona media y después desciende ligeramente hasta 263,8 °C en la banda alta. La lectura más razonable es que, en el C18, la carga térmica crece de forma más lineal con el régimen, mientras que en el MTU el aumento de la sobrealimentación y la gestión del aire modifican la severidad térmica del proceso al entrar en cargas más altas. Dicho de otro modo, en el C18 la combustión parece evolucionar de una manera más progresiva y uniforme, mientras que en el MTU cambia más claramente de carácter al pasar de la zona baja a la media y alta. Esta interpretación es coherente con el hecho de que el fabricante dedique apartados específicos al sistema de carga, a la gestión del motor y al sistema de refrigeración, lo que sugiere una interacción más intensa entre aire, combustible y control térmico.

Las curvas de O₂ residual y CO₂ (Figura 4-9 y Figura 4-11) permiten entrar ya en la calidad de la combustión. En ambos motores, cuando se pasa de baja a media carga, el O₂ residual disminuye y el CO₂ aumenta, lo que indica que se consume una mayor fracción del oxígeno disponible y que una parte mayor del carbono se oxida completamente. En el MTU esta tendencia es especialmente clara entre 600 y 1200 rpm: el O₂ desciende de 12,6 % a 11,2 % y el CO₂ aumenta de 6,0 % a 7,0 %. En el Caterpillar ocurre algo parecido, aunque de forma más uniforme. Cuando en la zona alta del régimen el MTU vuelve a mostrar una ligera recuperación del O₂ y una pequeña caída del CO₂, la interpretación más coherente es que el aumento muy fuerte del soplado introduce de nuevo un mayor exceso de aire disponible. Por ello, estas curvas no deben verse solo como medidas de composición de gases, sino como una representación indirecta del equilibrio aire-combustible y del grado de aprovechamiento del aire dentro del cilindro.

El comportamiento del CO (Figura 4-10) y del índice de carbono es uno de los puntos más reveladores de toda la comparación. El Caterpillar mantiene valores de CO relativamente estables, entre 78,8 y 92,6 ppm, mientras que el MTU arranca en 319,0 ppm a 600 rpm, cae a 125,7 ppm a 800 rpm y desciende después hasta valores comprendidos entre 35,0 y 43,2 ppm en la zona de 1200-1600 rpm. Esta diferencia indica que el MTU penaliza claramente la combustión a muy baja carga, pero mejora de forma muy marcada cuando entra en una zona más favorable de funcionamiento. Como el índice de carbono relaciona precisamente la fracción de carbono que aparece como CO con la suma de CO y CO₂, puede interpretarse que un descenso fuerte del CO acompañado por un aumento de CO₂ equivale a una combustión más completa. Desde esta perspectiva, la arquitectura del MTU parece mucho más sensible al punto de operación: a bajo régimen trabaja en una zona poco favorable, pero cuando aumenta la carga

la combustión mejora de forma notable. El C18, en cambio, muestra una respuesta más regular y menos dependiente del escalón exacto de rpm.

La evolución de los NO_x (Figura 4-12) refuerza esta misma lectura. En el Caterpillar los valores se mantienen en una banda relativamente estable, entre 1274,6 y 1381,5 ppm, mientras que en el MTU crecen desde 560,8 ppm a 600 rpm hasta un máximo de 1501,6 ppm a 1200 rpm, para descender después hasta 820,9 ppm a 1600 rpm. La coincidencia en el MTU entre máximo de NO_x, máximo térmico de gases de escape y mínimo de O₂ residual en torno a 1200 rpm sugiere que esa zona corresponde al punto de combustión más intensa del intervalo. Después, al seguir aumentando la sobrealimentación y cambiar las condiciones de aire disponible, la severidad térmica relativa se contiene y los NO_x disminuyen. Por tanto, los NO_x no solo están diciendo cuánto emite cada motor, sino en qué banda del régimen se está produciendo la combustión más favorable para su formación. Esto vuelve a mostrar que el C18 tiene una respuesta más lineal y que el MTU cambia mucho más de comportamiento según la carga.

También debe tenerse en cuenta la influencia del sistema de monitorización y adquisición de datos. En la memoria se indica que, para el MTU, parte de la información se obtuvo mediante diagnosis con software específico y lectura de parámetros internos del sistema de control, mientras que en el Caterpillar el tratamiento de datos se apoyó en registros de máquinas y mediciones con el analizador Testo 340. Además, la propia documentación del MTU describe una arquitectura con monitorización de presión de aire de carga, presión de aceite, temperatura del refrigerante, temperatura y presión de combustible, temperatura de escape y velocidad del turbocompresor. Esto no significa por sí mismo que un motor sea mejor que otro, pero sí ayuda a entender que el MTU está concebido como un sistema más intensamente gestionado y más sensible a la regulación electrónica del punto operativo.

A pesar de todo lo anterior, la discusión debe formularse con prudencia. Los datos proceden de navegación real, de modo que siempre existe la influencia del estado de la mar, el viento, la corriente o la carga transportada, y además las emisiones se comparan como concentraciones en ppm y en porcentaje, no como magnitudes normalizadas en g/kWh. Por ello, la lectura que puede hacerse es comparativa y operativa, pero no estrictamente normativa. Sin embargo, esta limitación no invalida el análisis, sino que obliga a interpretarlo correctamente: no se trata de certificar emisiones de homologación, sino de comprender cómo responden ambos sistemas propulsivos en condiciones reales de servicio y qué diferencias técnicas explican esa respuesta.

La explicación técnica más sólida de los resultados es que la superioridad de la GM Godínez en navegación no se debe a un único factor aislado, sino a la superposición de varios mecanismos que actúan en la misma dirección. El primero es propulsivo, porque la combinación de mayor par nominal y mayor relación de reducción proporciona más par útil sobre el eje. El segundo es arquitectónico, porque el MTU es un V10 de mayor cilindrada total, más denso en potencia y con una admisión, una inyección y un sistema de control más complejos. El tercero es funcional, porque su comportamiento mejora claramente cuando abandona la zona baja de carga y entra en un rango medio-alto donde la sobrealimentación aumenta con fuerza y la combustión se vuelve más favorable. El Caterpillar C18, por su parte, aparece como una solución más lineal y uniforme, con una combustión más estable desde abajo y una respuesta menos sensible al punto exacto de operación. Por ello, la conclusión correcta no es que uno de los dos motores sea absolutamente superior en todos los aspectos, sino que cada uno refleja una filosofía distinta: el MTU está más orientado a la prestación propulsiva y a sostener demandas altas, mientras que el C18 ofrece una respuesta más regular y predecible a lo largo del intervalo ensayado.

4.3 Reconstrucción del perfil operativo de una salida real y estimación comparativa de consumo y emisiones

Con el fin de dar una aplicación práctica a los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se planteó el análisis de una salida real de las lanchas de instrucción mediante el empleo del registro de navegación obtenido con GeoTracker. A diferencia de los ensayos realizados a regímenes estabilizados, este análisis permite reconstruir el comportamiento de la embarcación en condiciones reales de servicio,

teniendo en cuenta las variaciones de velocidad a lo largo de toda la derrota y su efecto sobre el régimen de funcionamiento del motor, el consumo de combustible y las emisiones generadas.

La metodología seguida parte de la información de posición y velocidad registrada durante la salida. A partir de esos datos se representa en primer lugar la derrota seguida por la embarcación (Figura 4-14), lo que permite visualizar el recorrido efectuado y comprobar el carácter representativo de la navegación analizada.

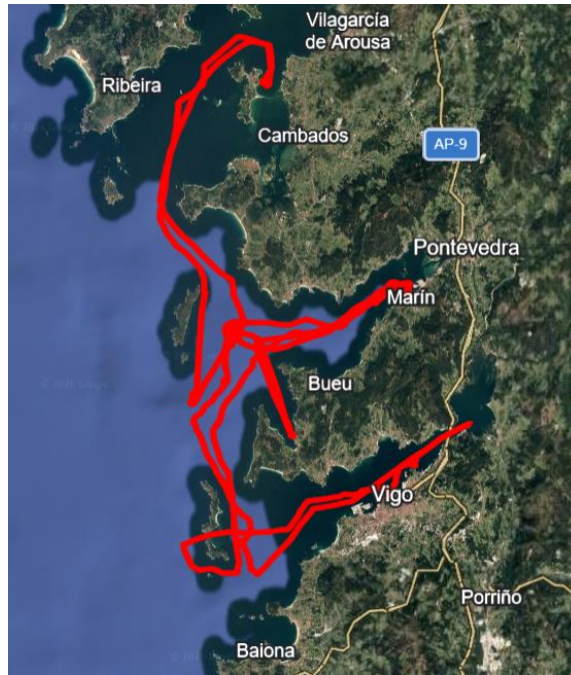


Figura 4-14 Derrota de las lanchas de instrucción durante la semana I+A (fuente propia).

Posteriormente, se procesa la serie temporal de velocidades con el objetivo de determinar cuánto tiempo permaneció la lancha en cada intervalo de velocidad. De este modo se obtiene un perfil operativo real, expresado como distribución temporal de velocidades, que constituye la base para la estimación posterior del punto de funcionamiento de los motores.

Velocidad redondeada (nudos)	Tiempo (horas)	GM Barrutia (rpm estimadas)	GM Godínez (rpm estimadas)
6	3,3	600	600
8	3,9	1000	800
10	5	1200	1000
12	1,1	1400	1200
14	0,6	1600	1400
16	0,4	>1600	1600

Tabla 4-6 Relación velocidades redondeadas con las rpm estimadas (elaboración propia)

Una vez definida la distribución de velocidades redondeadas, se emplean las relaciones velocidad-régimen obtenidas experimentalmente para estimar el régimen de giro equivalente en cada intervalo de navegación (Tabla 4-6). Este procedimiento se aplica de forma independiente a las dos configuraciones estudiadas en el trabajo, es decir, a la lancha equipada con motores Caterpillar C18 y a la equipada con

motores MTU 10V2000M84. Así, una misma misión de navegación puede trasladarse a ambas plantas propulsoras y compararse en igualdad de perfil operativo.

Conocido el tiempo de permanencia en cada intervalo de velocidad y estimado el régimen equivalente para cada lancha, se interpolan los valores de consumo y emisiones a partir de los datos experimentales obtenidos en las pruebas realizadas a bordo. De esta forma se calcula, para el conjunto de la salida, el combustible consumido, el consumo específico por distancia recorrida y la emisión total asociada de los principales contaminantes analizados. El resultado final no representa una condición idealizada de ensayo, sino una aproximación al comportamiento acumulado de ambas lanchas en una misión real de navegación.

Este enfoque permite extender la comparación puntual entre motores, realizada en apartados anteriores para distintos regímenes estabilizados, a un escenario operativo completo. En consecuencia, no solo se valora qué motor presenta menores consumos o emisiones en un punto concreto de funcionamiento, sino también cuál de los dos resulta más favorable cuando se somete a un perfil real de uso semejante al que se da habitualmente en las salidas de instrucción.

Velocidad redondeada (nudos)	Tiempo (horas)	rpm estimadas	Consumo instantáneo (L/h)	Consumo/ distancia (L/nm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO₂ (%)
6	3,3	600	10,9	1,82	1283,8	83,2	6,1
8	3,9	1000	31,1	3,89	1287,2	92,6	6,1
10	5	1200	46,9	4,69	1381,5	78,8	7,0
12	1,1	1400	69,3	5,78	1274,6	86,8	6,0
14	0,6	1600	94,7	6,76	1291,8	88,7	6,2
16	0,4	>1600	>94,7	>6,76	>1291,8	>88,7	6,2

Tabla 4-7 Datos de consumo y emisiones de la GM Barrutia durante la navegación (elaboración propia).

La Tabla 4-7 presenta la estimación del comportamiento de la GM Barrutia a lo largo de la misión analizada, relacionando los intervalos de velocidad obtenidos del registro GPS con los correspondientes regímenes de funcionamiento del motor, así como con los valores de consumo y emisiones asociados a cada punto experimental. Los datos de consumo instantáneo y emisiones han sido obtenidos a partir de las mediciones realizadas en los distintos escalones de régimen entre 600 y 1600 rpm, interpolando y acotando los valores cuando ha sido necesario para mantener la coherencia con el rango experimental del estudio.

De forma análoga, se realiza el mismo procedimiento para la GM Godínez, empleando en este caso la relación específica velocidad-régimen correspondiente a esta embarcación y los datos experimentales obtenidos para el motor MTU 10V2000M84 (Tabla 4-8). A partir del mismo perfil de velocidades derivado del registro GPS, se asignan los regímenes de funcionamiento equivalentes y se estiman los valores de consumo y emisiones asociados, permitiendo así una comparación directa entre ambas lanchas bajo un mismo escenario operativo.

Velocidad redondeada (nudos)	Tiempo (horas)	rpm estimadas	Consumo instantáneo (L/h)	Consumo/distancia (L/nm)	NOx (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)
6	3,3	600	6,1	1,02	560,8	319,0	6,0
8	3,9	800	12,5	1,56	926,5	125,7	6,4
10	5	1000	23,1	2,31	1381,6	72,2	6,9
12	1,1	1200	36,1	3,0	1501,6	43,2	7,0
14	0,6	1400	66,0	4,71	1112,2	35,0	6,6
16	0,4	1600	100,5	6,3	820,9	42,1	6,3

Tabla 4-8 Datos de consumo y emisiones de la GM Godínez durante la navegación (elaboración propia).

A partir de las tablas anteriores, en las que se ha caracterizado de forma independiente el comportamiento de la GM Barrutia y la GM Godínez para cada intervalo de velocidad, se procede a integrar los resultados con el fin de obtener una visión global de la misión analizada. Mientras que las tablas individuales permiten evaluar el consumo y las emisiones en cada punto de funcionamiento, la tabla acumulada recoge el efecto conjunto de todos los regímenes a lo largo del tiempo de operación, ponderando cada uno de ellos según su duración real en el perfil de navegación.

De este modo, el consumo total de combustible se obtiene como la suma del consumo instantáneo en cada intervalo multiplicado por el tiempo correspondiente, mientras que el consumo por distancia se calcula a partir de la relación entre el combustible total consumido y la distancia recorrida. En cuanto a las emisiones, al estar expresadas en forma de concentración (ppm y porcentaje), se han determinado valores medios ponderados en función del tiempo de permanencia en cada régimen, así como índices acumulados que permiten comparar el comportamiento global de ambas lanchas en condiciones reales de operación.

Este enfoque permite enlazar directamente los resultados experimentales obtenidos a regímenes estacionarios con un escenario de navegación real, proporcionando una estimación más representativa del rendimiento energético y ambiental de cada embarcación. Así, la tabla acumulada no solo sintetiza la información de las tablas anteriores, sino que constituye una herramienta clave para la comparación global entre la GM Barrutia y la GM Godínez bajo un mismo perfil operativo.

A partir de los resultados individuales obtenidos para cada intervalo de velocidad, se ha realizado la integración del perfil operativo con el objetivo de estimar el comportamiento global de cada embarcación a lo largo de la misión analizada. En esta primera tabla se recogen los parámetros asociados al rendimiento energético, incluyendo el tiempo total de operación considerado, la distancia recorrida equivalente y los valores acumulados de consumo de combustible. Asimismo, se presentan los consumos medios, tanto en términos horarios como por unidad de distancia, lo que permite evaluar la eficiencia global de cada lancha bajo un mismo perfil de navegación (Tabla 4-9).

Lancha	Tiempo (horas)	Distancia (mn)	Consumo total (L)	Consumo medio (L/h)	Consumo medio por distancia (L/mn)
GM Barrutia	14,3	129,0	562,7	39,35	4,4
GM Godínez	14,3	129,0	303,9	21,25	2,4

Tabla 4-9 Resultados acumulados de rendimiento y consumo (fuente propia).

Una vez analizado el comportamiento en términos de consumo y eficiencia energética, resulta necesario evaluar el impacto ambiental asociado a dicho perfil de operación. Para ello, en la siguiente tabla se presentan los valores acumulados de emisiones correspondientes a cada embarcación, obtenidos a partir de los datos experimentales medidos a distintos regímenes de funcionamiento y ponderados en función del tiempo de permanencia en cada uno de ellos.

Lancha	NO_x medio (ppm)	CO medio (ppm)	CO₂ medio (%)	Índice NO_x acumulado (ppm h)	Índice CO acumulado (ppm h)
GM Barrutia	1318,7	84,9	6,41	18858,0	1213,9
GM Godínez	1050,3	139,1	6,53	15019,4	1989,3

Tabla 4-10 Resultados acumulados de emisiones (elaboración propia)

El análisis conjunto de ambas tablas permite obtener una visión completa del comportamiento energético y ambiental de las dos lanchas en condiciones reales de operación. En términos de consumo, la GM Godínez presenta valores significativamente inferiores tanto en consumo total como en consumo por distancia recorrida, lo que indica una mayor eficiencia propulsiva para el perfil considerado.

En cuanto a las emisiones, la comparación no es unívoca y depende del contaminante analizado. La GM Godínez muestra menores valores medios ponderados de NO_x, lo que sugiere un mejor comportamiento en términos de emisiones de óxidos de nitrógeno. Sin embargo, presenta valores superiores de CO en comparación con la GM Barrutia, especialmente en los regímenes bajos de funcionamiento. Por su parte, los valores de CO₂ resultan similares en ambas embarcaciones, con ligeras diferencias que pueden asociarse al grado de carga del motor en cada caso.

Estos resultados ponen de manifiesto que la elección de una u otra planta propulsora no solo afecta al consumo de combustible, sino también al perfil de emisiones, siendo necesario considerar ambos aspectos de forma conjunta para una evaluación completa del rendimiento operativo de la embarcación.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Del análisis comparativo realizado sobre los motores de propulsión instalados en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar puede concluirse, en primer lugar, que ambos sistemas propulsores trabajan de forma estable dentro del rango ensayado y que los datos obtenidos en navegación real permiten comparar su comportamiento con suficiente representatividad para extraer tendencias útiles desde el punto de vista operativo. En ambos casos, la evolución de la temperatura del refrigerante y de la presión de aceite confirma un funcionamiento mecánico coherente y sin indicios aparentes de anomalías en el intervalo analizado, lo que da solidez a la interpretación posterior de los resultados de consumo y emisiones.

En términos de capacidad propulsiva, el conjunto MTU 10V2000M84 presenta una ventaja clara frente al Caterpillar C18. La diferencia de potencia nominal, par disponible a la salida de la reductora y densidad de potencia ya anticipaba una mayor capacidad de empuje del MTU, y esa previsión se confirma en la navegación real: a medida que aumentan las revoluciones, la GM Godínez alcanza velocidades sistemáticamente superiores a las de la GM Barrutia para los mismos escalones de rpm, llegando a situarse en torno a 17 nudos frente a 14,5 nudos a 1600 rpm. Además, esa mayor velocidad se consigue con valores de carga relativa que, en varios puntos del intervalo analizado, no resultan superiores a los del Caterpillar, lo que refuerza la idea de una respuesta propulsiva más favorable del sistema MTU cuando se exige mayor prestación en navegación.

Desde el punto de vista del consumo, los resultados muestran que en ambas lanchas el gasto de combustible aumenta de forma no lineal con la velocidad, intensificándose especialmente en la zona media-alta del régimen. Esta observación es importante porque confirma que la comparación entre motores no debe hacerse únicamente a igualdad de rpm, sino también a igualdad de velocidad alcanzada y de condición de operación. Por ello, no sería correcto afirmar que uno de los dos motores es globalmente mejor en cualquier escenario; más bien, cada uno presenta ventajas distintas según el perfil de misión. El MTU ofrece una respuesta más favorable cuando se prioriza velocidad y margen propulsivo, mientras que el Caterpillar muestra un comportamiento operativo más contenido y progresivo dentro del rango ensayado.

En cuanto a las emisiones de escape, la comparación pone de manifiesto diferencias relevantes entre ambos motores. El Caterpillar C18 presenta una respuesta más uniforme a lo largo del intervalo de funcionamiento, con valores relativamente estables de CO y NOx y una evolución térmica creciente con el régimen. El MTU, por el contrario, muestra una mayor dependencia del punto de operación: penaliza claramente la zona baja del régimen con valores elevados de CO, mejora de forma apreciable en la zona media y alta, y presenta una evolución de NOx más variable, con un máximo en la zona

intermedia. El índice de carbono refuerza esta interpretación, ya que resume de forma sintética la calidad de la combustión y confirma un comportamiento más regular del Caterpillar frente a un MTU más sensible al régimen de giro. En consecuencia, la valoración ambiental de ambos motores no puede hacerse a partir de un único contaminante ni de un único punto de funcionamiento, sino que debe vincularse al perfil real de utilización de las lanchas.

En síntesis, el trabajo permite concluir que el motor MTU 10V2000M84 ofrece mejores prestaciones propulsivas y una mayor capacidad para sostener velocidades superiores, mientras que el Caterpillar C18 destaca por un comportamiento más regular en emisiones dentro del rango estudiado. Por tanto, la elección entre uno u otro no debería plantearse en términos absolutos, sino en función de la prioridad operativa: si se busca mayor margen de velocidad y capacidad de respuesta, el sistema MTU resulta más favorable; si se prioriza la homogeneidad del funcionamiento y una respuesta ambiental más estable en distintos regímenes, el Caterpillar presenta ventajas apreciables. En cualquier caso, el estudio confirma la utilidad de la toma de datos en navegación real como base objetiva para valorar el comportamiento de los motores de las lanchas de instrucción y apoyar futuras decisiones técnicas sobre su operación, mantenimiento o modernización.

5.2 Cumplimiento de los objetivos

El objetivo principal de este trabajo consistía en determinar y comparar el comportamiento de los motores de propulsión instalados en las lanchas de instrucción de la ENM, tomando como referencia los motores Caterpillar y MTU, y evaluando su desempeño en términos de emisiones contaminantes, eficiencia y consumo bajo distintos regímenes de revoluciones y velocidades de navegación. A la vista del desarrollo realizado y de los resultados obtenidos, puede afirmarse que este objetivo se ha cumplido de manera satisfactoria. El trabajo no se ha limitado a una descripción teórica de ambos sistemas, sino que ha construido una comparación apoyada en datos experimentales obtenidos en servicio real, relacionando variables operativas y parámetros del motor con resultados de consumo y emisiones.

En primer lugar, se ha cumplido el objetivo de recopilar y tratar información experimental comparable entre ambos motores. La metodología desarrollada permitió registrar datos de navegación, emisiones y funcionamiento en condiciones reales de uso de las lanchas, tanto mediante el analizador Testo 340 como mediante los registros operativos de a bordo y, en el caso del MTU, mediante la diagnosis con MTU DiaSys. Esto ha hecho posible disponer de una base de datos para comparar variables como régimen, temperaturas, presiones, consumo instantáneo y gases de escape, superando así una de las principales dificultades del estudio, que era precisamente obtener información útil y comparable entre dos plantas propulsoras diferentes.

En segundo lugar, también puede considerarse cumplido el objetivo de analizar comparativamente el comportamiento de ambos motores en términos de funcionamiento, consumo y respuesta operativa. A lo largo del trabajo se ha mostrado que las diferencias entre Caterpillar y MTU no pueden interpretarse únicamente a partir de sus potencias nominales, sino que deben analizarse en función del régimen de trabajo, la carga y el comportamiento real de la embarcación. En este sentido, el estudio ha permitido identificar tendencias claras de funcionamiento, así como diferencias relevantes en la forma en que cada motor responde a lo largo del intervalo ensayado. Del mismo modo, la comparación de las configuraciones propulsivas y de sus características principales ha servido para contextualizar técnicamente los resultados obtenidos en navegación.

Asimismo, se ha cumplido el objetivo de evaluar el comportamiento ambiental de ambos motores a partir de mediciones reales de emisiones. El análisis de CO, CO₂, NO_x e índice de carbono ha permitido comprobar que ninguno de los dos motores es superior en todos los puntos de funcionamiento y que su valoración ambiental depende claramente del régimen de operación. El Caterpillar presenta una respuesta más uniforme a lo largo del intervalo estudiado, mientras que el MTU muestra una evolución más dependiente del punto de carga, penalizando la zona baja del régimen y mejorando en la zona media y alta. Esta comparación confirma que el trabajo no solo ha servido para estudiar prestaciones, sino

también para valorar de forma razonada las implicaciones ambientales del funcionamiento real de ambas lanchas.

Por último, también puede darse por alcanzado el propósito de obtener conclusiones técnicas útiles y de generar una base objetiva para futuras decisiones sobre operación, mantenimiento o modernización. Aunque el propio planteamiento del estudio reconoce limitaciones derivadas del entorno real de navegación y de la instrumentación disponible, los resultados obtenidos son suficientemente sólidos como para extraer conclusiones comparativas fundadas y orientar futuras líneas de mejora. En consecuencia, el grado de cumplimiento de los objetivos puede considerarse alto, ya que el trabajo ha logrado transformar una toma de datos en navegación real en una comparación técnica coherente, útil y aplicable al contexto operativo de las lanchas de instrucción de la ENM.

5.3 Líneas futuras de trabajo

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, una primera línea futura clara consiste en ampliar la base experimental con un número mayor de salidas y con campañas de medida distribuidas a lo largo de distintos periodos del curso. En este estudio ya se ha demostrado que la toma de datos en navegación real es válida y útil para comparar ambos motores, pero también se ha visto que el entorno introduce dispersión en los resultados, ya que variables como el estado de la mar, el viento, la corriente o la carga pueden modificar el punto de funcionamiento del motor aun manteniendo un régimen similar. Por ello, una continuación natural del trabajo sería aumentar el número de registros por cada escalón de rpm y repetir las medidas bajo condiciones operativas más variadas, de forma que puedan establecerse bandas de comportamiento más robustas y extraerse conclusiones con mayor peso estadístico.

También resultaría conveniente perfeccionar la instrumentación empleada. En el trabajo ya se ha aprovechado, por un lado, la monitorización interna del MTU mediante el software de diagnóstico MTU DiaSys y, por otro, los registros operativos y las mediciones con el Testo 340 en los Caterpillar. Esta diferencia metodológica ha permitido construir una comparación válida, pero abre la puerta a una mejora futura basada en una adquisición de datos más homogénea entre ambos sistemas propulsores. Sería especialmente útil disponer de acceso de diagnóstico equivalente para el motor Caterpillar o, en su defecto, implementar un sistema común de registro sincronizado que recoja rpm reales, carga, consumo instantáneo, temperaturas, presiones y variables de navegación de forma simultánea. Con ello se reduciría la dependencia de lecturas puntuales y se obtendría una visión más continua del comportamiento del motor durante toda la salida.

Otra línea futura relevante consiste en profundizar en el análisis conjunto entre motor, casco y propulsor. Los resultados de este trabajo muestran que las diferencias entre ambos motores no pueden interpretarse únicamente desde la potencia nominal, sino que dependen también de cómo interactúan la reductora, la hélice, la carga relativa y la respuesta real de la embarcación en navegación. En este sentido, sería de gran interés extender el estudio hacia el análisis del sistema propulsivo completo, incorporando variables como el estado de limpieza del casco, la posible influencia de la hélice, la pérdida de rendimiento por ensuciamiento o incluso el efecto de la distribución de pesos. Una continuación en esa dirección permitiría explicar con mayor detalle por qué dos lanchas aparentemente similares presentan diferencias de velocidad, carga y consumo para regímenes de giro comparables.

También se considera una línea futura de gran valor el estudio de la evolución temporal del rendimiento de los motores y su relación con el mantenimiento. El presente trabajo ofrece una fotografía comparativa válida del comportamiento de ambas plantas propulsoras en un intervalo concreto, pero podría complementarse con un seguimiento prolongado en el tiempo que permitiese detectar tendencias de degradación o variaciones asociadas al uso. Registrar de forma periódica parámetros como presión de aceite, temperatura de refrigeración, presión de aire de carga, consumo por milla o emisiones en puntos fijos de operación permitiría convertir este enfoque comparativo en una herramienta de apoyo al mantenimiento predictivo. De ese modo, el TFG no solo serviría para describir el comportamiento de

los motores, sino también como base para un sistema de vigilancia técnica aplicable a las lanchas de instrucción.

Por último, una línea futura especialmente coherente con el planteamiento general del trabajo sería ampliar la comparación a otros combustibles o a distintos escenarios de modernización. La propia memoria subraya que el combustible influye en el rendimiento real del motor y que consumo y emisiones no deben interpretarse de forma aislada respecto a sus propiedades fisicoquímicas. Además, el trabajo se plantea como una base objetiva para futuras decisiones técnicas sobre la modernización de las lanchas y sobre criterios de sostenibilidad. En consecuencia, tendría pleno sentido prolongar esta investigación evaluando el comportamiento de ambos motores con combustibles alternativos compatibles, analizando posibles diferencias en consumo, combustión y emisiones, o incluso estudiando la viabilidad técnica de soluciones de mejora energética y de reducción del impacto ambiental en el entorno operativo de la ENM.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mitsubishi Heavy Industries – VST Diesel Engines Pvt Ltd, «Know All About Diesel Marine Engines,» Mitsubishi Heavy Industries – VST Diesel Engines Pvt Ltd, 20 06 2025. [En línea]. Available: <https://www.mhi.com/group/mvde/blog/know-all-about-diesel-marine-engines>.
- [2] Cummins Inc., «¿Cómo funcionan los motores de diésel?,» Cummins Inc., 18 04 2023. [En línea]. Available: <https://www.cummins.com/es/news/2023/04/18/how-do-diesel-engines-work>.
- [3] Departamento de Física Aplicada III (Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla), «Ciclo Diesel,» Universidad de Sevilla – Departamento de Física Aplicada III (ETS de Ingeniería), Sevilla, 2013.
- [4] MAN Energy Solutions, «Basic principles of ship propulsion: Optimisation of hull, propeller, and engine interactions for maximum efficiency,» MAN Energy Solutions, Copenhagen, 2018.
- [5] The International Council on Combustion Engines (CIMAC), «Guidelines for Diesel Engine Lubrication – Lubricating Oil Degradation (Number 22),» CIMAC (International Council on Combustion Engines), 2004.
- [6] International Maritime Organization (IMO), «Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13,» International Maritime Organization (IMO), [En línea]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-%28nox%29-%E2%80%93-regulation-13.aspx>.
- [7] Cummins Inc, «Calificaciones marinas y definiciones,» Cummins Inc, [En línea]. Available: <https://www.cummins.com/es/engines/marine-ratings>.
- [8] Propulsion Committee of 23rd ITTC, «ITTC – Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-03.1: Model – Scale Cavitation Test,» ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, 2002.
- [9] HamiltonJet, «Why Waterjets,» HamiltonJet, [En línea]. Available: <https://www.hamiltonjet.com/why-waterjets>.

- [10] H. Verheij, «Comparison of water jets and conventional propeller jets,» Delft University of Technology, Delft (Países Bajos), 2010.
- [11] I. Costa, S. Mitihiro do Nascimento Maêda, L. Frederico Teixeira y C. F. Simões Gomes, «Comparative analysis between waterjet and conventional propulsion: A new possibility for use in Brazilian Navy Ships,» International Conference of Production Research – ICPR 2020, 2020.
- [12] «Waterjet of JS Hayabusa (PG-824) left rear view at JMSDF Maizuru Naval Base,» Wikimedia Commons, 27 Julio 2014. [En línea].
- [13] D. D. v. Zwehl, «Electronic engine management: Key technology for intelligent engine control,» MTU Friedrichshafen GmbH (A Rolls-Royce Power Systems Company), 2014.
- [14] T. Palancar, «Mecánica aplicada,» Buenos Aires, Argentina, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 2025.
- [15] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), «Guía IDAE: Conducción eficiente de vehículos industriales.,» Fundación Transporte y Formación, Madrid, España, 2011.
- [16] ISO (International Organization for Standardization), «ISO 3046-1:2002(E) — Reciprocating internal combustion engines — Performance — Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods — Additional requirements for engines for general use,» ISO (International Organization for Standardization), 2002.
- [17] F. D. M. Aiz, «Motores y Máquinas Agrícolas,» Escuela Superior de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Rural, 2010.
- [18] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (Gobierno de España) – Dirección General de la Marina Mercante, «MARPOL – Edición consolidada 2022,» ubdirección General de Seguridad, Contaminación e Inspección Marítima (Dirección General de la Marina Mercante, MITMA), 2023.
- [19] Dirección General de la Marina Mercante (DGMM), «Código técnico sobre los NOx 2008,» Dirección General de la Marina Mercante (DGMM), 2020.
- [20] Organización Marítima Internacional (OMI), «Óxidos de azufre (SOx) – Regla 14,» Organización Marítima Internacional (OMI), [En línea]. Available: [https://www.imo.org/es/ourwork/environment/pages/sulphur-oxides-\(sox\)-%E2%80%93-regulation-14.aspx](https://www.imo.org/es/ourwork/environment/pages/sulphur-oxides-(sox)-%E2%80%93-regulation-14.aspx).
- [21] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea., «Directiva (UE) 2016/802 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de mayo de 2016, relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos,» Diario Oficial de la Unión Europea, 2016.
- [22] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea., «Reglamento (UE) 2015/757 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2015, relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2,» Diario Oficial de la Unión Europea, 2015.
- [23] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Directiva (UE) 2023/959 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de mayo de 2023, que modifica la Directiva

- 2003/87/CE... y la Decisión (UE) 2015/1814,» Directiva (UE) 2023/959 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de mayo de 2023, 2023.
- [24] Ministerio de Defensa (Gobierno de España), «Orden DEF/427/2021, de 27 de abril, por la que se aprueba el Plan de Prevención y Recuperación de Suelos Contaminados en Instalaciones Militares».
- [25] International Maritime Organization (IMO), «Integrated bridge system (IBS),» International Maritime Organization (IMO), [En línea]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/integratedbridgesystems.aspx>.
- [26] International Maritime Organization (IMO), «Adoption of revised performance standards for shipborne voyage data recorders (VDRs),» Maritime Safety Committee (MSC), International Maritime Organization (IMO), 2012.
- [27] R. Villa Caro, «El VDR: la caja negra de los Buques,» Fundación Exponav en Ferrol (Blog Naval de la Fundación Exponav), 29 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/el-vdr-la-caja-negra-de-los-buques/>.
- [28] U.S. Naval Academy – Department of Naval Architecture & Ocean Engineering (NAOE), «Chapter 7: Resistance and Powering of Ships.,» U.S. Naval Academy – Naval Architecture & Ocean Engineering (NAOE).
- [29] International Maritime Organization (IMO), «IMO Data Collection System (DCS),» International Maritime Organization (IMO).
- [30] G. H. Alejandro, «Análisis comparativo del rendimiento y sostenibilidad en lanchas,» 2025.
- [31] Escuela Naval Militar, «Manual de las Lanchas de Instrucción (A–121) - “Publicación 480 ENM”,» Escuela Naval Militar (ENM).
- [32] Instrumentos Testo, S.A, «Analizador de combustión testo 340 – Set básico para mediciones de emisiones industriales,» Instrumentos Testo, S.A. [En línea].
- [33] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

El análisis comparativo de los sistemas propulsivos instalados en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar tiene implicaciones que van más allá del estudio estrictamente mecánico del motor. La comparación entre consumo, rendimiento y emisiones en condiciones reales de navegación permite valorar no solo el comportamiento técnico de cada planta propulsora, sino también su repercusión sobre la eficiencia operativa, el coste de explotación, el impacto ambiental y la formación práctica del personal que emplea estas embarcaciones. La utilidad de este enfoque aumenta en plataformas sometidas a cambios frecuentes de régimen, donde los datos de catálogo resultan insuficientes y es necesario recurrir a mediciones reales para interpretar con precisión el funcionamiento del motor.

Desde el punto de vista ambiental, el estudio de motores diésel marinos resulta especialmente relevante por su relación directa con las emisiones atmosféricas asociadas a la navegación. En el transporte marítimo existe una presión regulatoria creciente para reducir el impacto de estas emisiones, y esa tendencia afecta también a las embarcaciones que operan en entornos costeros o cercanos a zonas especialmente sensibles. En el ámbito internacional, la Organización Marítima Internacional establece un límite global de azufre del 0,50 % m/m en el fuelóleo usado por los buques fuera de las zonas ECA, mientras que dentro de estas zonas el límite es del 0,10 % m/m. Además, el Mediterráneo pasó a ser zona Med SOx ECA el 1 de mayo de 2025, lo que endurece aún más el marco ambiental aplicable a los buques que navegan en este entorno.

La dimensión ambiental del análisis se refuerza al considerar que las mediciones se realizan en condiciones reales de servicio y no únicamente a partir de valores nominales del fabricante. La adquisición de datos de emisiones en el conducto de escape mediante analizador Testo 340 y la comparación ordenada de variables como NOx, NO, CO, O₂ y CO₂ en distintos regímenes de giro permiten identificar cómo cambia la combustión con el punto de funcionamiento del motor. En los datos comparativos disponibles para los motores Caterpillar C18 y MTU 10V2000M84 se aprecia que las emisiones no permanecen constantes entre 600 y 1600 rpm, sino que evolucionan con el régimen, lo que confirma que la selección del modo de operación influye directamente en la huella ambiental de la embarcación.

En el plano económico, la relevancia del estudio es clara porque el combustible constituye una parte esencial del coste de operación de una embarcación. Comparar motores en navegación real permite relacionar régimen de giro, velocidad y consumo con criterios útiles para decidir qué puntos de funcionamiento resultan más convenientes desde la perspectiva de la eficiencia. Esta cuestión adquiere todavía más importancia en el contexto normativo europeo actual, ya que la Directiva (UE) 2023/959 amplía el régimen europeo de comercio de derechos de emisión al transporte marítimo y el Reglamento (UE) 2023/1805 (FuelEU Maritime) impulsa el uso de combustibles renovables y de baja intensidad de carbono en el sector. En consecuencia, mejorar la eficiencia propulsiva ya no supone solo una ventaja técnica, sino también una variable económica cada vez más relevante.

Las implicaciones económicas también se extienden al mantenimiento y a la disponibilidad del equipo. La documentación técnica de MTU indica que su concepto de mantenimiento se basa en un enfoque preventivo, orientado a facilitar la planificación y a asegurar una alta disponibilidad del motor. En esa misma línea, las soluciones de monitorización de la marca destacan que el análisis continuo de datos operativos permite reducir paradas no planificadas, optimizar el coste del ciclo de vida y ajustar la operación para reducir emisiones y consumo. Por tanto, la obtención de datos de diagnosis y de funcionamiento no solo mejora el conocimiento técnico del motor, sino que también puede traducirse en

una explotación más racional y en menores costes indirectos asociados a averías, indisponibilidad o mantenimiento correctivo.

En el ámbito industrial y tecnológico, este tipo de análisis pone de relieve el valor de la digitalización del sistema propulsivo. En el motor MTU 10V2000M84, una parte relevante de la información se obtiene mediante conexión de diagnóstico con MTU DiaSys, lo que permite registrar parámetros internos del motor y ampliar el estudio más allá de la simple lectura de indicadores visibles. Además, la descripción funcional del sistema muestra que la unidad de control electrónica y la unidad de monitorización registran estados de operación, supervisan valores límite y pueden iniciar reducción de potencia, parada del motor o parada de emergencia cuando se detectan condiciones inadmisibles. También se especifica que el Engine Interface Module integra las señales del motor y ofrece comunicación abierta CAN SAE J1939 hacia la planta. Todo ello demuestra que el motor marino moderno debe entenderse no solo como un conjunto mecánico, sino como un sistema supervisado electrónicamente, donde la disponibilidad de datos tiene consecuencias directas sobre la operación, el mantenimiento y la seguridad.

Las implicaciones sociales del estudio son especialmente relevantes por el contexto de uso de estas embarcaciones. Las lanchas de instrucción no son únicamente una plataforma de transporte, sino un medio docente destinado a habituar al alumno al entorno naval, familiarizarlo con la organización del buque, con sus equipos y con la vida a bordo, y reforzar en condiciones reales los conocimientos adquiridos en el aula. En este marco, una mejor comprensión del comportamiento del motor y de sus emisiones contribuye a formar a futuros oficiales con una visión más completa del uso eficiente de los recursos, del impacto ambiental de la operación y de la importancia de la toma de decisiones técnicas basadas en datos. Se trata, por tanto, de una aportación formativa que trasciende la comparación puntual de dos motores y se integra en una cultura de operación más consciente y responsable.

A ello se añade que el perfil operativo de estas embarcaciones es relativamente repetitivo y está reglado, con velocidades de referencia de 600 rpm y 6 nudos como velocidad normal, 1100 rpm y 10 nudos como velocidad de evolución, y 1500 rpm y 14 nudos como velocidad máxima en las salidas habituales. Esta regularidad convierte a las lanchas de instrucción en una plataforma particularmente adecuada para comparar motores bajo condiciones equivalentes y, al mismo tiempo, permite que cualquier mejora identificada en consumo, emisiones o explotación tenga aplicación práctica inmediata en un entorno docente real.

Por último, existe una implicación directa en materia de seguridad operacional. La operación y el mantenimiento de motores diésel marinos y de sus sistemas de combustible exigen controlar riesgos asociados a incendio, explosión, fallo de componentes o funcionamiento fuera de límites admisibles. La documentación de MTU advierte expresamente de que los combustibles son combustibles y presentan riesgo de incendio y explosión, mientras que la arquitectura de control del motor contempla la supervisión continua de parámetros y la activación de respuestas automáticas ante estados inadmisibles. En consecuencia, cualquier trabajo orientado a conocer con mayor precisión el comportamiento del motor, sus variables críticas y sus márgenes de funcionamiento también aporta valor desde el punto de vista preventivo y de la seguridad de la operación.

En conjunto, el análisis de los motores de propulsión de las lanchas de instrucción presenta una clara dimensión ambiental, económica, social, tecnológica y de seguridad. Su interés no se limita a determinar diferencias de comportamiento entre dos motores, sino que aporta criterios útiles para la operación eficiente de las embarcaciones, la reducción del impacto ambiental, la mejora del mantenimiento y la formación de personal con mayor sensibilidad hacia la sostenibilidad y la explotación responsable de los medios navales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En un trabajo experimental como el presente, la primera cuestión ética relevante es el tratamiento riguroso de los datos. La comparación entre los motores de las lanchas de instrucción solo resulta válida si se apoya en registros obtenidos de forma sistemática, en condiciones de operación comparables y con una metodología que tenga en cuenta las limitaciones propias de la navegación real. En este caso, el estudio se plantea a partir de datos recogidos durante salidas reales, relacionando régimen de giro, velocidad, consumo y emisiones, y reconociendo además que factores como el estado de la mar, el viento, la corriente o las limitaciones de la instrumentación pueden influir en los resultados. Desde el punto de vista ético, esto obliga a evitar conclusiones simplificadas o absolutas y a presentar los resultados dentro de su contexto experimental real.

Una segunda dimensión ética se encuentra en la seguridad durante la obtención de datos y durante la propia operación del sistema propulsivo. El motor y sus equipos auxiliares no pueden considerarse únicamente como una fuente de datos, sino como un conjunto mecánico y térmico que trabaja en un entorno con riesgos reales. El uso incorrecto del equipo, la intervención por personal no cualificado o el incumplimiento de las instrucciones de seguridad pueden dar lugar a daños materiales o lesiones. Asimismo, es necesario que los trabajos se realicen por personal formado, que se utilicen herramientas aprobadas y que se garantice una ventilación adecuada del espacio de operación. A ello se suma que el propio sistema incorpora monitorización del estado de funcionamiento, vigilancia de valores límite y funciones de reducción de potencia, parada del motor o parada de emergencia ante condiciones inadmisibles. Por tanto, desde una perspectiva ética, la toma de datos nunca puede situarse por encima de la seguridad del personal, de la embarcación o del propio equipo.

También existe una reflexión ética ligada al mantenimiento y a la responsabilidad profesional. La operación correcta de un motor marino no depende solo de su diseño, sino del cumplimiento estricto de procedimientos, del empleo de repuestos y fluidos adecuados y de la intervención de personal competente. El funcionamiento dentro de los parámetros permitidos, el uso de componentes aprobados y la realización de las tareas por personal entrenado son condiciones necesarias para garantizar una explotación segura y técnicamente correcta. Del mismo modo, las tareas de mantenimiento deben estar claramente definidas e incluir medidas de seguridad, cualificación del personal y trazabilidad. Esto refuerza una idea central en ingeniería: no basta con que una solución técnica funcione, sino que debe ser operada y mantenida de forma responsable, verificable y conforme a procedimiento. En este sentido, cualquier comparación entre motores solo tiene valor si se apoya en un uso correcto de ambos sistemas y en unas condiciones de explotación técnicamente aceptables.

La dimensión social del trabajo viene dada por el papel que desempeñan las lanchas de instrucción dentro de la Escuela Naval Militar. Estas embarcaciones están concebidas como un medio de formación práctica, orientado a habituar al alumno al medio naval, familiarizarlo con la organización del buque, con sus equipos y con la vida a bordo, y permitirle participar activamente en el desarrollo de prácticas reales. Además, el adiestramiento se estructura mediante salidas semanales, maniobras regladas y perfiles de uso donde la velocidad y el régimen del motor se ajustan al tipo de ejercicio, lo que convierte a estas lanchas en una plataforma de enseñanza y no solo de transporte. Por ello, el estudio de sus motores tiene una dimensión social clara, ya que contribuye a que la formación técnica del alumno se apoye en criterios de eficiencia, seguridad, interpretación de datos y conocimiento real del comportamiento del sistema propulsivo.

Por otra parte, el trabajo también sugiere una reflexión ética sobre el uso de la monitorización y de las herramientas de diagnóstico. En el caso del motor MTU, parte de la información empleada procede de los sistemas de control y del software de diagnóstico, mientras que en el Caterpillar se recurre a registros de máquinas, lecturas de la instalación y mediciones de emisiones. Esta disponibilidad de datos permite mejorar la trazabilidad del funcionamiento del motor y fundamentar mejor las decisiones técnicas, pero

también exige interpretar la información con prudencia y no confundir una mayor cantidad de datos con una certeza absoluta. En ingeniería, disponer de más señales y más monitorización no elimina la necesidad de juicio técnico; al contrario, la hace más necesaria.

De forma global, la principal reflexión ética y social asociada a este trabajo es que el análisis técnico de un sistema propulsivo no puede separarse de la responsabilidad con la que se obtienen, interpretan y aplican los resultados. Comparar motores en una plataforma de instrucción implica trabajar con criterios de rigor experimental, respetar las condiciones de seguridad, valorar la importancia del mantenimiento correcto y reconocer que los resultados pueden contribuir tanto a la mejora de la explotación de la embarcación como a la formación de futuros oficiales. Desde esa perspectiva, el valor del trabajo no reside únicamente en la comparación de prestaciones, sino también en la aportación de una base técnica objetiva para operar y enseñar con mayor conocimiento y responsabilidad.

ANEXO III: CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE EMPLEADO

En este anexo se recogen los principales datos técnicos del combustible empleado en el motor analizado, utilizados como referencia para la interpretación de su funcionamiento y de los valores de consumo obtenidos.

Propiedad	Unidades	Norma	Resultados iniciales	Resultados tras 2 meses
			Gasóleo B	Gasóleo B
Aspecto		ASTM D4176	ByT	ByT
Densidad a 15°C	kg/m ³	ISO 3675	834.2	832.9
Poder calorífico superior	MJ/kg	ASTM D240	45.6	44.8
Poder calorífico inferior	MJ/kg		42.6	41.8
Poder calorífico inferior	MJ/L		35.5	34.8
Índice de cetano	-	ASTM D4737	49	49.6
POFF	°C	EN 116	-19	-18
Punto de inflamación	°C	ASTM D93	60.5	60.5
Estabilidad		ASTM D2274		
Residuos adherentes	g/m ³		2.9	1
Residuos filtrables	g/m ³		1.4	1
Residuos totales	g/m ³		4.3	2
Curva de destilación		ASTM D86		
IBP	°C		161.5	162
T5	°C		184.7	184.8
T10	°C		192.4	190.8
T20	°C		207.2	205.6
T30	°C		222.2	221
T40	°C		238	237.8
T50	°C		253.9	254.9
T60	°C		270.4	271.9
T70	°C		287.8	289.5
T80	°C		307.5	309.6
T90	°C		335.4	338.2
T95	°C		355.9	359.7
FBP	°C		365.2	363.6
C elemental	%m/m		86.26	86.26
H elemental	%m/m		13.74	13.74
N elemental	%m/m		0	0
O elemental	%m/m		0	0
C			14.2971	14.2971
H			27.1368	27.1368
O			0.0000	0.0000
Relación H/C			1.9	1.9
Relación O/C			0.0	0.0

ANEXO IV: USO RESPONSABLE DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se han utilizado herramientas de inteligencia artificial únicamente como apoyo complementario en tareas de redacción, revisión lingüística y organización del contenido. En ningún caso su uso ha sustituido el análisis, la interpretación técnica, la selección de fuentes ni la elaboración personal del trabajo.

Toda aportación obtenida mediante estas herramientas ha sido revisada críticamente, contrastada con fuentes fiables y adaptada por el autor en función de los criterios académicos y técnicos exigibles. Por ello, la responsabilidad final sobre el contenido, la veracidad de la información y las conclusiones presentadas recae exclusivamente en el autor del TFG.

El uso de estas herramientas se ha realizado conforme a principios de transparencia, supervisión humana e integridad académica, considerándolas un recurso de apoyo y no un sustituto del trabajo intelectual propio.