



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR NAVAL

Autor: Pablo Beltrán Genovés
Director: Juan De Norverto Morínigo

Madrid
Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
La mejora de la sostenibilidad en el sector naval
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha
sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Pablo Beltrán Genovés

Fecha: 18/07/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan De Norverto Morínigo Fecha://

DE NORVERTO
MORIÑIGO JUAN -
09746499L

Firmado digitalmente por DE
NORVERTO MORIÑIGO JUAN -
09746499L
Fecha: 2025.07.19 09:26:23 +02'00'



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL
SECTOR NAVAL

Autor: Pablo Beltrán Genovés

Director: Juan De Norverto Morínigo

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento al profesor Juan De Norverto Moriño por su disponibilidad y supervisión durante la realización de este trabajo, así como por su orientación a lo largo del proceso.

También quiero dar las gracias a mis compañeros, por el apoyo, las ideas compartidas y los momentos de colaboración que han hecho más llevadero este camino.

“Si quieres llegar rápido, ve solo. Si quieres llegar lejos, ve acompañado” - Nelson Mandela

Por último, y de forma muy especial, agradezco a mi familia, cuyo respaldo constante y ánimo incondicional han sido fundamentales para que pudiera completar esta etapa.

LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR NAVAL

Autor: Beltrán Genovés, Pablo.

Director: De Norverto Morínigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Grado analiza distintas vías para reducir el impacto ambiental del transporte marítimo y garantizar el cumplimiento de la normativa vigente. Se estudian soluciones basadas en el uso de combustibles alternativos y en mejoras del diseño hidrodinámico de los buques. Para evaluar su viabilidad, se desarrolla un caso práctico con un portacontenedores representativo, cuantificando el efecto de cada tecnología sobre el consumo y las emisiones.

Palabras clave: Transporte marítimo, sostenibilidad, combustibles alternativos, hidrodinámica, emisiones, regulación MARPOL, descarbonización naval.

1. Introducción

El transporte marítimo internacional es responsable de más del 80 % del comercio mundial en volumen, pero también representa cerca del 3 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) [1], además de óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y partículas en suspensión (PM). Con la creciente presión regulatoria, encabezado por la Organización Marítima Internacional, el sector naval se enfrenta a la necesidad de transformarse para reducir su impacto ambiental.

Este Trabajo Fin de Grado analiza las soluciones potenciales aplicables al transporte marítimo, que se clasifican en dos grandes bloques: el uso de nuevos combustibles alternativos (hidrógeno, amoníaco, metanol) y la implementación de mejoras en el diseño hidrodinámico del casco. A través de un enfoque cuantitativo y comparativo sobre un buque portacontenedores de referencia, se evalúan diferentes soluciones, estudiando la eficiencia en la reducción de emisiones y el coste de implementación.

2. Definición del Proyecto

Con el fin de realizar un estudio riguroso y estructurado sobre las posibles soluciones tecnológicas, el proyecto se organiza en tres bloques principales y un caso práctico:

- Estudiar el marco regulatorio internacional que impulsa la descarbonización del transporte marítimo.
- Analizar el potencial de los principales combustibles alternativos en términos de disponibilidad, emisiones y compatibilidad técnica.
- Evaluar las innovaciones hidrodinámicas aplicables al diseño de buques para reducir la resistencia al avance y mejorar la eficiencia energética.

Para cuantificar el impacto de las tecnologías seleccionadas, se desarrolla un caso práctico basado en un buque portacontenedores, de 294 metros de eslora y 5.000 TEU de capacidad, realizando un análisis técnico, ambiental y económico de cada una. Se parte de un escenario base, con un buque convencional alimentado por un combustible fósil, sobre el cual se

implementan mejoras como el uso de metanol, la incorporación de bulbos de proa optimizados, sistemas de lubricación por aire y rotores Flettner.

3. Descripción del modelo y herramientas empleadas

El modelo desarrollado se basa en un portacontenedores de 5.000 TEU, con una eslora de 294 m y un peso muerto de 70.000 toneladas. Partiendo de un caso base, con una resistencia al avance, potencia propulsiva y emisiones estándar, se simulan escenarios con diferentes combustibles y mejoras tecnológicas, ajustando los parámetros que sean convenientes en cada caso, como el coeficiente de fricción, la resistencia residual o el consumo específico de combustible.

Las herramientas empleadas incluyen fórmulas empíricas, datos de fabricantes, estudios CFD y bases de datos meteorológicas para evaluar tecnologías como los rotores Flettner en rutas reales.

4. Resultados

Tras estudiar el efecto de todas las mejoras en un buque portacontenedores de referencia, se han obtenido los siguientes resultados:

4.1. Metanol como combustible alternativo

El uso de metanol como combustible ha evidenciado el potencial de esta alternativa como solución al transporte marítimo sostenible. Además, su menor complejidad en almacenamiento y adaptación de motores existentes lo convierte en el combustible alternativo más viable a corto plazo.

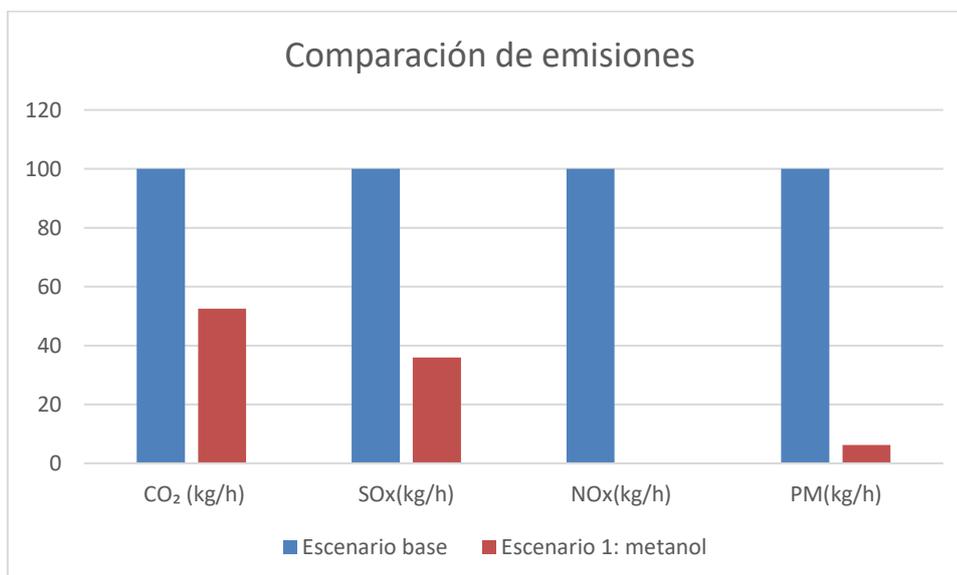


Figura 1 - Comparación de emisiones porcentual, HFO vs Metanol

Sin embargo, su implementación enfrenta importantes barreras económicas: el alto coste de conversión de los buques (alrededor de 16,5 millones de euros) y el precio actualmente superior del metanol frente al fuelóleo pesado (HFO), dificultan su rentabilidad y, por tanto, su viabilidad.

Se plantea, por tanto, estudiar el Gas Natural Licuado (GNL) como solución inmediata a la reducción parcial de emisiones contaminantes, hasta que los combustibles alternativos maduren para ser aplicados a gran escala.

4.2. Mejoras hidrodinámicas

La aplicación de diferentes tecnologías de mejoras hidrodinámicas ha supuesto las siguientes reducciones de resistencia:

- La instalación de un bulbo de proa optimizado permite una reducción del 39,2 % en la resistencia residual y del 23,3 % en la resistencia total.
- El sistema de lubricación por aire y placas reductoras (ALDR) reduce en un 32,4 % la resistencia friccional.
- La combinación de ambas mejoras proporciona la mejor eficiencia global, con una reducción total del 36,5 %, lo que se traduce en un menor requerimiento de potencia propulsiva.

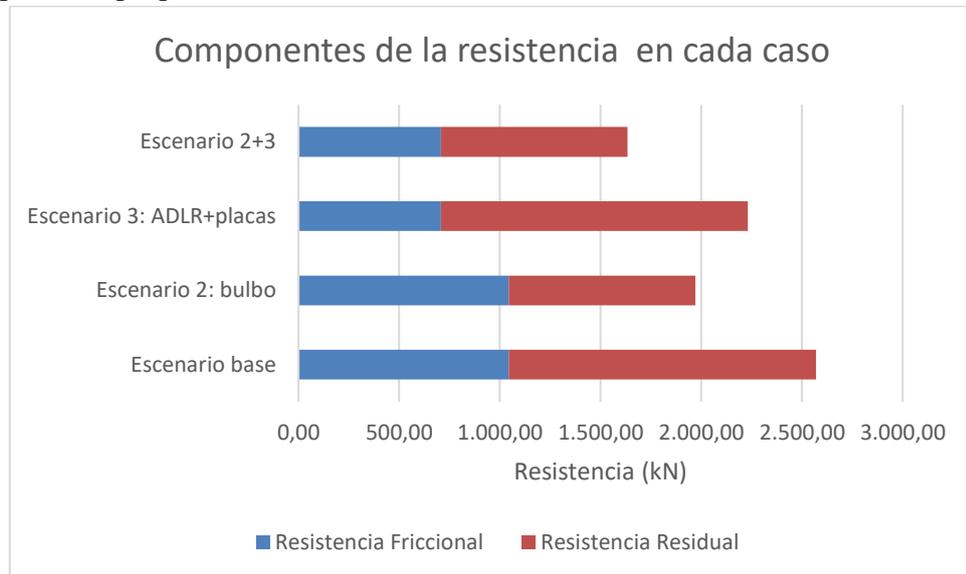


Figura 2 – Comparación de las componentes de la resistencia según los escenarios planteados

El rediseño del bulbo de proa destaca como la opción más efectiva, permitiendo cumplir el límite EEDI actual por sí sola y siendo, además, la opción más rentable, con un retorno de inversión (ROI) muy favorable de 0,55 años, lo que implica recuperar la inversión en poco más de medio año de operación.

En comparación, los sistemas de lubricación por aire no son tan efectivos individualmente, y placas reductoras requieren una inversión más elevada y presentan un ROI de 1,23 años, debido a su mayor complejidad y costos de instalación.

La combinación de ambas tecnologías ofrece un equilibrio entre eficiencia y coste, con un ROI intermedio de 0,95 años, lo que la convierte en una solución económicamente viable y técnicamente eficaz, superando de sobra el límite de EEDI.

A continuación se presentan los diferentes índices obtenidos, siendo la línea rosa el EEDI requerido actualmente:

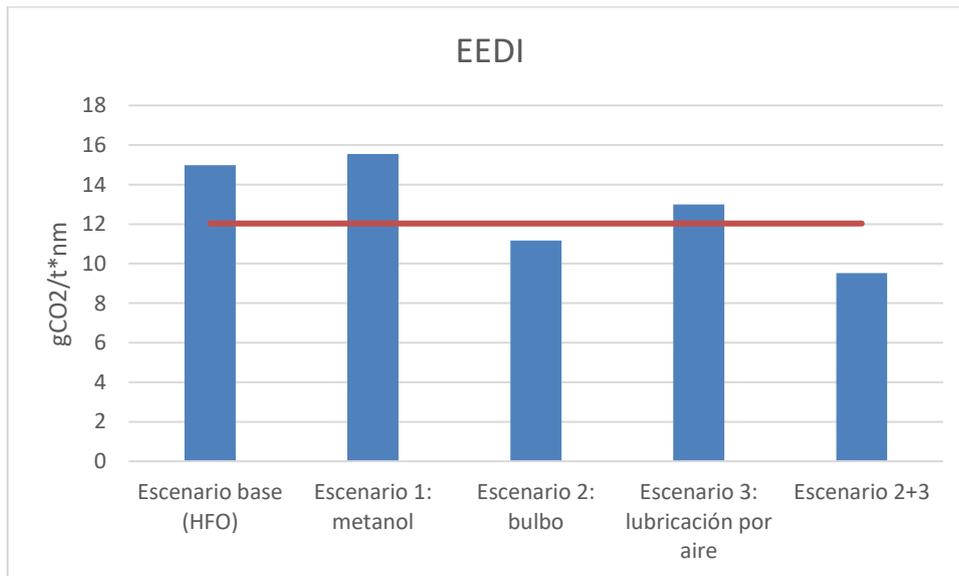


Figura 3 - Índice EEDI obtenido en cada escenario vs EEDI requerido

Este índice valora las emisiones directas de CO₂ producidas en comparación con la masa y la distancia realizada. En el caso del metanol, su EEDI es mayor debido a su menor poder calorífico: aunque emite algo más de la mitad de CO₂ por kilogramo de combustible, se requiere aproximadamente el doble de combustible para producir la misma energía útil, lo que resulta en un consumo y emisiones totales de CO₂ superiores por unidad de carga transportada.

Esta es una posible limitación del EEDI, ya que no considera otras emisiones contaminantes ni el ciclo completo well-to-wake, que incluye la producción y suministro del combustible, aspectos fundamentales para evaluar el verdadero impacto ambiental del metanol.

4.3. Rotor Sails

Los cálculos muestran que los rotores generan una fuerza de empuje promedio total entre 160 kN y 187 kN según la ruta, y una fuerza de escora que no incrementa significativamente la resistencia del buque. La potencia eléctrica requerida para operar los rotores es inferior al 1,5 % de la potencia ahorrada en el eje del motor, confirmando la alta eficiencia energética del sistema.

En las rutas estudiadas (Ciudad del Cabo–Buenos Aires, Rotterdam–Nueva York y Shanghái–Los Ángeles), la reducción neta de potencia requerida en el eje oscila entre 2,53 MW y 2,98 MW, equivalente a una disminución del 6–7,3 % en la potencia total necesaria para la propulsión.

Los datos meteorológicos utilizados se obtuvieron del portal Copernicus Maritime Service [1], que ofrece observaciones horarias de alta resolución. Para asegurar la validez y representatividad del estudio, se analizaron dos días con condiciones diferentes, calculando la media de viento y densidad del aire en cada punto de la ruta. Esto permitió optimizar la velocidad de giro de los rotores para maximizar el rendimiento durante la mayor parte del trayecto.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 1 - Resultados de las fuerzas y potencias medias en cada ruta

Ruta	F_e (kN)	Fh (kN)	P_{eje} (MW)	Prot (kW)
CC-BA	185,61	124,1	37,86 (-7,23%)	42,8
Rot-NY	186,78	94,32	37,84 (-7,28%)	34,57
Sh-LA	160,92	74,76	38,26 (-6,28%)	26,81

Tras el análisis general de las tres rutas principales, el estudio se centra en la ruta Rotterdam–Nueva York, por ser una de las más representativas en tráfico portuario y con condiciones meteorológicas variables pero favorables para la propulsión asistida por viento.

A continuación, se presentan los mapas detallados de la ruta, junto con los gráficos que muestran la variación a lo largo del recorrido de la fuerza de empuje generada por los rotores. Estos datos reflejan claramente la dependencia directa de la eficiencia del sistema con la intensidad y dirección del viento aparente.

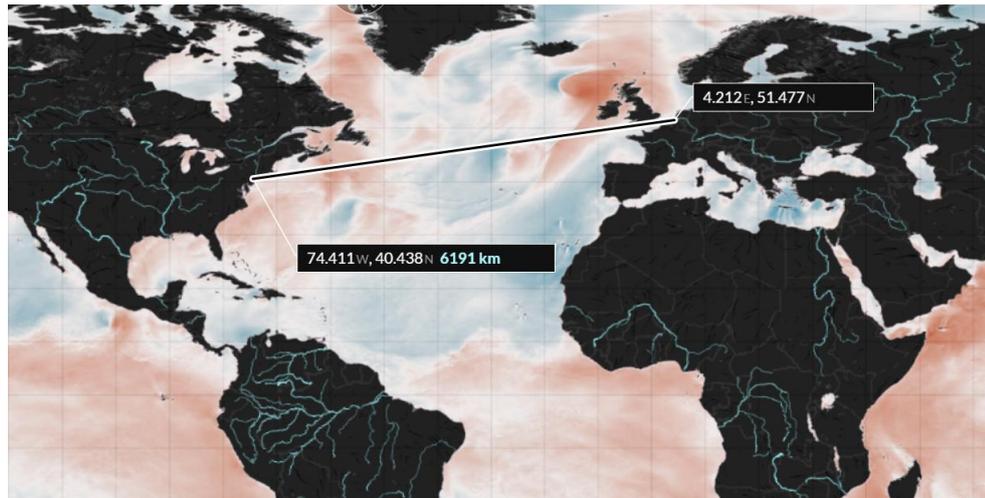


Figura 4 - Mapa de la ruta de RTM-NYC

A lo largo de los 6.200km, la fuerza de empuje media es de 62 kN de media, variando a lo largo de la ruta de la siguiente:

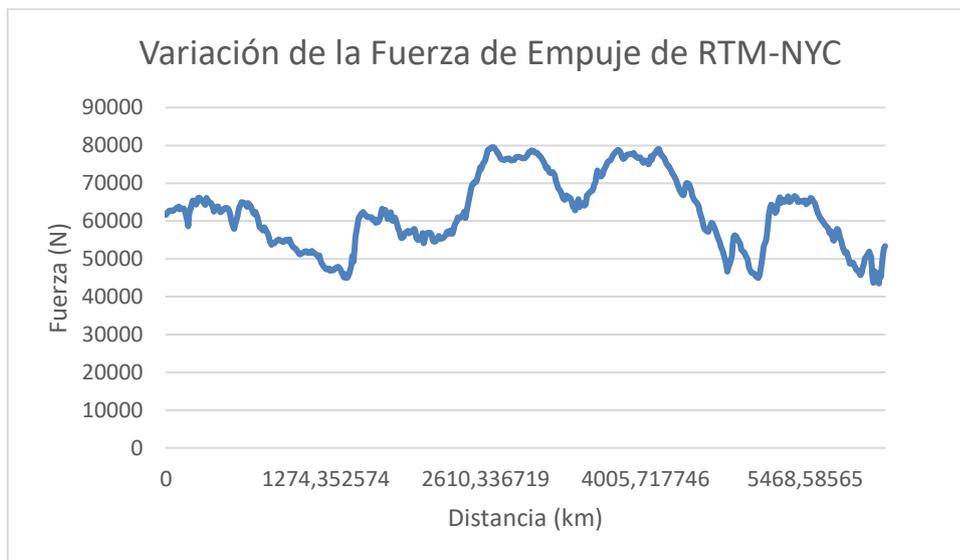


Figura 5 - Variación de la Fuerza de Empuje de RTM-NYC

Esta tecnología de asistencia eólica puede ser clave para reducir las emisiones del transporte marítimo. Sin embargo, su implementación debe evaluarse cuidadosamente en función de las condiciones meteorológicas predominantes en las rutas donde se planea operar, ya que su eficacia depende en gran medida de la disponibilidad y dirección del viento. Tiene un coste de instalación elevado, cercano a los 2 millones de euros, con un ROI de 2,72.

5. Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones en el transporte marítimo requiere un enfoque que combine avances en diseño

hidrodinámico y el uso de combustibles alternativos. Además, en ciertas rutas, la adopción de tecnologías de propulsión complementarias puede resultar muy eficiente.

Entre las soluciones hidrodinámicas evaluadas, el rediseño del bulbo de proa se posiciona como la mejora más efectiva y económicamente viable, con una reducción significativa en la resistencia total y un retorno de inversión rápido. Los sistemas de lubricación por aire y placas reductoras aportan mejoras adicionales, especialmente cuando se combinan con el bulbo optimizado, aunque con un mayor coste y complejidad de instalación.

En cuanto a los combustibles, el metanol destaca por sus claras ventajas ambientales al reducir drásticamente emisiones de NO_x, SO_x y partículas. No obstante, su menor poder calorífico implica un mayor consumo y un EEDI superior, lo que significa que la emisión directa de CO₂ es la incluso superior en el metanol combustibles. Esto refleja las limitaciones del EEDI, que no considera el impacto ambiental completo ni el ciclo de vida del combustible.

Además, las barreras económicas actuales, derivadas del alto coste de conversión y del precio del combustible, dificultan su adopción masiva a corto plazo. Es clave estudiar otras opciones, como el Gas Natural Licuado (GNL), que podría servir como solución intermedia mientras los combustibles alternativos se desarrollan.

Por último, tecnologías como los Rotor Sails han demostrado ser sistemas energéticamente eficientes que pueden reducir el consumo de potencia del motor principal en un 6–7 %, con un coste operativo y energético reducido. Debido al alto costo, en comparación a otras tecnologías estudiadas, previamente debe evaluarse al caso específico de la ruta operativa, ya que la eficiencia de esta depende en gran medida de la intensidad, dirección y estabilidad del viento. También es recomendable estudiar una optimización de la planificación de las rutas para sacar el máximo provecho las velas

En conjunto, la combinación de mejoras hidrodinámicas, uso de combustibles más limpios y tecnologías auxiliares constituye el camino más prometedor para cumplir con las estrictas regulaciones ambientales vigentes y futuras, facilitando una transición gradual hacia un transporte marítimo más sostenible y competitivo.

6. Referencias

- [1] J. Collins, « Transporte marítimo, un gran lastre para el cambio climático.,» DW (Deutsche Welle), 11 09 2022. [En línea]. Available: <https://www.dw.com/es/transporte-mar%C3%ADtimo-un-lastre-para-el-medioambiente/a-63703002>. [Último acceso: 12 03 2025].

[2] C. M. Service, «Copernicus Marine Service,» Copernicus Marine Service, 2024. [En línea]. Available: <https://marine.copernicus.eu/>. [Último acceso: 18 05 2025].

IMPROVING SUSTAINABILITY IN THE MARITIME SECTOR

Author: Beltrán Genovés, Pablo.

Supervisor: De Norverto Moríñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Final Degree Project explores different strategies to reduce the environmental impact of maritime transport and ensure compliance with current regulations. The study evaluates solutions based on the use of alternative fuels and improvements in the hydrodynamic design of vessels. To assess their feasibility, a practical case is developed using a representative container ship, quantifying the effect of each technology on fuel consumption and emissions.

Keywords: Maritime transport, sustainability, alternative fuels, hydrodynamics, emissions, MARPOL regulation, maritime decarbonization.

1. Introduction

International maritime transport accounts for over 80% of global trade by volume but also contributes nearly 3% of global greenhouse gas (GHG) emissions [1], as well as nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), and particulate matter (PM). With increasing regulatory pressure, led by the International Maritime Organization (IMO), the maritime sector faces the urgent need to transform to reduce its environmental footprint.

This Final Degree Project analyzes potential solutions applicable to maritime transport, grouped into two main categories: the use of new alternative fuels (hydrogen, ammonia, methanol) and the implementation of hydrodynamic improvements to hull design. Through a quantitative and comparative approach applied to a reference container ship, various solutions are evaluated in terms of emission reduction efficiency and implementation cost.

2. Project definitions

To conduct a rigorous and structured study of the possible technological solutions, the project is organized into three main blocks and a practical case:

1. Study the international regulatory framework driving the decarbonization of maritime transport.
2. Analyze the potential of the main alternative fuels in terms of availability, emissions, and technical compatibility.
3. Evaluate hydrodynamic innovations applicable to ship design to reduce drag and improve energy efficiency.

To quantify the impact of the selected technologies, a practical case is developed based on a container ship measuring 294 meters in length and with a capacity of 5,000 TEU. A technical, environmental, and economic analysis is conducted for each solution. Starting

from a baseline scenario with a conventional ship powered by fossil fuel, improvements are implemented such as the use of methanol, optimized bow bulbs, air lubrication systems, and Flettner rotors.

3. Model/system/tools description

The developed model is based on a 5,000 TEU container ship, with a length of 294 meters and a deadweight of 70,000 tons. Starting from a baseline scenario with standard drag, propulsion power, and emissions, simulations are performed with different fuels and technological improvements, adjusting relevant parameters in each case, such as friction coefficient, residual resistance, or specific fuel consumption.

The tools used include empirical formulas, manufacturer data, CFD studies, and meteorological databases to evaluate technologies such as Flettner rotors on real routes.

4. Resultados

After analyzing the effect of all improvements on the reference container ship, the following results were obtained:

4.1 Methanol as an Alternative Fuel

The use of methanol has demonstrated its potential as a sustainable solution for maritime transport. Its lower complexity in storage and compatibility with existing engines makes it the most viable alternative fuel in the short term.

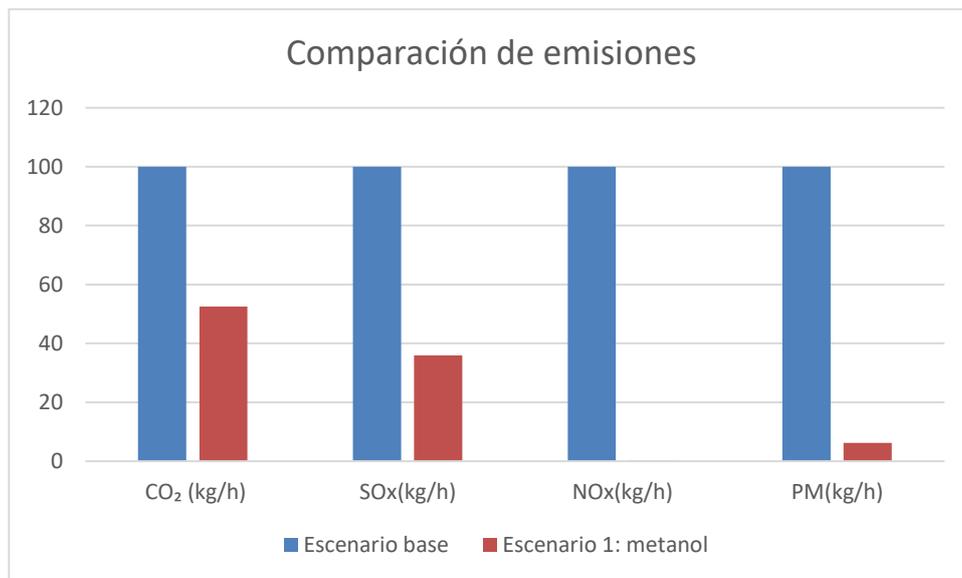


Figure 1 - Percentage Emissions Comparison: HFO vs. Methanol

However, its implementation faces significant economic barriers: the high cost of ship conversion (around €16.5 million) and the current higher price of methanol compared to heavy fuel oil (HFO) hinders its profitability and short-term viability.

Therefore, the use of Liquefied Natural Gas (LNG) is proposed as an immediate solution for partial emission reduction until alternative fuels mature for large-scale application.

4.2 Hydrodynamic Improvements

The application of different hydrodynamic technologies resulted in the following drag reductions:

- Installation of an optimized bow bulb reduces residual resistance by 39.2% and total resistance by 23.3%.
- Air lubrication and drag-reducing plates (ALDR) reduce frictional resistance by 32.4%.
- Combining both technologies yields the best overall efficiency, with a total reduction of 36.5%, translating into lower propulsion power requirements.

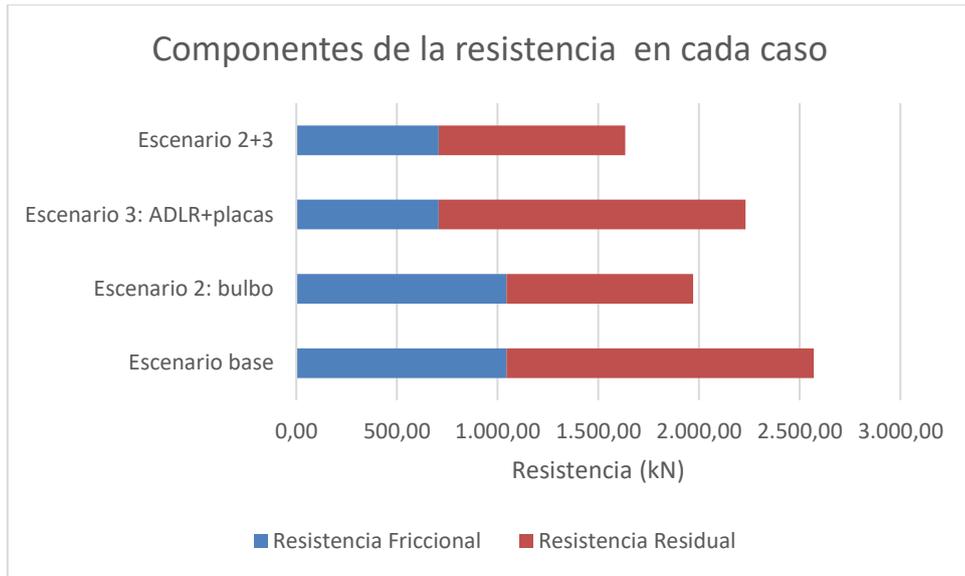


Figure 2 - Comparison of Resistance Components Across the Proposed Scenarios

The redesigned bow bulb stands out as the most effective option, meeting the current EEDI limit on its own and being the most cost-effective, with a return on investment (ROI) of 0.55 years.

In comparison, air lubrication systems are less effective individually, and drag-reducing plates require higher investment and have an ROI of 1.23 years.

The combination of both technologies offers a balance between efficiency and cost, with an intermediate ROI of 0.95 years, making it a viable and technically effective solution.

When it comes to the EEDI index, the following graph presents the different values obtained for the vessel under various configurations. The pink line represents the current required EEDI as per IMO regulations. Any point below this line indicates compliance, while points above suggest non-compliance or the need for further optimization:

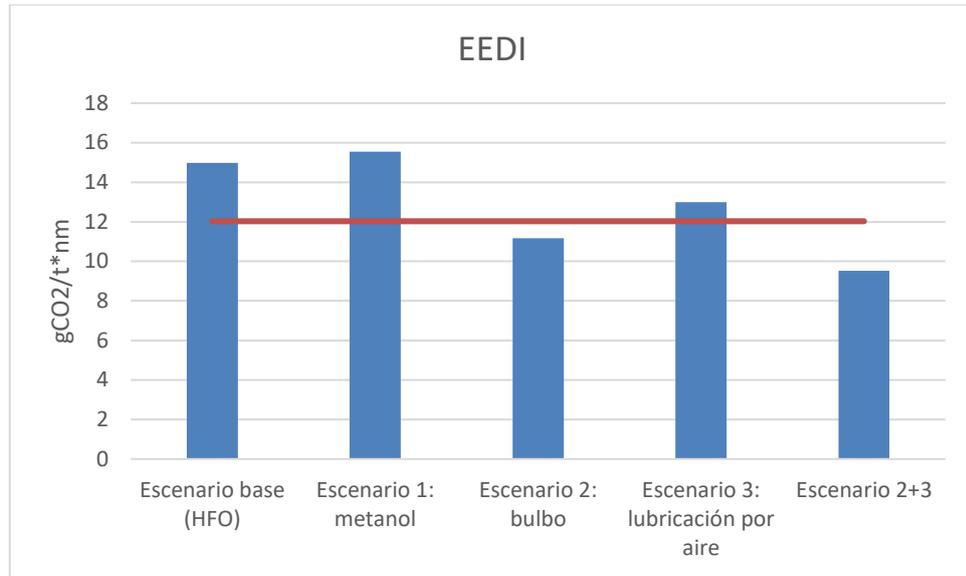


Figure 3 - EEDI Index Obtained in Each Scenario vs. Required EEDI

The EEDI evaluates direct CO₂ emissions relative to mass and distance traveled. In the case of methanol, its EEDI is higher due to its lower calorific value: although it emits about half the CO₂ per kilogram of fuel, nearly double the fuel is required to produce the same useful energy, resulting in higher total CO₂ emissions per unit of cargo transported.

This highlights a limitation of the EEDI, as it does not consider other pollutants or the full well-to-wake cycle, which includes fuel production and supply—key aspects for assessing methanol’s true environmental impact.

4.3 Rotor Sails

Calculations show that the rotors generate an average thrust force between 160 kN and 187 kN depending on the route, and a heel force that does not significantly increase ship resistance. The electrical power required to operate the rotors is less than 1.5% of the shaft power saved, confirming the system’s high energy efficiency.

On the studied routes (Cape Town–Buenos Aires, Rotterdam–New York, and Shanghai–Los Angeles), the net shaft power reduction ranges from 2.53 MW to 2.98 MW, equivalent to a 6–7.3% decrease in total propulsion power.

Meteorological data were obtained from the Copernicus Maritime Service [2], providing high-resolution hourly observations. Two days with different conditions were analyzed, calculating average wind and air density at each route point. This allowed rotor speed optimization to maximize performance throughout the journey.

Ruta	F_e (kN)	Fh (kN)	P_{eje} (MW)	Prot (kW)

CC-BA	185,61	124,1	37,86 (-7,23%)	42,8
Rot-NY	186,78	94,32	37,84 (-7,28%)	34,57
Sh-LA	160,92	74,76	38,26 (-6,28%)	26,81

Table 1 - Average Forces and Power Results Across Each Route

The study focuses on the Rotterdam–New York route, due to its high port traffic and favorable wind conditions for wind-assisted propulsion. Detailed maps and thrust variation graphs show the system’s efficiency depends directly on wind intensity and direction.

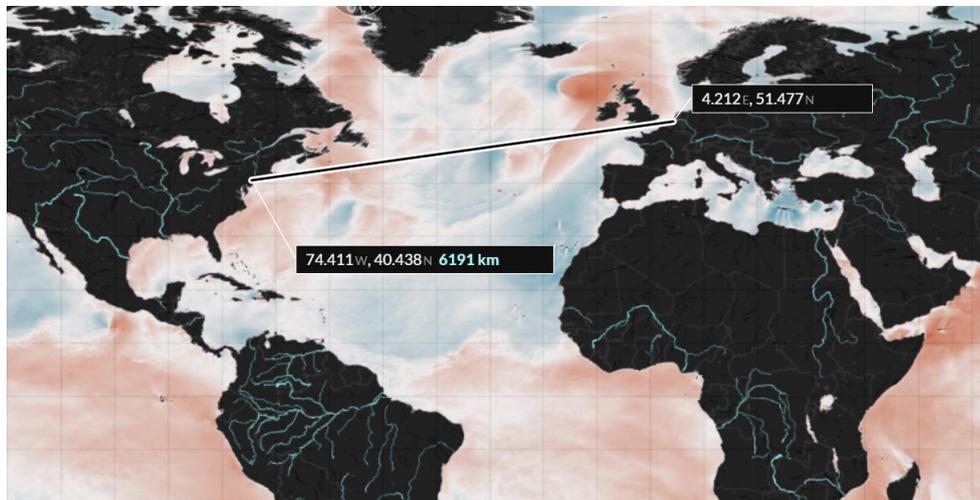


Figure 4 - Route Map of RTM–NYC

Through the 6.200km, the average thrust force was 62kN, showing this behavior:

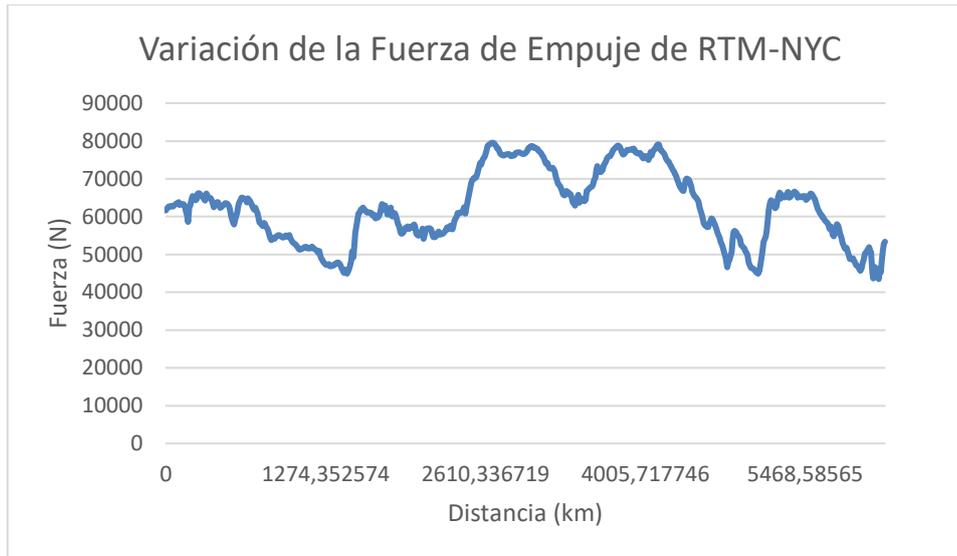


Figure 5 - Thrust Force Variation Along the RTM–NYC Route

5. Conclusions

This study demonstrates that improving energy efficiency and reducing emissions in maritime transport requires a combined approach involving hydrodynamic design advancements and the use of alternative fuels. Additionally, on certain routes, adopting complementary propulsion technologies can be highly effective.

Among the evaluated hydrodynamic solutions, the redesigned bow bulb stands out as the most effective and economically viable, significantly reducing total resistance and offering a fast return on investment. Air lubrication systems and drag-reducing plates provide additional improvements, especially when combined with the optimized bulb, although with higher installation complexity and cost.

Regarding fuels, methanol offers clear environmental advantages by drastically reducing NO_x , SO_x , and particulate emissions. However, its lower calorific value results in higher consumption and a higher EEDI, meaning direct CO_2 emissions may be even greater than with fossil fuels. This reflects the limitations of the EEDI, which does not account for full environmental impact or fuel life cycle.

Moreover, current economic barriers—such as high conversion costs and fuel prices—hinder its widespread adoption in the short term. It is essential to explore other options, such as Liquefied Natural Gas (LNG), which could serve as an intermediate solution while alternative fuels continue to develop.

Finally, technologies like Rotor Sails have proven to be energy-efficient systems capable of reducing main engine power consumption by 6–7%, with low operational and energy costs. Due to their high installation cost, their implementation should be carefully evaluated based on the specific operational route, as their efficiency largely depends on wind intensity,

direction, and stability. It is also advisable to optimize route planning to maximize the benefits of wind-assisted propulsion.

In summary, the combination of hydrodynamic improvements, cleaner fuels, and auxiliary technologies represents the most promising path to comply with current and future environmental regulations, facilitating a gradual transition toward more sustainable and competitive maritime transport.

6. References

[1] J. Collins, « Transporte marítimo, un gran lastre para el cambio climático.,» DW (Deutsche Welle), 11 09 2022. [En línea]. Available: <https://www.dw.com/es/transporte-mar%C3%ADtimo-un-lastre-para-el-medioambiente/a-63703002>. [Último acceso: 12 03 2025].

[2] C. M. Service, «Copernicus Marine Service,» Copernicus Marine Service, 2024. [En línea]. Available: <https://marine.copernicus.eu/>. [Último acceso: 18 05 2025].

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Motivación del proyecto.....	8
1.2 Contexto general.....	8
1.3 Objetivo general	9
Capítulo 2. Marco teórico.....	10
2.1 Marco regulatorio internacional	10
2.1.1 Convenio marpol	10
2.1.2 Otros acuerdos internacionales relevantes	22
2.2 Combustibles tradicionales.....	25
2.2.1 HFO.....	25
2.2.2 MDO.....	26
2.3 Buques tradicionales.....	26
2.3.1 Portacontenedores.....	27
2.3.2 Buques graneleros	28
2.3.3 Petroleros (VLCC).....	29
2.3.4 Parámetros hidrodinámicos generales.....	30
Capítulo 3. Estado de la Cuestión.....	31
3.1 Combustibles alternativos	31
3.1.1 LNG	31
3.1.2 Hidrógeno.....	32
3.1.3 Amoníaco.....	38
3.1.4 Metanol.....	41
3.2 Mejoras de diseño hidrodinámico	45
3.2.1 Parámetros hidrodinámicos clave.....	45
3.2.2 Mejoras hidrodinámicas aplicables a cascos convencionales	47
Capítulo 4. Definición del Trabajo	55
4.1 Justificación.....	55
4.2 Objetivos	55
4.2.1 Objetivo general	55

4.2.2	Objetivos específicos	56
4.3	Metodología.....	56
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....		58
5.1	Elección del buque de referencia.....	58
5.2	Cálculo de la resistencia total al avance (Rt).....	60
5.2.1	Superficie mojada del casco (S)	61
5.2.2	Coefficiente de fricción (Cf).....	63
5.2.3	Coefficiente residual (Cr)	64
5.3	Escenario Base	66
5.3.1	Cálculo de la potencia.....	66
5.3.2	Emisiones del escenario base.....	73
5.3.3	Cálculo del Índice de Eficiencia Energética (EEDI)	75
5.3.4	Evaluación económica.....	78
5.4	Escenario 1: metanol como combustible.....	78
5.4.1	Cálculo de consumo de combustible	79
5.4.2	Emisiones con metanol como combustible	80
5.4.3	Cálculo índice EEDI.....	82
5.4.4	Evaluación económica.....	83
5.5	Escenario 2: Proa con bulbo optimizado	85
5.5.1	Variaciones hidrodinámicas.....	85
5.5.2	Cálculo de resistencia	87
5.5.3	Cálculo del Índice de Eficiencia Energética (EEDI)	89
5.5.4	Evaluación económica.....	91
5.6	Escenario 3: Tecnologías de lubricación por aire.....	92
5.6.1	Evaluación económica.....	94
5.7	Escenario 4: Rotor Sails	97
5.7.1	Cálculos.....	99
5.7.2	Metodología usada para cálculos generales.....	101
5.7.3	Evaluación económica.....	104
5.7.4	Rutas	105
5.7.5	Conclusiones del escenario	114
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....		116

6.1	Comparación combustibles	116
6.2	Comparación mejoras hidrodinámicas	117
6.3	Comparación medidas regulatorias	117
6.4	Comparación económica	120
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....		123
7.1	El bulbo optimizado: la mejora más eficaz	123
7.2	Sistemas de lubricación por aire y placas reductoras	123
7.3	Combinación de bulbo + sistemas de lubricación por aire y placas reductoras	124
7.4	Rotor Sails.....	124
7.5	Impacto del combustible sobre el cii	125
7.6	El metanol como combustible	125
7.7	Trabajos futuros.....	127
7.7.1	GNL	127
7.7.2	Rotor Sails	127
Capítulo 8. Bibliografía.....		130
Capítulo 9. Bibliografía.....		138
ANEXO I 151		
9.1.1	Configuraciones hidrodinámicas alternativas (no aplicables a portacontenedores) ..	151

Índice de figuras

Figura 1 - Comparación de emisiones porcentual, HFO vs Metanol	24
Figura 2 – Comparación de las componentes de la resistencia según los escenarios planteados	25
Figura 3 - Índice EEDI obtenido en cada escenario vs EEDI requerido	26
Figura 4 - Mapa de la ruta de RTM-NYC	28
Figura 5 - Variación de la Fuerza de Empuje de RTM-NYC.....	28
Figura 6 - Mapa Zonas ECA [1].....	12
Figura 7 - Reducción de EEDI en granelero [4].....	17
Figura 8 - Evaluación de CII [5].....	20
Figura 9- Valoración de CII según vector d [5].....	21
Figura 10- Temperatura media de La Tierra desde 1880 hasta hoy [6]	23
Figura 11 - Emisiones de GEI, datos históricos y proyecciones [7].....	24
Figura 12 - Espiral de diseño [12]	27
Figura 13 – Portacontenedores típico de tamaño Panamax [15]	28
Figura 14 - Buque granelero tipo Panamax. Fuente: Nautic Expo	29
Figura 15 - Buque VLCC, uno de los petroleros más grandes para el transporte de crudo. Fuente: Nautic Expo	30
Figura 16 - Principales métodos de obtención de hidrógeno [18].....	33
Figura 17- Pila de hidrógeno [23].....	38
Figura 18 - Efecto del bulbo [26]	47
Figura 19 - Medidas características de un bulbo [27]	48
Figura 20 - Funcionamiento de los Rotor Sails [30]	49
Figura 21 - Esquema de fuerzas y velocidad de viento aparente [33].....	51
Figura 22 - Diagrama polar del coeficiente de empuje (C_t) vs.la dirección del viento aparente [33]	53
Figura 23 - Coeficiente de escora (C_h) vs. dirección del viento aparente [33]	53
Figura 24 - Diagrama de Sankey de eficiencia interna del motor	71

Figura 25 - Comparación del coste de metanol según producción.....	84
Figura 26 - Variación del Cl según el Spin Ratio [60]	100
Figura 27 - Variación del Cd según el Spin Ratio [60]	100
Figura 28 - Mapa de ruta CC-BA. Fuente: Copernicus.....	105
Figura 29 - Variación de viento de norte a lo largo de la ruta CC-BA.....	106
Figura 30 - Variación de viento de este a lo largo de la ruta CC-BA. Fuente: Copernicus.	106
Figura 31 - Variación de densidad del aire a lo largo de la ruta CC-BA. Fuente: Copernicus.	106
Figura 32 - Variación de la fuerza de empuje de CC-BA	107
Figura 33 - Mapa de ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.....	109
Figura 34 - Variación de viento de norte a lo largo de la ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.	109
Figura 35 - Variación de viento de este a lo largo de la ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.	109
Figura 36 - Variación de densidad del aire a lo largo de la ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.....	110
Figura 37 - Variación de la fuerza de empuje de RTM-NY	110
Figura 38 - Mapa de ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.	112
Figura 39 - Variación de viento de norte a lo largo de la ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.	112
Figura 40 - Variación de viento de este a lo largo de la ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.	112
Figura 41 - Variación de densidad del aire a lo largo de la ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.....	113
Figura 42 - Variación de la fuerza de empuje de SHA-LAX	113
Figura 43 - Comparación de la resistencia total de un monocasco vs. Catamarán.....	151

Índice de tablas

Tabla 1 - Resultados de las fuerzas y potencias medias en cada ruta.....	27
Tabla 2 - Límite de emisiones de NOx [2]	13
Tabla 3 - Limite de azufre dentro y fuera de las zonas ECA [2].....	13
Tabla 4 - Evolución de la reducción del factor de corrección	16
Tabla 5 -. Valores parámetro línea de referencia para el cálculo del EEDI. Obtenida de [2]	16
Tabla 6 - Parámetros para determinar el CII [5].....	19
Tabla 7 - Reducción de Z [5].....	19
Tabla 8 - Vector d para cada buque [5]	21
Tabla 9 - Parámetros hidrodinámicos generales según tipo de buque. Datos obtenidos de [13] y [14].	30
Tabla 10 - Comparación de los diferentes métodos de almacenamiento [22].....	37
Tabla 11 - Comparación del metanol según ruta de producción	43
Tabla 12 - Factores que influyen la eficiencia operativa de las tecnologías asistidas por viento [32]	50
Tabla 13 - Datos experimentales de aplicaciones de Rotor Sails de ahorro de combustible [32]	50
Tabla 14 - Datos específicos del motor MAN B&W 6S50MC [38]	68
Tabla 15 - SFOC del motor MAN B&W G90ME-C10.5 a diferentes MCR [40]	72
Tabla 16 - Emisiones Caso Base	74
Tabla 17 - Valores cálculo de valor de referencia. [43]	76
Tabla 18 - Reducción de índice EEDI según tamaño de buque portacontenedores [43]	76
Tabla 19 - EEDI requerido para el portacontenedores estudiado en cada fase	77
Tabla 20 - Comparación del uso de combustibles entre 2021 y 2024 [45]	79
Tabla 21 - Factores de emisión según porcentaje de metanol y diésel [48]	81
Tabla 22 - Emisiones con Metanol.....	82

Tabla 23 - Variación de principales coeficientes hidrodinámicos con la incorporación de bulbo de proa [52]	86
Tabla 24 - Emisiones con bulbo y HFO	89
Tabla 25 - Emisiones con bulbo y metanol	91
Tabla 26 - Reducción del coeficiente de fricción según la configuración de sistema de lubricación por aire [56]	93
Tabla 27 - Rango de costes de instalación y mantenimiento de los sistemas de lubricación [57]	95
Tabla 28 - Estimación del coste de instalación de los sistemas de lubricación aplicados al caso de estudio.....	95
Tabla 29 - Comparación reducción de resistencia total y coste de la tecnología	96
Tabla 30 - Configuraciones de diferentes casos reales [32]	98
Tabla 31 - Coste de instalación de los rotores Flettner	104
Tabla 32 - Comparación de la eficiencia de los Rotor Sails en cada ruta	114
Tabla 33 - Comparación de las emisiones entre HFO y Metanol.....	116
Tabla 34 - Comparación de las mejoras hidrodinámicas vs. las diferentes resistencia	117
Tabla 35 - Comparación EEDI obtenido en cada escenario	118
Tabla 36 - CII requerido para cada fase de reducción	118
Tabla 37 - Rango de CII específico del portacontenedores para cada calificación.....	119
Tabla 38 - Comparación de CII en cada escenario	120
Tabla 39 - Coste de uso de metanol como combustible	120
Tabla 40 - Comparación de costes entre tecnologías	121
Tabla 41 - Comparación de ROI para cada escenario	121

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El transporte marítimo constituye uno de los pilares fundamentales del comercio internacional, siendo responsable de más del 80% del volumen total de mercancías transportadas a nivel mundial. Sin embargo, esta actividad también representa una fuente significativa de emisiones contaminantes, especialmente de gases de efecto invernadero (GEI), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y partículas en suspensión (PM).

En las últimas décadas, la emergencia climática y la creciente preocupación por la sostenibilidad ha impulsado la transformación del sector marítimo hacia tecnologías de descarbonización para funcionar de forma sostenible.

Esta situación supone es un reto para el sector, pero también es una oportunidad clave para modernizar la industria naval, fomentar la innovación tecnológica y garantizar su viabilidad a largo plazo.

1.2 CONTEXTO GENERAL

La Organización Marítima Internacional (OMI), un organismo perteneciente a las Naciones Unidas, ha establecido un marco regulatorio para el transporte marítimo internacional, cada vez más exigente. Este marco se refleja principalmente en el Convenio MARPOL, un conjunto de seis anexos que regulan diversas formas de contaminación tanto atmosférica como marina.

De todos ellos, el anexo VI es el más relevante para este trabajo, ya que regula las emisiones atmosféricas de los buques. Para ello, mide la contaminación a través de indicadores técnicos clave como el EEDI, EEXI o CII.

Paralelamente, otras iniciativas globales como el Acuerdo de París o el Pacto Verde Europeo acompañan estas iniciativas. Estas regulaciones fuerzan a la industria naval a adoptar medidas para reducir su huella ambiental, intentando mantener su forma de funcionar y su rentabilidad.

1.3 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el impacto de distintas tecnologías sostenibles aplicadas a un buque portacontenedores real, analizando su viabilidad técnica, económica y ambiental. Para ello, se estudiarán tanto soluciones estructurales (como mejoras hidrodinámicas) como operativas (como el uso de combustibles alternativos o sistemas de propulsión asistida), analizándose en base a la normativa internacional vigente.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos del presente trabajo. Primero se definen las regulaciones internacionales vigentes actualmente, para después estudiar los combustibles tradicionales y las configuraciones de los buques convencionales. Este análisis servirá para respaldar y justificar la necesidad de avanzar hacia soluciones más sostenibles en el sector naval.

2.1 MARCO REGULATORIO INTERNACIONAL

2.1.1 CONVENIO MARPOL

El Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL) fue adoptado en 1973, y enmendado por primera vez en 1978. El acuerdo internacional regula y establece procedimientos sobre la forma de hacer la descarga de los diferentes residuos de los buques. Este tratado constituye la base normativa ambiental de sector marítimo, y es clave para reducir la contaminación de los océanos y proteger los ecosistemas marinos.

MARPOL se divide en 6 anexos, abordando cada cual un tipo de contaminación clave:

- ANEXO I: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos
- ANEXO II: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel
- ANEXO III: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos.
- ANEXO IV: Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques.
- ANEXO V: Reglas para prevenir la contaminación por las basuras de los buques.
- ANEXO VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques

En el contexto de descarbonizar el sector marítimo, el Anexo VI es el más relevante al centrarse en la reducción de GEI y la mejora de la eficiencia energética de los buques.

2.1.1.1 Anexo VI

El Anexo VI, que entró en vigor en 2005, regula las emisiones contaminantes procedentes de los buques. Esta regulación está compuesta por 5 capítulos y 25 reglas. A continuación, se explicarán las zonas ECA, definidas por la IMO, para entender las regulaciones posteriores, donde se explicarán los capítulos más relevantes para este trabajo.

- Zonas ECA:

Las zonas de control de emisiones (zonas ECA), son áreas definidas por la OMI donde se aplican límites más estrictos con el fin de proteger regiones especialmente sensibles a la contaminación atmosférica. En la siguiente figura se reflejan las zonas ECA: el Mar Báltico, el Mar del Norte, la costa este de Estados Unidos y Canadá, y el Mar Mediterráneo, recientemente aprobado como zona ECA, y cuya normativa entró en vigor 1 de mayo de 2025. En estas zonas obligatorio cumplir con el límite más estricto de contenido de azufre, que puede conllevar un cambio en el tipo de combustible empleado. [1]

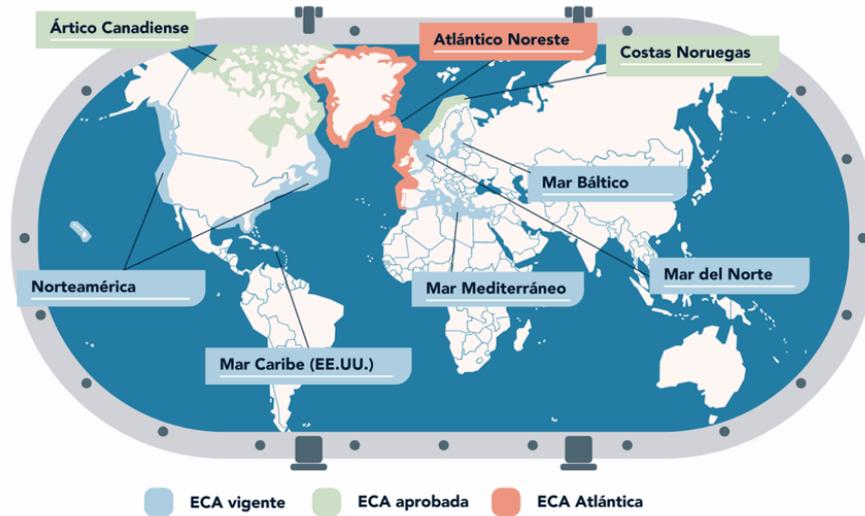


Figura 6 - Mapa Zonas ECA [1]

Las zonas diferenciadas de color rosado, es decir, el atlántico nororiental, fueron aprobadas en abril de 2025. Sin embargo, no entrarán en vigor hasta 2027, permitiendo a los estados miembros, entre ellos, España, y a la industria marítima prepararse para su implementación. Las zonas de color verde son diferenciadas porque cuentan con un trato especial por pertenecer a zonas polares.

- Anexo VI, Capítulo 3: Prescripciones para el control de las emisiones de los buques:

Este capítulo regula las emisiones de gases contaminantes procedentes de los buques. Está compuesto por 7 reglas, sin embargo, sólo se explicarán las reglas 13 y 14, ya que regulan los contaminantes anteriormente mencionados.

- Regla 13: óxidos de nitrógeno (NO_x)

La finalidad de esta regla es limitar las emisiones de NO_x procedentes de motores diésel marinos con potencia superior a 130kW, exceptuando los destinados a situaciones de emergencia. Su aplicación no depende del arqueado bruto del buque. Además, tiene distintos niveles de exigencia según el año de construcción del buque y el régimen nominal de funcionamiento del motor.

Tabla 2 - Límite de emisiones de NOx [2]

Nivel	Fecha de construcción del buque	Valor límite de emisión ponderada total del ciclo (g/kWh)		
		n = régimen nominal del motor (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 enero 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ por ejemplo, 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 enero 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ por ejemplo, 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 enero 2016*	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ por ejemplo, 720 rpm – 2.4	2.0

Este esquema plantea una reducción de las emisiones de NOx de un 20% entre el grupo I, buques construidos entre 2000 y 2010; y el grupo II, buques construidos posteriormente al 2011. Exceptuando los buques que operen en zonas ECA de Norteamérica y del Mar Caribe, referidos en el grupo III, que tendrán que cumplir con una reducción de emisiones del 80% comparado con el grupo I, siempre que actúen dentro de esas zonas. Fuera de ellas, se aplicará las limitaciones del grupo II.

- Regla 14: óxidos de azufre (SOx) y materia particulada (PM, también denominada partículas en suspensión)

El objetivo de esta regla es controlar las emisiones de SOx y PM, y aplica a todos los dispositivos de combustión que trabajen con fueloil. El nivel de restricción es más estricto en las zonas ECA. La tabla a continuación muestra los niveles.

Tabla 3 - Límite de azufre dentro y fuera de las zonas ECA [2]

Fuera de una ECA establecida para limitar las emisiones de SOx y de materia particulada	En una ECA establecida para limitar las emisiones de SOx y de materia particulada
4,5% masa/masa antes del 1 de enero de 2012	1,5% masa/masa antes del 1 de julio de 2010

3,5% masa/masa a partir del 1 de enero de 2012	1,0% masa/masa antes del 1 de julio de 2010
0,5% masa/masa a partir del 1 de enero de 2020	0,10% masa/masa antes del 1 de julio de 2010

- Anexo VI, Capítulo 4: Reglas sobre la eficiencia energética de los buques.

Como parte de las estrategias de la IMO para reducir los gases de efecto invernadero, se han establecido ciertos indicadores de la eficiencia energética para poder medir y controlar las emisiones.

Los indicadores principales son el índice de eficiencia energética de diseño (EEDI), el índice de eficiencia energética de buques existentes (EEXI) y el indicador de intensidad de carbono (CII). Los tres indicadores forman parte del marco normativo que la IMO adopta para lograr la descarbonización del transporte marítimo.

- EEDI y EEXI

El índice EEDI mide la eficiencia energética del diseño de un buque nuevo. Se desarrolló en 2013. Está dirigido a los buques de mayor tamaño, como portacontenedores, petroleros o graneleros. En concreto, aplica a buques con un arqueado bruto (Gross Tonnage), de 400 GT. El Gross Tonnage es una medida adimensional que representa el volumen interno total del buque, incluyendo todos los espacios cerrados bajo cubierta, utilizada habitualmente como referencia en muchos convenios internacionales para definir que normativas se aplican.

En cambio, el índice EEXI aplica a aquellos buques existentes antes de la entrada en vigor del EEDI, en 2013.

Este índice relaciona las emisiones de CO_2 procedente del buque, expresada en gramos de CO_2 , con la masa transportada, en toneladas, y la distancia recorrida (millas náuticas). Lo que, basándose en la definición, se traduce como:

$$EEDI = \frac{\text{emisiones de } CO_2}{\text{Trabajo de transporte}}$$

No obstante, la OMI, en sus documentos, ofrece en cálculo más técnico y detallado, con diferentes factores de corrección y parámetros dependiendo del tipo de buque y otras características específicas. Sin embargo, existe una fórmula empleada en distintos estudios, donde el índice EEDI se generaliza con la siguiente fórmula:

$$EEDI = \frac{P * SFC * CF}{\text{Capacidad} * V}$$

Siendo P la potencia propulsora instalada (kW), SFC el consumo específico de combustible (g/kWh), CF el factor de conversión de carbono (g CO₂ / g de combustible), Capacidad la carga útil del buque (DWT), V la velocidad de referencia (en nudos). Por ende, un menor EEDI significa una mayor eficiencia energética.

Además, este valor (EEDI alcanzado) debe ser menor al establecido por la OMI (EEDI requerido), que varían según el tipo y tamaño de buque.

$$EEDI_{\text{alcanzado}} \leq EEDI_{\text{requerido}} = \frac{100 - X}{100} * \text{valor de nivel de referencia}$$

En esta expresión, X es un factor de reducción, que se vuelve más restrictivo con el tiempo y depende del tipo y tamaño de buque. En líneas generales, el valor de nivel de referencia, en la fase 1 se reduce un 10%. En la fase 2, el nuevo valor se reduce entre un 15% y un 20%, dependiendo del buque. Finalmente, por el momento, en la fase 3 se redujo el nuevo valor un 30%. [2]

Phase	0	1	2	3
Vessel Construction Date	1 Jan 2013 - 31 Dec 2014	1 Jan 2015 - 31 Dec 2019	1 Jan 2020 - 31 Dec 2024	1 Jan 2025 onwards
Reduction from Phase 0 Limits	0%	10%	20%*	30%
Reduction Factor (X)	0	0.1	0.2*	0.3

**Table 1. *Phase 2 reduction is 15% (X = 0.15)
for Reefers and Small Dry.**

Tabla 4 - Evolución de la reducción del factor de corrección

El valor de nivel de referencia es específico para cada tipo de buque, y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Valor de referencia} = a * b^{-c}$$

Aquí, a y c son parámetros específicos de cada tipo de buque, y b es el peso muerto del buque. Este concepto se refiere a la cantidad total máxima de peso que puede transportar sin superar su calado máximo, se mide en toneladas métricas. Todos los valores se especifican en la tabla a continuación:

Tabla 5 - Valores parámetro línea de referencia para el cálculo del EEDI. Obtenida de [2]

Tipo de buque	a	b	c
Granelero	961,79	DWT	0,477
Metanero	1120,00	DWT	0,456
Petrolero	1218,00	DWT	0,488
Portacontenedores	174,22	DWT	0,201
Buque de carga	107,48	DWT	0,216

Frigorífico	227,01	DWT	0,244
Ro-Ro	1405,15	DWT	0,498
Cruceros de propulsión no convencional	170,84	DWT	0,214

Como se ha mencionado anteriormente, EEDI permitido tiene diferentes fases, disminuyendo cada 5 años, e imponiendo una mayor eficiencia energética.

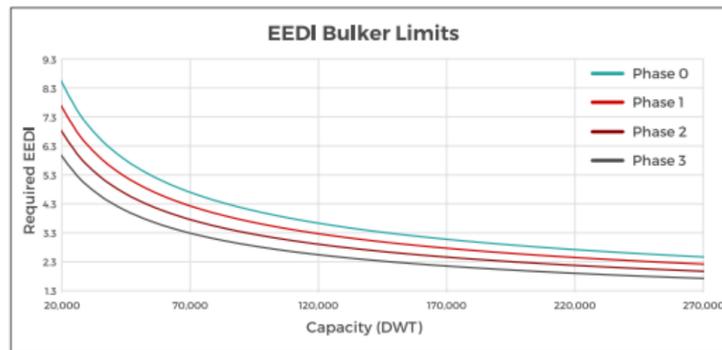


Figura 7 - Reducción de EEDI en granelero [4]

Además, en este gráfico se puede observar como el límite establecido depende también de la capacidad del buque. Cuanto mayor el arqueo bruto, más estricto el EEDI. Esto se debe a que los buques más grandes, a pesar de ser más eficientes en términos relativos, tienen un efecto mucho mayor, al consumir mucho más combustibles y ser los que más CO_2 emiten. Por este motivo, la normativa le exige límites más estrictos.

Para cumplir con los valores exigidos, muchos buques han aplicado modificaciones técnicas como limitadores de potencia o ajustes de hélices. Además, han adoptado mejoras en sistemas de propulsión y uso de combustibles alternativos.

Esta normativa busca fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico para mejorar la eficiencia energética, armonizando el nivel de eficiencia de los buques más antiguos con los nuevos. [5]

○ CII

El indicador de intensidad de carbono mide también la eficiencia operacional del buque a la hora de transportar una carga, basándose en los gramos de CO_2 expulsados. A diferencia de los indicadores anteriores, que se basan en los parámetros de diseño, el CII se calcula a partir de los datos reales y se aplica a buques de a partir de 5000GT que operen de forma internacional. Para calcular este indicador se aplica la siguiente fórmula:

$$CII = \frac{\text{Emisiones anuales de } CO_2}{\text{Carga transportada (toneladas)} * \text{distancia recorrida (millas náuticas)}}$$

Como pasaba con el EEDI, el CII también se compara con un valor referencia que depende del tipo de buque y del factor de reducción.

$$CII_{\text{alcanzado}} \leq CII_{\text{referencia}} * \frac{100 - Z}{100}$$

El CII de referencia se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$CII_{\text{referencia}} = a * DWT^{-c}$$

Los valores a y c dependen del tipo de buque que se esté evaluando, según la Tabla 6 - Parámetros para determinar el CII y del Tonelaje de Peso Muerto (TPM, DWT en inglés), esta medida es la máxima carga que un buque puede transportar de manera segura, es decir, la diferencia entre el peso del buque totalmente cargado (incluyendo tripulación, combustible, agua...) y el peso del buque vacío.

Ship type		Capacity	<i>a</i>	<i>c</i>
Bulk carrier	279,000 DWT and above	279,000	4745	0.622
	less than 279,000 DWT	DWT	4745	0.622
Gas carrier	65,000 and above	DWT	14405E7	2.071
	less than 65,000 DWT	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	20,000 DWT and above	DWT	31948	0.792
	less than 20,000 DWT	DWT	588	0.3885
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	5119	0.622
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	9.827	0.000
	65,000 DWT and above, but less than 100,000 DWT	DWT	14479E10	2.673
	less than 65,000 DWT	65,000	14779E10	2.673
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	57,700 GT and above	57,700	3627	0.590
	30,000 GT and above, but less than 57,700 GT	GT	3627	0.590
	Less than 30,000 GT	GT	330	0.329
Ro-ro cargo ship		GT	1967	0.485
Ro-ro passenger ship	Ro-ro passenger ship	GT	2023	0.460
	High-speed craft designed to SOLAS chapter X	GT	4196	0.460
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Tabla 6 - Parámetros para determinar el CII [5]

Además, el factor de reducción, es decir, *Z*, va disminuyendo cada año progresivamente, como se ve a continuación:

Tabla 7 - Reducción de *Z* [5]

Año	Factor de reducción (<i>Z</i>)
2023	5%
2024	7%
2025	9%
2026	11%

A destacar que de los años 2020 a 2022 se aplicaron valores de Z de 1%, 2% y 3%, respectivamente, para dejar un margen a que las empresas se adapten a la nueva medida. Además, los años posteriores se regularán más adelante, basándose en datos a corto plazo.

Para calificar el CII obtenido, se han establecido umbrales basados en las desviaciones estadísticas respecto al valor requerido del CII. Para ello, se diferencian los umbrales a partir de una serie de coeficientes, denominados d_1 , d_2 , d_3 y d_4 , que representan el logaritmo natural (\ln) del percentil que define las calificaciones de los CII.

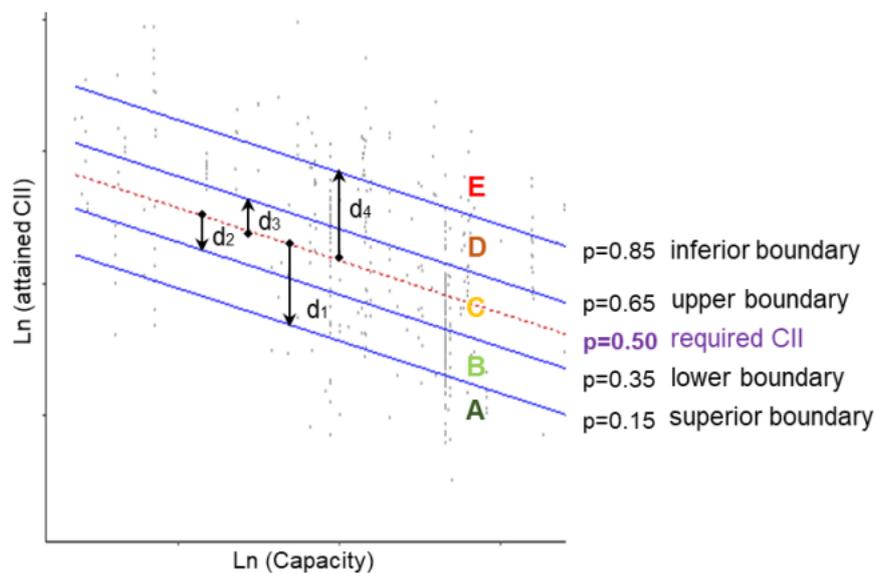


Figura 8 - Evaluación de CII [5]

Este enfoque logarítmico permite que cada categoría sea proporcional al valor requerido del CII, como muestra la siguiente imagen:

$$\left. \begin{aligned} \text{superior boundary} &= \exp(d_1) \cdot \text{required CII} \\ \text{lower boundary} &= \exp(d_2) \cdot \text{required CII} \\ \text{upper boundary} &= \exp(d_3) \cdot \text{required CII} \\ \text{inferior boundary} &= \exp(d_4) \cdot \text{required CII} \end{aligned} \right\}$$

Figura 9- Valoración de CII según vector d [5]

El valor de los vectores d depende de cada tipo de buque, según el siguiente cuadro:

Ship type		Capacity in CII calculation	dd vectors (after exponential transformation)			
			exp(d1)	exp(d2)	exp(d3)	exp(d4)
Bulk carrier		DWT	0.86	0.94	1.06	1.18
Gas carrier	65,000 DWT and above	DWT	0.81	0.91	1.12	1.44
	less than 65,000 DWT	DWT	0.85	0.95	1.06	1.25
Tanker		DWT	0.82	0.93	1.08	1.28
Container ship		DWT	0.83	0.94	1.07	1.19
General cargo ship		DWT	0.83	0.94	1.06	1.19
Refrigerated cargo carrier		DWT	0.78	0.91	1.07	1.20
Combination carrier		DWT	0.87	0.96	1.06	1.14
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	0.89	0.98	1.06	1.13
	less than 100,000 DWT		0.78	0.92	1.10	1.37
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)		GT	0.86	0.94	1.06	1.16
Ro-ro cargo ship		GT	0.76	0.89	1.08	1.27
Ro-ro passenger ship		GT	0.76	0.92	1.14	1.30
Cruise passenger ship		GT	0.87	0.95	1.06	1.16

Tabla 8 - Vector d para cada buque [5]

Por último, se compara el valor CII obtenido con las zonas, obteniéndose una A si es inferior al valor fronterizo inferior, y una calificación E si es mayor al superior. SEEMP

El Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buques es una medida operativa que establece un mecanismo con el fin de mejorar la eficiencia de un buque de forma eficaz y económica, durante su operación. Esta normativa es obligatoria para todo buque de más de 400 GT, que operen internacionalmente. Se constituye por un plan que permite gestionar y controlar la eficiencia energética de uno o varios buques. El plan incluye procedimientos y medidas, específicas de cada buque, para optimizar la planificación de rutas, gestión del mantenimiento de motor, optimización de la velocidad y otras prácticas, con el fin de reducir

el consumo innecesario de energía. Este plan se tiene que ir actualizando continuamente, evaluándose a través de un ciclo de mejora continua PDCA, (Planificar, Implementar, Revisar y Actuar, en inglés) lo que significa una revisión constante.

Además, usa herramientas de monitoreo para analizar la eficiencia del barco en funcionamiento, a través del Indicador Operacional de Eficiencia Energética (EEOI), un instrumento voluntario que permite medir el consumo eficiente de combustible durante el servicio del buque.

Como se ha mencionado anteriormente, desde enero de 2023 se introdujo el SEEMP Parte III. Este se basa en un plan para implementar al CII, con objetivos anuales, medidas concretas y procedimientos de revisión. Su cumplimiento está controlado anualmente por las autoridades competentes, que recopilan los datos de consumo de combustible y emisiones reportados en el sistema IMO DCS (Data Collection System) y calculan el CII anual del buque, que recibe una calificación, como explicado anteriormente. Los buques que obtienen una calificación de E o una D tres años consecutivos deberán plantear un plan para mejorar la eficiencia energética y reducir el CII, como parte de su Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque.

Esta regulación en la operación de los buques complementa las regulaciones estructurales del EEDI y EEXI con el objetivo de reducir progresivamente las emisiones del transporte marítimo internacional.

2.1.2 OTROS ACUERDOS INTERNACIONALES RELEVANTES

2.1.2.1 Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático, adoptado por 196 países en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) en 2015, y entró en vigor en 2016. El objetivo principal de la conferencia es organizar una estrategia mundial para combatir el cambio climático, manteniendo por debajo de 2°C el

aumento de la temperatura media global, respecto a los niveles preindustriales, intentando no superar 1,5°C, como se refleja en el gráfico a continuación. Para cumplir el objetivo, se busca alcanzar el pico de emisiones de GEI lo antes posible para iniciar a reducirlo progresivamente y lograr cero emisiones netas para 2050.

GLOBAL LAND-OCEAN TEMPERATURE INDEX

Change from base period 1951-1980, monthly data.

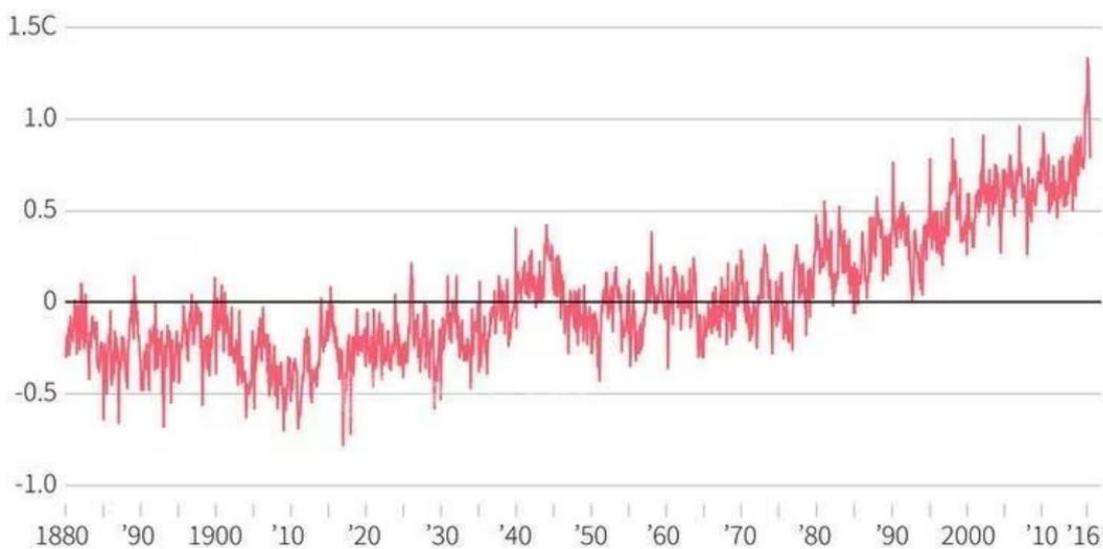


Figura 10- Temperatura media de La Tierra desde 1880 hasta hoy [6]

A pesar de que este acuerdo no se centre específicamente en el transporte marítimo, este ha influido significativamente en la OMI, que ha alineado sus estrategias con los objetivos globales establecidos en el Acuerdo de París, adaptando políticas como el EEDI, el EEXI y CII para reducir las emisiones de sector naval.

2.1.2.2 Pacto Verde Europeo

La Comisión Europea, en diciembre de 2019, lanzó el Pacto Verde Europeo, un plan estructurado con el fin de transformar a la Unión Europea en una economía moderna, eficiente en el uso de recursos y competitiva. Sus objetivos son lograr que no haya emisiones netas de GEI en 2050, como se muestra en el gráfico de la figura a continuación. Lo que conllevaría

desvincular el crecimiento económico con el uso de recursos y que conlleve un desarrollo global. [8]

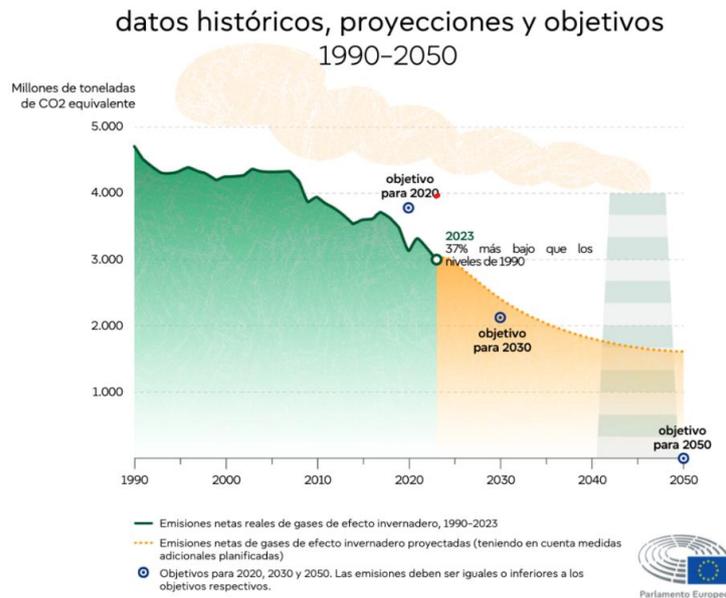


Figura 11 - Emisiones de GEI, datos históricos y proyecciones [7]

Como objetivos a medio plazo, existen ciertas iniciativas como el “FitFor55”, con el objetivo de reducir un 55% las emisiones netas de GEI para 2030 en comparación con 1990. El “FUEL EU Maritime” forma parte de esta iniciativa, y tiene el objetivo de regular gradualmente las emisiones de GEI, estableciendo límites para los combustibles marinos, promoviendo el uso de combustibles renovables de origen no biológico y el uso de energía eléctrica en puertos. [8]

Además, en el sector marítimo se ha incluido el sector en el Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (EU ETS), que fija un límite máximo a las emisiones de CO_2 . De esta manera, las empresas reciben permisos de emisión, y, en caso de emitir menos, pueden venderlos a empresas que necesiten consumir más, incentivando la reducción de emisiones. [9]

2.1.2.3 Estrategia de la OMI para la reducción de los GEI

Esta estrategia la propone la OMI en el 2018. Plantea el objetivo de reducir en un 40% las emisiones de GEI del transporte marítimo para 2030, y un 50% para 2050, con respecto a 2008.

Para alcanzar esta meta, se promueve el desarrollo y adopción de tecnologías innovadoras, mejoras de la eficiencia y el uso de combustibles alternativos, con el objetivo de mejorar la intensidad de carbono del sector a partir de 2030. Estas regulaciones internacionales son fundamentales para coordinar los esfuerzos mundiales y lograr el desarrollo sostenible del transporte marítimo. [10]

2.2 COMBUSTIBLES TRADICIONALES

En el sector de transporte marítimo, el combustible es la fuente principal de energía para propulsar y cubrir todas las demandas auxiliares del buque. Tradicionalmente, los combustibles marinos han dependido casi exclusivamente de combustibles fósiles derivados del petróleo, como el fuelóleo pesado (Heavy Fuel Oil, HFO) o el gasóleo marino (Marine Diesel Oil, MDO), gracias a su disponibilidad global, bajo coste y densidad energética.

Sin embargo, de acuerdo con los objetivos establecidos para descarbonizar el sector, la creciente presión regulatoria está impulsando al sector a buscar alternativas para reducir la emisión de contaminantes y mitigar el impacto climático.

2.2.1 HFO

El fuelóleo pesado (HFO) es un residuo de alta densidad, que aparece tras el proceso de destilación y refinado del petróleo crudo. Necesita tratamientos especiales debido a su alta viscosidad e impurezas.

Es el combustible más usado en embarcaciones grandes por su bajo costo. Sin embargo, es el más contaminante dentro del sector marítimo, con un alto contenido de azufre. Muchos buques, para cumplir con las normativas medioambientales, tienen que incorporar sistemas

de depuración de gases de escape (scrubbers), lo que incrementa el costo operativo de los buques que usen este petróleo. [11]

2.2.2 MDO

El gasóleo marino (MDO) es un combustible que obtiene a partir de la destilación del petróleo crudo, con menos impurezas y menor viscosidad, lo que facilita su combustión y manejo.

Gracias a su menor contenido en azufre, que depende del tipo de crudo y proceso de refinado, se suele utilizar principalmente en buques de menor tamaño o en operaciones portuarias, sobre todo dentro de las zonas ECA (Figura 6 - Mapa Zonas ECA)

Aun así, sigue siendo un combustible derivado del petróleo, con un alto contenido en carbono, y su combustión genera grandes cantidades de gases contaminantes, como CO_2 , NO_x y, en menor medida, SO_x , por lo que no representa una solución a largo plazo. [11]

2.3 BUQUES TRADICIONALES

Durante el siglo XX y principios del siglo XXI, el diseño de la mayor parte de los buques priorizaba características como la capacidad de carga, la robustez de la estructura y la seguridad operativa. Aspectos que en las últimas décadas han ganado mucho peso en el diseño del barco, como el impacto ambiental y la eficiencia energética, antes eran interpretados como secundarios.

En este contexto, el proceso de diseño de un buque se aborda de forma iterativa, asegurando el cumplimiento de varios requisitos técnicos simultáneamente. Esta forma de diseñar se representa de forma clara y visual en la “espiral de diseño” propuesta por J. Harvey Evans [12], que ilustra cómo variables como el desplazamiento, resistencia, estabilidad, potencia y coste están interconectados y se iban ajustando a lo largo de múltiples ciclos, hasta obtener el diseño final. Cabe destacar que la eficiencia energética sí aparece como parámetro para tener en cuenta, pero no tenía la importancia que tiene hoy en día en el proceso.

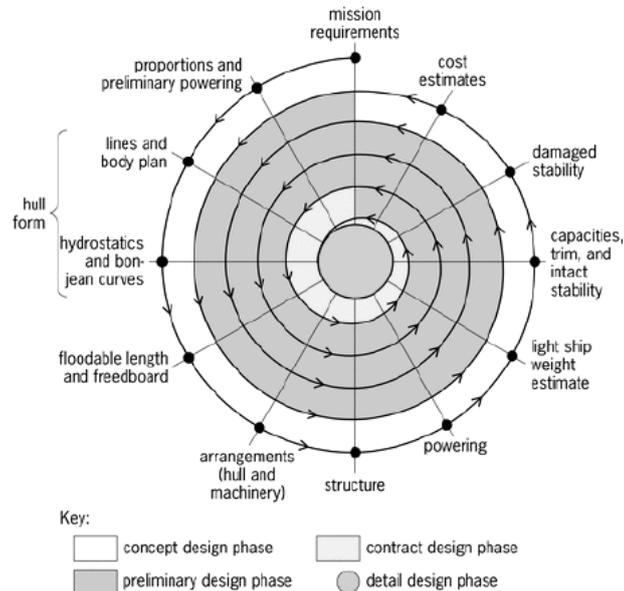


Figura 12 - Espiral de diseño [12]

Una vez entendida la metodología a través de la que se diseñaban los buques convencionales y como todos los aspectos se interrelacionan entre sí, se analizarán los diferentes diseños típicos de los principales tipos de buques de transporte marítimo. Se compararán, desde un punto de vista hidrodinámico, los portacontenedores, graneleros y petroleros, estudiando sus proporciones características típicas, eficiencia y comportamiento con el agua.

2.3.1 PORTACONTENEDORES

El transporte por contenedores es la forma más eficiente, hoy en día, de transportar mercancías. Los portacontenedores están diseñados para transportar cargas de forma rápida y eficiente, siguiendo unas rutas regulares y unos horarios estrictos establecidos que exigen velocidades muy superiores a la de otros buques.



Figura 13 – Portacontenedores típico de tamaño Panamax [15]

Estas necesidades están directamente relacionadas con la forma del casco, optimizados para minimizar la resistencia al avance, especialmente a la resistencia de forma y de onda.

2.3.2 BUQUES GRANELEROS

Los graneleros tienen la función de transportar cargas secas no contenerizadas, como minerales, cereales o carbón. Por este motivo, su diseño se centra en soportar grandes volúmenes de carga pesada, enfocándose en la capacidad volumétrica y la estabilidad frente a aspectos secundarios como la velocidad o eficiencia hidrodinámica pura. Esto se ve reflejado en la forma de cascos, más anchos y llenos, pero permitiendo maximizar el volumen interno y la capacidad de carga por unidad de eslora, a coste de aumentar la resistencia al avance, especialmente de fricción.



Figura 14 - Buque granelero tipo Panamax. Fuente: Nautic Expo

2.3.3 PETROLEROS (VLCC)

Los petroleros tipo VLCC (Very Large Crude Carriers) se emplean para el transporte de grandes volúmenes de crudo a largas distancias. Como en el caso de los graneleros, se diseñan para priorizar la capacidad de carga y la eficiencia operativa, es decir, el consumo por tonelada transportada, y no en la velocidad.

Por este motivo, desde el punto de vista hidrodinámico los VLCC presentan formas extremadamente llenas, con coeficientes de bloque muy elevados y velocidades de operación bajas. Estas características reflejan un diseño robusto y optimizado para navegar con elevada carga sin comprometer la estabilidad ni la seguridad estructural.



Figura 15 - Buque VLCC, uno de los petroleros más grandes para el transporte de crudo. Fuente: Nautic Expo

2.3.4 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS GENERALES

De acuerdo con el fin de uso de cada buque, presentan normalmente ciertos parámetros hidrodinámicos:

Tabla 9 - Parámetros hidrodinámicos generales según tipo de buque. Datos obtenidos de [13] y [14].

Parámetro	Portacontenedores	Granelero	Petrolero (VLCC)
Coefficiente de boque (C_b)	0,6-0,7	0,75-0,85	0,8-0,9
Número de Froude (Fr)	0,25 – 0,3	0,15 – 0,2	0,14 – 0,18
Velocidad típica (nudos)	16 - 22	13 - 15	13 - 16

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este capítulo se realiza una revisión de los avances tecnológicos de las últimas décadas para mejorar la sostenibilidad en el sector marítimo. Se analizan estudios y casos prácticos tanto de la adopción de combustibles alternativos como de mejoras de diseño hidrodinámico, para identificar las oportunidades y posibles limitaciones de las diferentes opciones.

3.1 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

3.1.1 LNG

El gas natural licuado (GNL) está compuesto en un 95,1% por metano (CH_4), con pequeñas cantidades de propano (4,1%) y propano (0,6%). Este se obtiene mediante la licuefacción del gas natural, proceso que implica eliminar impurezas y temperaturas muy bajas, ya que se almacena a temperaturas cercanas a los -162°C . El almacenamiento a bordo requiere tanques criogénicos de gran volumen.

El GNL tiene ventajas claras: reduce prácticamente a cero las emisiones de SO_x , reduce significativamente las emisiones de NO_x y partículas en suspensión, y, además, gracias a su alta relación hidrógeno-carbono, reduce hasta un 20% las emisiones de CO_2 , con respecto a los combustibles convencionales. [15]

3.1.1.1 Methane slip

Sin embargo, su principal inconveniente es el riesgo de fugas de metano no quemado, también llamado ‘methane slip’. Este gas tiene un potencial de calentamiento global entre 28-34 veces mayor al CO_2 [16], lo que puede contrarrestar los otros beneficios ambientales que ofrece.

En motores de baja presión (LPDF), se han registrado emisiones de hasta 12g/kWh de CH_4 . De hecho, diversos estudios han demostrado que el *methane slip* disminuye

significativamente a medida que aumenta la carga del motor, siendo mucho más elevado en condiciones de baja potencia (por debajo del 25–50% de MCR) [15]. Además, existen motores de alta presión, que, aunque más costosos y complejos, eliminan este problema. [17]

3.1.2 HIDRÓGENO

El hidrógeno, compuesto químicamente por dos átomos de hidrógeno (H₂), es el elemento químico más abundante del planeta, y compone un 75% de la materia del universo, aunque normalmente se encuentra combinado con otros elementos, como el agua o el carbono. A temperatura ambiente se encuentra en estado gaseoso.

La propulsión a hidrógeno es una de las alternativas más prometedoras para la descarbonización del sector marítimo. En los últimos años está obteniendo gran interés ya que es una fuente ilimitada de energía que solo produce vapor de agua al ser combustionado. Sin embargo, presenta grandes desafíos técnicos, económicos y logísticos para ser adoptado a gran escala.

3.1.2.1 Producción

En los últimos años, la producción de hidrógeno ha obtenido mucha atención, ya que es una solución potencial para la descarbonización de varios sectores, la industria marítima entre ellos. La forma tradicional de generar hidrógeno y la más empleada es a través de la reformación de gas natural gracias a su alta eficiencia y poco costo. Hoy en día, se están desarrollando diferentes métodos para su obtención, ya que usando gas natural se emiten grandes cantidades de CO₂, haciendo que siga dependiendo de fuentes contaminantes.

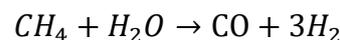
Por este motivo, el gran problema del hidrógeno es el método para su obtención. Dependiendo del método y de las emisiones de este, obtenemos las diferentes formas de producir hidrógeno: el hidrógeno gris, el hidrógeno azul el hidrógeno turquesa y el hidrógeno verde son los que se tratan a continuación. Además, existen otros como el hidrógeno amarillo, a partir de la electricidad de la red primaria y el hidrógeno rosa, a partir de energía nuclear.



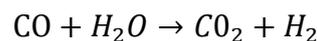
Figura 16 - Principales métodos de obtención de hidrógeno [18]

3.1.2.1.1 Hidrógeno gris

Para empezar, el hidrógeno gris es el obtenido tradicionalmente, a partir de combustibles fósiles. Actualmente, el 99% del hidrógeno consumido en España es de este tipo. De esta forma se generan emisiones notables de CO_2 , motivo por el cual se están desarrollando otras formas de obtenerlo. Comúnmente se usa el gas natural, a través del reformado de metano con vapor (SMR). En esta reacción, el metano (CH_4), principal componente del gas natural reacciona con vapor de agua (H_2O). Al ser una reacción endotérmica, necesita alta temperatura ($700-1100^\circ C$) para ocurrir, y la presencia de un catalizador, normalmente de níquel. Siguiendo la ecuación a continuación:



La segunda reacción es la del monóxido de carbono restante (CO), con mas vapor de agua. Este produce más hidrógeno, y el dióxido de carbono (CO_2). A diferencia de la otra, esta reacción es exotérmica y libera calor.



Este proceso es eficiente desde el punto de vista energético, pero muy contaminante, ya que por cada kilogramo de hidrógeno producido se emiten unos 9 kg de CO_2 . Por este motivo recibe el nombre de hidrógeno gris. Actualmente, el 96% del hidrógeno producido mundialmente sigue este método. [19]

3.1.2.1.2 Hidrógeno azul

Aunque el hidrógeno azul se produce a partir del mismo proceso que el hidrógeno gris, se diferencia por la incorporación de técnicas de captura y almacenamiento de carbono (CCS), lo que reduce significativamente las emisiones de CO_2 . Esta es una solución intermedia durante las primeras etapas de transición energética, aprovechando la infraestructura ya existente. Sin embargo, el hidrógeno azul presenta limitaciones importantes: se basa en el uso de gas natural, por lo que depende de los recursos fósiles finitos con precios inestables; las tecnologías de transporte y almacenamiento del CO_2 capturado presenta desafíos sociales y económicos; y, además, no cumple con el objetivo de emisiones netas cero, ya que los sistemas de captura actuales logran eficiencias del 85-95%, dejando emisiones residuales. Por tanto, el hidrógeno azul puede contribuir de forma intermedia a la reducción de emisiones, pero no es una solución, por ahora, compatible a largo plazo. [20]

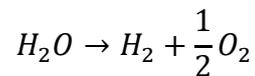
3.1.2.1.3 Hidrógeno turquesa

El hidrógeno turquesa se obtiene mediante la pirólisis del metano, un proceso mediante el cual el gas natural se descompone térmicamente en hidrógeno y carbón sólido. Este proceso es endotérmico, por lo que necesita mucha temperatura para llevarse a cabo (900-1000°C). Obtener el hidrógeno mediante este proceso no solo evita la emisión directa de CO_2 durante la producción y facilita el almacenaje y manejo que el carbono capturado, sino que además podría generar ingresos adicionales, gracias a la posible comercialización del carbono sólido en mercados industriales. Sin embargo, esta nueva tecnología se enfrenta a grandes retos, relacionados con la eficiencia del proceso, el suministro energético necesario, y la capacidad de absorción del mercado de todo el carbono sólido sobrante. El hidrógeno turquesa es una alternativa potencial para reducir las emisiones, pero su viabilidad a gran escala requiere desarrollo tecnológico y económico. [20]

3.1.2.1.4 Hidrógeno verde

El hidrógeno verde es aquel producido a partir de energías renovables. De todos los distintos tipos de hidrógeno, este es el más adecuado para lograr una transición energética totalmente sostenible. En la actualidad, representa solamente el 4% de la producción total. [19]

La tecnología más desarrollada para su obtención parte de la electrólisis del agua, donde, mediante la aplicación de una corriente eléctrica, se da la siguiente reacción:



Para considerarse hidrógeno verde, esta electricidad debe provenir de fuentes renovables.

Hoy en día, la eficiencia de los electrolizadores es aproximadamente del 65%, lo que corresponde a un consumo energético de 51kWh/kg H₂, con una tendencia a bajar con el paso del tiempo a entrono 44kWh/kg H₂. Además, dado su alto costo, se están desarrollando proyectos de producción offshore mediante electrólisis alimentada por parques eólicos marinos, lo que podría reducir costes y facilitar el suministro directo a puertos. [21]

Existen diferentes formas de llevar a cabo la electrólisis, pero los dos más desarrollados son la electrólisis alcalina (AEL) y la de membrana de intercambio de protones (PEM). La AEL es la opción más madurada, convirtiéndola en la más económica en comparación a las otras alternativas. Aun así, la tecnología PEM ofrece una mayor flexibilidad operativa, adaptándose mejor a las fluctuaciones de la generación eléctrica de fuentes renovables, pero tiene mayores costos debido al uso de materiales críticos como el platino o el iridio.

Aunque existen otras formas de producir hidrógeno a través de energías renovables, como el reformado de biogás o procesos termoquímicos, actualmente su madurez tecnológica es muy limitada para implementarse a escala comercial.

En resumen, el hidrógeno tiene un potencial alto para convertirse en el principal combustible sostenible del transporte marítimo, dado su nula emisión de gases contaminantes y su gran poder calorífico. Sin embargo, hoy en día se enfrenta a importantes desafíos relacionados con la producción sostenible, almacenamiento y transporte, entre otros. Por este motivo, se

siguen explorando otras opciones sostenibles, que aprovechan las propiedades del hidrógeno para producir energía de otra forma más estable y manejable, como el amoníaco.

3.1.2.2 Almacenamiento

Uno de los principales retos para usar el hidrógeno como combustible es su almacenamiento. Esto se debe a su baja densidad energética por volumen, de 8,5 MJ/L en estado líquido. Actualmente, para almacenarlo, existen tres métodos principales, el hidrógeno comprimido, el hidrógeno líquido y el hidrógeno criocomprimido. [22]

El hidrógeno comprimido (CGH₂) se almacena a presiones entre 150 y 800 bar. La densidad energética volumétrica del hidrógeno varía al comprimirlo, aumentando de 0,8 kWh/L a 350 bar a hasta 1,4 kWh/L a 800 bar. Se utilizan tanques especializados y resistentes. Para lograr estas presiones, hace falta un aporte energético adicional, que equivale al 9% del contenido energético del hidrógeno para presiones de 350 bar, pudiendo alcanzar en torno al 12% para presiones de 700-800 bar. A pesar de esta disminución de eficiencia, sigue siendo mejor que otros métodos.

El hidrógeno líquido (LH₂) está licuado a -253°C. De esta forma, su densidad energética aumenta a entre 2,3 y 2,6 kWh/L, pero hay que tener en cuenta que hasta un 1% se pierde por evaporación al día. Además, licuarlo implica un consumo energético del 37-45% del contenido energético del hidrógeno. Los tanques necesitan aislamiento al vacío y sistemas de seguridad específicos.

El hidrógeno criocomprimido (CCH₂) combina los dos métodos anteriores, almacenándolo a 300 bar y -235°C se pueden alcanzar densidades parecidas al hidrógeno líquido a temperaturas menos extremas. Esta tecnología está en desarrollo, pero podría representar un equilibrio eficiente entre las dos anteriores.

Tabla 10 - Comparación de los diferentes métodos de almacenamiento [22]

Storage method	Temperature (K)	Pressure (bar)	Gravimetric energy density (kWh/kg)	Volumetric energy density (kWh/L)
CGH ₂	233–300	150–800	39.4	0.8 at 350 bars 1.4 at 800 bars
LH ₂	20–33	1–12.76	39.7	>2.3
CCH ₂	33–77	150–350	39.7	2.6 at 38 K & 300 bar
NH ₃	239–293	1–10	5.27	3.52
CH ₃ OH	Ambient	1	5.55	4.3

3.1.2.3 Aplicación en motores marinos

El hidrógeno se puede emplear como combustible de dos maneras diferentes: motores de combustión interna y pilas de combustible.

Los motores de combustión interna (MCI) pueden funcionar con hidrógeno puro o combinando hidrógeno y diésel. Mientras los motores de hidrógeno puro necesitan ciertas adaptaciones para funcionar, en modo dual se pueden aprovechar motores ya existentes. Todos los MCI de hidrógeno tienen una buena eficiencia térmica, gracias a la alta velocidad de llama que caracteriza al hidrógeno. Sin embargo, el mismo factor y las altas temperaturas de combustión, favorece la formación de NOx. Además, hay que tener en cuenta el riesgo de preignición, que, debido a la baja temperatura de ignición del hidrógeno, se puede dar que el combustible comience a arder de forma espontánea antes de tiempo. [22]

Las pilas de combustible son una de las opciones más prometedoras para usar el hidrógeno en el transporte marítimo. Estas convierten la energía química del hidrógeno en electricidad sin necesidad de combustión. Funcionan de la siguiente manera: las moléculas de hidrógeno entran al ánodo, y, mediante un catalizador, se dividen en protones y electrones. Los protones atraviesan una membrana de intercambio de protones (PEM), y los electrones circulan por un circuito externo, generando una corriente eléctrica. Finalmente, en el cátodo, los protones

y los electrones se combinan junto con el oxígeno del aire y forman agua como único subproducto.

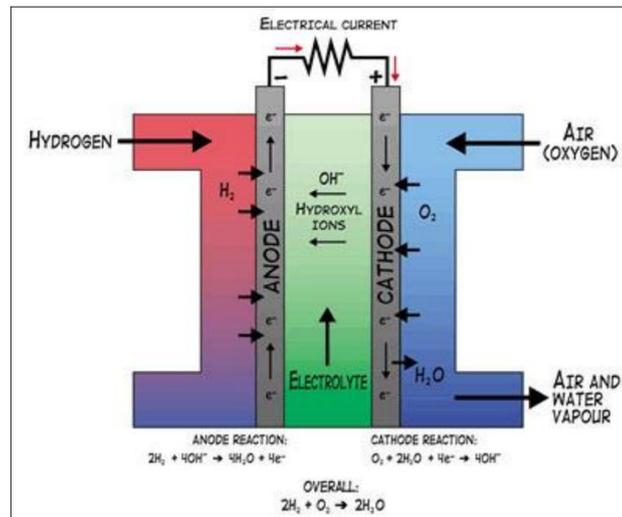


Figura 17- Pila de hidrógeno [23]

Las más utilizadas por el momento son PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) y SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). La primera es la más usada, opera a baja temperatura (por debajo de los 100°C), con una eficiencia eléctrica del 45-55%, con respuesta rápida. Adecuada para aplicaciones de potencia media. Sin embargo, requieren un hidrógeno muy puro y son sensibles a contaminantes como el CO. La segunda opera a temperaturas altas (entre 600 y 1000°C), toleran impurezas en el combustible, aceptando portadores de hidrógeno como el amoníaco o el metanol. Su eficiencia supera el 60%, pero tienen tiempos de arranque largos. [22]

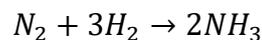
3.1.3 AMONÍACO

El amoníaco (NH₃) es un compuesto químico formado por moléculas de tres átomos de hidrógeno y uno de nitrógeno. Se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente, aunque se puede licuar con relativa facilidad, alcanzando el estado líquido a -33°C, lo que facilita su transporte y almacenamiento. Su densidad energética por volumen es de aproximadamente 11.5 MJ/L, muy inferior a otras fuentes como el metanol o el GNL.

Aunque históricamente se ha utilizado principalmente en la industria de fertilizantes, en los últimos años ha ganado protagonismo como una alternativa prometedora dentro de los combustibles sostenibles para el transporte marítimo. El aumento en el interés por este combustible es debido a que no contiene carbono, por lo que su combustión no genera emisiones directas de CO_2 . Además, como se lleva utilizando años en la industria, ya existe una infraestructura global consolidada para producirlo, almacenarlo y distribuirlo, lo que facilita su adopción en el sector naval. [24]

3.1.3.1 Producción

Tradicionalmente, el amoníaco se obtiene mediante el proceso Haber-Bosch. Este se basa en la combinación del nitrógeno (N_2) presente en el aire con hidrógeno (H_2), cuya producción se explica en el apartado anterior, a alta presión y temperatura, y mediante un catalizador.



Esta reacción necesita consumir mucha energía, y su impacto ambiental depende en gran parte del método utilizado para obtener el hidrógeno. El amoníaco se clasifica según su impacto ambiental, recibiendo el color que proviene de la producción del hidrógeno, es decir, si el hidrógeno se produce a partir de reformado de gas natural (SMR), será amoníaco gris, y si la producción de hidrógeno se basa en energía renovable, recibirá el nombre de amoníaco verde. [24]

Además de las rutas convencionales, basadas en la producción previa de hidrógeno, se están explorando tecnologías emergentes de síntesis directa de amoníaco, como la electrólisis de óxidos sólidos (SOEC) y la síntesis electroquímica directa, que permitirían reducir el consumo energético global del proceso al evitar etapas intermedias. [24]

3.1.3.2 Manejo y almacenamiento

Una de las principales ventajas operativas del amoníaco es su facilidad de almacenamiento. Puede mantenerse en estado líquido a temperaturas moderadas y presiones relativamente bajas. Sin embargo, es una sustancia tóxica y corrosiva, por lo que su manipulación implica

desafíos en cuanto a seguridad, requiriendo materiales resistentes y sistemas de detección de fugas, especialmente en buques. [24]

A pesar de estos riesgos, el amoníaco se lleva transportando décadas como carga, lo que facilita la adopción como combustible.

3.1.3.3 Combustión y emisiones

La combustión del amoníaco no produce CO_2 directamente, pero sí puede producir óxidos de nitrógeno (NO_x) y, en ciertas condiciones, óxido nitroso (N_2O), un gas con un efecto invernadero 273 veces más potente que el CO_2 . Para controlar estas emisiones, existen varias tecnologías en desarrollo de postratamiento, como la Reducción Catalítica Selectiva (SCR), que convierte los NO_x en nitrógeno y vapor de agua o los sistemas de lavado con peróxido de hidrógeno, que permiten reducir las emisiones residuales. [24]

Además, se están investigando estrategias de combustión dual, mezclando amoníaco con hidrógeno o metano para mejorar la reactividad del combustible y reducir las emisiones.

3.1.3.4 Aplicación en motores marinos

Hoy en día no existen motores comerciales que funcionen con amoníaco exclusivamente, pero varios fabricantes están trabajando en prototipos adaptados para este combustible, como MAN Energy Solutions y Wärtsilä, con pruebas exitosas en laboratorios. [24]

Además, se están explorando alternativas basadas en pilas de combustible de óxidos sólidos (SOFC), siendo más eficientes y limpios.

3.1.3.5 Impacto ambiental

Según estimaciones, la adopción del amoníaco como combustible a gran escala, podría reducir las emisiones de toneladas de CO_2 en 470 millones para 2050, haciéndolo una opción muy interesante para descarbonizar el sector marítimo. [24]

Aun así, los riesgos en su manipulación son reales. Un estudio reciente estima que un buque alimentado con amoníaco podría experimentar al menos una fuga durante su vida útil, lo que

hace vital la implementación de sistemas de ventilación, contención y detección de fugas. [25]

3.1.4 METANOL

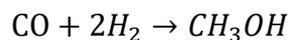
El metanol (CH_3OH) es otra de las alternativas más prometedoras para sustituir los combustibles tradicionales. Hoy en día, está muy disponible y tiene gran variedad de aplicaciones, comúnmente es usada como materia prima para elaborar diferentes productos químicos. En los últimos años ha ganado protagonismo por su potencial para reducir emisiones, y con propiedades clave como ser un fluido a temperatura ambiente, ser compatible con infraestructuras existentes. [29]

3.1.4.1 Producción

Su producción puede realizarse a través de ciertas materias primas, tanto fósiles como renovables. A continuación, se describen las principales tecnologías de producción.

3.1.4.1.1 Metanol gris

Es la vía más común y madura para producir metanol, y se produce a partir de gas natural. Este proceso se divide en dos etapas. La primera se basa en el reformado de gas natural, y es idéntica a la del hidrógeno gris, explicada anteriormente. En la última reacción queda una mezcla de CO, CO_2 y H_2 . Ese es el syngas resultante. En la segunda etapa, este gas se convierte en metanol a través de una reacción catalizada, a presiones entre 5 y 10 MPa y temperaturas de 220 a 275°C:



Este método es el más maduro y utilizado en la industria, con alta eficiencia y fiabilidad, aunque depende de una fuente fósil y genera emisiones significativas de CO_2 .

Existen otras formas de producir metanol, como la gasificación de carbón (metanol marrón), que son menos usadas que la anterior, pero tienen un impacto similar en las emisiones. Por este motivo, el interés actual se centra en alternativas más sostenibles, como el biometanol y el e-metanol, que se analizan a continuación.

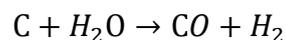
3.1.4.1.2 Biometanol

El biometanol es una forma alternativa que basa su producción en el uso de residuos orgánicos, como desechos agrícolas, forestales o urbanos. El proceso se divide en tres etapas. Inicialmente, la biomasa se somete a un proceso de torrefacción, entre 200 y 300°C, para aumentar su densidad energética.

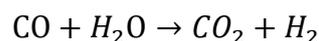


Estos gases volátiles contienen fracciones combustibles (CO, H₂, CH₄) y otros compuestos que requieren una gestión adecuada para no generar emisiones. Generalmente son reformados o eliminados en las etapas siguientes, asegurando un proceso limpio.

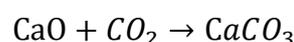
Posteriormente, a altas temperaturas (~700 °C), el carbono se gasifica con vapor de agua. A estas temperaturas, la materia se descompone generalmente en monóxido de carbono CO y H₂.



Para aumentar el porcentaje de H₂ en el syngas, el CO obtenido se vuelve a gasificar, lo que genera también CO₂. Este proceso permite alcanzar contenidos de hidrógeno en el syngas de hasta el 82%. [29]



Con la presencia de un solvente, normalmente óxido de calcio (CaO), se logra capturar el CO₂:

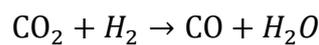


Finalmente se purifica y se convierte en metanol mediante el método convencional, de combinar el hidrógeno y el monóxido de carbono.

Para reducir costes de producción, se plantea integrar este proceso con otras industrias para aprovechar el calor, reduciéndose así hasta un 35%. [29]

3.1.4.1.3 E-metanol

El e-metanol se obtiene mezclando el CO_2 capturado, ya sea de gases industriales o del aire, con hidrógeno, producido de forma limpia a través de electrólisis con energía renovable; quedando así la reacción:



Como en el biometano, el monóxido de carbono se vuelve a gasificar mediante la misma reacción.

3.1.4.1.4 Comparativa según la ruta de producción

Tabla 11 - Comparación del metanol según ruta de producción

Tipo de metanol	Materia prima
Metanol gris	Gas natural
Metanol marrón	Carbón
Biometanol	Biomasa
E-metanol	CO ₂ +H ₂ verde

3.1.4.2 Manejo y almacenamiento

Una de las principales ventajas de este combustible es que es líquido a temperatura y presión ambiente, simplificando significativamente su almacenamiento y manipulación a bordo. Se podría adaptar fácilmente a la infraestructura ya existente de combustibles tradicionales líquidos.

En cuanto a la seguridad, requeriría sistemas de ventilación adecuados y recubrimientos compatibles en los tanques, por su baja temperatura de inflamación (12°C). Además, en caso de derrame, se disuelve completamente en agua y es biodegradable, lo que reduce significativamente su impacto ambiental en comparación con los combustibles tradicionales.

3.1.4.3 Combustión y emisiones

El metanol es un combustible limpio: no contiene azufre, lo que elimina las emisiones de SO_x; no tiene enlaces carbono-carbono, eliminando prácticamente las partículas (PM) durante su combustión (pág. 76); menor formación de NO_x, es más, según ciertas pruebas realizadas por MAN Energy Solutions, mezclar metanol con un 25-40% de agua permite reducir las emisiones de NO_x lo suficiente para no necesitar sistemas de postratamiento. (pág. 85).

3.1.4.4 Aplicación en motores marinos

El metanol es un combustible alternativo que puede utilizarse en motores marinos mediante tecnologías dual-fuel, donde se combina con diésel para facilitar la combustión. De esta manera, no hacen falta grandes modificaciones estructurales.

A día de hoy, varios fabricantes de motores han desarrollado versiones compatibles con metanol, es más, y ya existen buques comerciales que operan utilizando este combustible, lo que demuestra su viabilidad y utilidad en la industria naval.

3.1.4.5 Impacto ambiental

El metanol destaca por su bajo impacto ambiental, ya sea en operación como por derrame. Su combustión no genera SO_x ni partículas, y las emisiones de NO_x y CO₂ se pueden reducir

significativamente. En caso de derrame, en términos de toxicidad acuática, para causar el mismo daño que el HFO, se tendrían que derramar 200 veces más metanol. (pág. 85).

Dependiendo de la forma de producir el metanol, las emisiones de CO_2 en comparación con combustibles fósiles se pueden reducir entre un 56% y un 95%. Además, si se produce a través de fuentes renovables, puede considerarse neutro en carbono. (pág. 82).

3.2 MEJORAS DE DISEÑO HIDRODINÁMICO

El diseño hidrodinámico de un buque es uno de los factores más determinantes en su comportamiento operativo, su eficiencia energética y su impacto ambiental. Desde el punto de vista de la ingeniería naval, la hidrodinámica estudia la interacción entre el casco del barco, las hélices y otras partes de la embarcación con el fluido que lo rodea, analizando la resistencia al avance, la estabilidad, la maniobrabilidad y el consumo energético.

Para lograr una transición energética y descarbonizar el sector marítimo, optimizar la forma hidrodinámica de los buques ha pasado de ser un tema totalmente secundario a una parte central del diseño. Al reducir la resistencia al avance, se reduce la potencia propulsora necesaria, y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este capítulo se analizará, en primer lugar, la eficiencia de los buques tradicionales y sus limitaciones. Después se estudiarán diversos tipos de diseños alternativos orientados a mejorar la eficiencia hidrodinámica, como el uso de cascos multicascos, proas de bulbo, sistemas de sustentación (foil) o el uso de propulsión complementaria por viento. Por último, se analizará un caso comparativo para evaluar el impacto real de estas soluciones en la sostenibilidad del sector.

3.2.1 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS CLAVE

Para llevar a cabo dicho análisis, es fundamental estudiar los diferentes coeficientes hidrodinámicos que describen las proporciones y formas características del casco [29]:

- El coeficiente de bloque (C_b): relaciona el desplazamiento respecto al volumen del buque. Por un lado, un C_b alto indica un casco de un buque menos hidrodinámico y más robusto, soporta más carga. Por otro lado, un C_b bajo corresponde a cascos más eficientes para altas velocidades.

$$C_b = \frac{V}{L * B * T}$$

- El coeficiente prismático (C_p): relaciona el volumen del casco con el volumen que tendría el área máxima transversal con esa longitud, influye en la distribución de volumen y en la resistencia por formación de olas.
- El coeficiente de sección medio (C_m): es el cociente entre el área transversal real y el área rectangular definida por la manga y el calado. Sirve para evaluar la forma del casco en sección transversal.
- Coeficiente de flotación (C_w): relaciona la fuerza de flotación del buque con el peso, para asegurar una flotabilidad y estabilidad óptima.
- Número de Froude (Fr): es un número adimensional que relaciona la velocidad del buque con la eslora. Es clave para determinar el régimen de formación de olas y el tipo de resistencia predominante.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * L}}$$

- Número de Reynolds (Re): indica el régimen del flujo en la capa límite alrededor del casco, laminar o turbulento. Es fundamental para el cálculo del coeficiente de fricción.

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

3.2.2 MEJORAS HIDRODINÁMICAS APLICABLES A CASCOS CONVENCIONALES

3.2.2.1 Proas bulbosas

La proa bulbosa es una prolongación esférica o elipsoidal situada en la parte inferior de la proa de un buque, por debajo de la línea de flotación. La función principal es modificar el patrón de olas que se genera en el casco, con el objetivo de minimizar la resistencia al avance, mejorando la eficiencia propulsiva y reduciendo el consumo de combustible.

Desde el punto de vista del diseño, la proa bulbosa genera un sistema de olas propio que, ajustando ciertos parámetros, se diseña para que su sistema de olas esté en contrafase respecto al generado por el casco. Esta interferencia reduce notablemente la amplitud de la ola resultante, disminuyendo la resistencia por formación de olas, una de las principales componentes de la resistencia total al navegar a alta velocidad. Se muestra en la imagen a continuación:

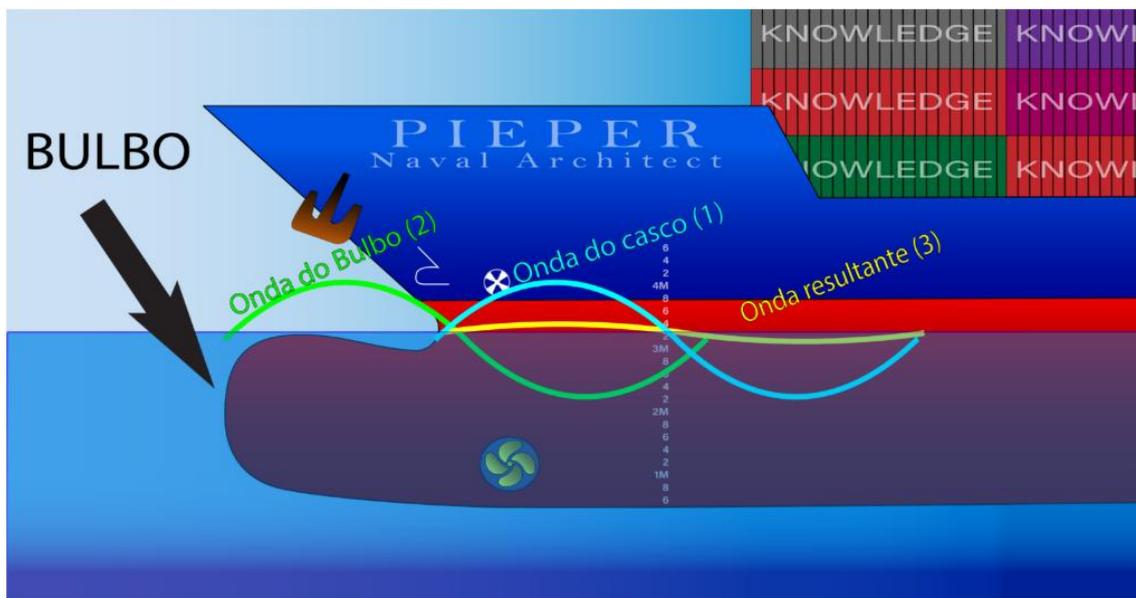


Figura 18 - Efecto del bulbo [26]

Para lograr un diseño óptimo, se necesita estudiar y seleccionar adecuadamente ciertos parámetros, entre los más importantes se encuentran:

- C_{zb} : coeficiente que relaciona la altura del centro del bulbo (Z_b) respecto a la línea base con el calado del buque.
- C_{abt} : coeficiente que indica el área de la sección transversal máxima del bulbo (A_{bt}) con el producto entre la manga y el calado.
- C_{lpr} : longitud del bulbo (L_{pr}) entre la longitud total del buque.

Estas medidas se ven gráficamente en la imagen a continuación:

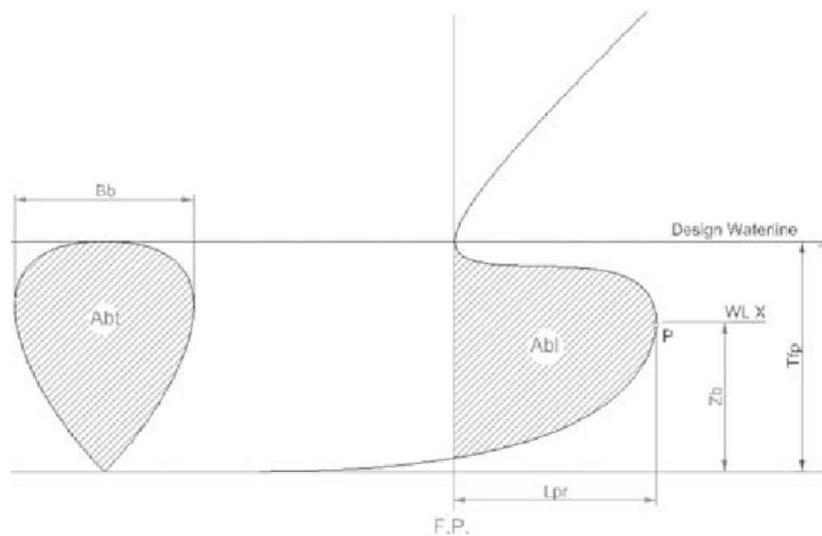


Figura 19 - Medidas características de un bulbo [27]

Resultados cuantitativos en buques reales

En ciertos casos, la incorporación de una proa bulbosa puede reducir la resistencia total hasta un 8,5%, como se estudió sobre un portacontenedores de 200.000 DWT, a velocidad de servicio (25 nudos), disminuyendo la potencia propulsiva requerida un cerca de 6,5MW. [28]

Los coeficientes de fricción C_f se mantuvieron constantes en torno a 1.44×10^{-3} , mientras que el coeficiente de resistencia de forma C_r se redujo de 3.14×10^{-3} a 2.61×10^{-3} con la implementación del bulbo.

A su vez, simulaciones CFD confirmaron estos resultados. En condiciones de ola regular de frente (altura de ola de 0,02m) el coeficiente de resistencia total (C_t) se redujo $6,44 \cdot 10^{-2}$ a $5,59 \cdot 10^{-2}$, es decir, una reducción del 13% de la resistencia total y un 48% de la resistencia por olas exclusivamente. [29]

En conclusión, las proas bulbosas son una solución hidrodinámica eficaz para reducir la resistencia de forma en buques convencionales, especialmente los que operan a velocidades medias-altas.

3.2.2.2 Propulsión asistida por viento, Rotor Sails

Los Rotor Sails, también conocidos como velas rotatoria o Flettner rotors, son una de las soluciones más prometedoras para reducir el consumo de combustible mediante una propulsión híbrida. Esta tecnología aprovecha el efecto Magnus, un fenómeno físico que genera una fuerza de sustentación perpendicular al flujo de aire cuando un cilindro gira en presencia de viento aparente.

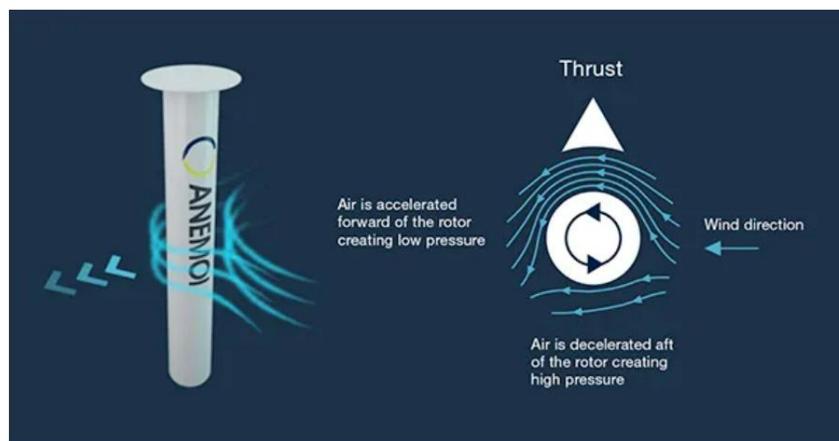


Figura 20 - Funcionamiento de los Rotor Sails [30]

Los rotors sails son cilindros verticales que giran mediante motores eléctricos. Cuando el viento aparente incide sobre el cilindro en rotación, se genera una diferencia de velocidades del fluido, y, por ende, una diferencia de presión entre los lados del cilindro y aparece una fuerza de empuje transversal que contribuye a la propulsión del buque. Esta fuerza depende

del tamaño y velocidad de rotación, pero puede alcanzar fuerzas de hasta 385kN por rotor [31].

La eficiencia de estas tecnologías depende de varios factores importantes, en la tabla X se resumen según sean ambientales, del buque o comerciales.

Tabla 12 - Factores que influyen la eficiencia operativa de las tecnologías asistidas por viento [32]

Influence factors	Environment factors	Ship factors	Commercial factors
1	Air velocity	Route optimization	Trade route
2	Wave	The captain's command of the source	Travel time
3	Seasonal climate change	Crew training	Port demand

Ahorro energético

El uso de esta tecnología genera ahorros de combustible de 5-23%, dependiendo de factores como el tipo de buque, la configuración o las condiciones meteorológicas.

Algunos ejemplos de sus aplicaciones reales, siguiendo rutas comerciales globales típicas basadas en datos AIS:

Tabla 13 - Datos experimentales de aplicaciones de Rotor Sails de ahorro de combustible [32]

Parámetros de los rotores	Tipo de buque	Ahorro de combustible
2 Rotor Sails (22m*3m)	5k DWT	5-7%
3 Rotor Sails (48m*6m)	90k DWT	9-13%
2 Rotor Sails (24m*3,5m)	Granelero de 7k DWT	5-7%

2 Rotor Sails (48m*6m)	Granelero de 90k DWT	17-23%
---------------------------	-------------------------	--------

El rendimiento de los Rotor Sails tiene gran dependencia en el viento aparente y la velocidad del buque. Si el viento incide de forma lateral, el empuje generado es máximo, mientras que vientos de proa o popa tienen un efecto mínimo de empuje. Por ello, se valora la opción de incorporar sistemas de optimización de la ruta, ajustando el trayecto según las previsiones meteorológicas para maximizar el beneficio energético.

Además, los rotores se deben diseñar de forma precisa para maximizar el ahorro energético sin comprometer la estabilidad del buque.

Para incorporar esta tecnología, hay que tener en cuenta las otras fuerzas que actúan sobre el sistema. Además de la fuerza útil, llamada fuerza de empuje (Thrust, T) y orientada en la dirección de avance, surge una resistencia adicional, la fuerza de escora (Heel force, H), perpendicular al avance, que genera momentos de escora y puede aumentar la resistencia.

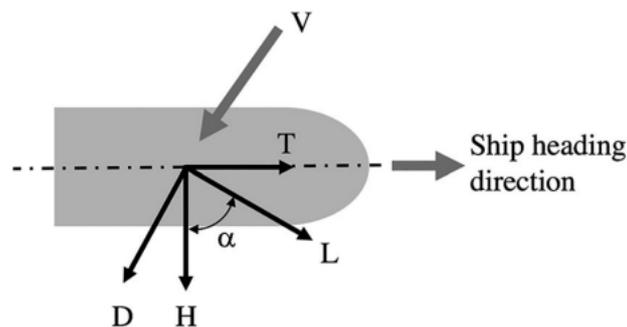


Figura 21 - Esquema de fuerzas y velocidad de viento aparente [33]

Implementación

Estas fuerzas se calculan a partir de coeficientes aerodinámicos de sustentación (lift, Cl) y resistencia (drag, Cd), que dependen del ángulo del viento aparente. Estos coeficientes se

descomponen en los ejes principales de T y H, como coeficiente de empuje (C_t) y coeficiente de escora (C_h):

$$C_T = C_L * \sin \alpha - C_D * \cos \alpha$$

$$C_H = C_L * \cos \alpha - C_D * \sin \alpha$$

La Figura 22 - Diagrama polar del coeficiente de empuje (C_t) vs. la dirección del viento aparente Figura 23 - Coeficiente de escora (C_h) vs. dirección del viento aparente, muestran la evolución de los coeficientes en función del ángulo del viento aparente. Se estudia para un rotor con medidas de referencia (18m de altura, 3m de diámetro, girando a 600rpm). [33]

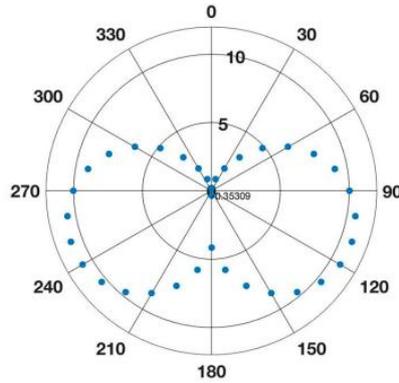


Figura 22 - Diagrama polar del coeficiente de empuje (C_t) vs. la dirección del viento aparente [33]

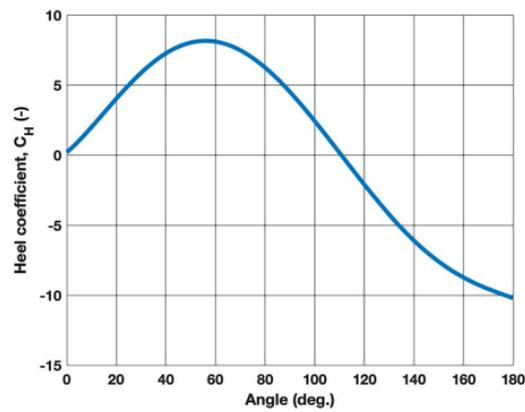


Figura 23 - Coeficiente de escora (C_h) vs. dirección del viento aparente [33]

Las fuerzas de thrust y de heel dependen de sus respectivos coeficientes, de la velocidad del viento aparente (V), la densidad del aire (ρ) y el área de la vela (S):

$$T = C_T * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S$$

$$H = C_H * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S$$

El diagrama polar permite concluir que ambos coeficientes, y por tanto, el thrust y el heel force, alcanzan su valor máximo con el viento lateral, cuando incide en torno a 90°. Esto implica que, para sacar el mayor rendimiento a esta tecnología, se necesita un diseño óptimo

de los rotores que generen la mayor fuerza propulsiva, pero que aseguren estabilidad y mantengan controlado el aumento de resistencia por escora.

En conclusión, la asistencia eólica mediante Rotor Sails es una tecnología madura y muy útil para ayudar a descarbonizar el sector. Su aplicación en buques convencionales puede reducir notablemente el consumo de combustible, ofreciendo beneficios tanto económicos como ambientales.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

El transporte marítimo internacional se encuentra en plena transición hacia un modelo más sostenible, impulsado por la creciente presión regulatoria y social para reducir su huella ambiental. Normativas como el EEDI, el EEXI o el CII, promovidas por la Organización Marítima Internacional (OMI), así como iniciativas regionales como el Pacto Verde Europeo, están transformando las exigencias de diseño y operación de los buques. Sin embargo, la adaptación del sector a estos nuevos requisitos plantea importantes desafíos técnicos, económicos y logísticos.

En este contexto, el presente trabajo cobra sentido al plantear un análisis comparativo y cuantitativo del impacto real que pueden tener distintas estrategias de mejora sobre un buque portacontenedores representativo. A diferencia de otros estudios centrados en una única solución, este proyecto propone combinar tecnologías como combustibles alternativos, innovaciones hidrodinámicas y sistemas de propulsión asistida por viento. Esta aproximación permite encontrar configuraciones óptimas que logren reducir emisiones sin comprometer la viabilidad técnica y económica de la operación.

4.2 OBJETIVOS

4.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto técnico, ambiental y económico de diversas estrategias de mejora de la sostenibilidad aplicadas a un buque portacontenedores de referencia, en el marco de las regulaciones internacionales actuales.

4.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar un buque de referencia y calcular su rendimiento energético y emisiones en un escenario base.
- Analizar los efectos de combustibles alternativos, como el metanol y el gas natural licuado (LNG), sobre la eficiencia operativa y las emisiones.
- Estudiar el impacto de mejoras hidrodinámicas, incluyendo un bulbo de proa optimizado y un sistema de lubricación por aire.
- Evaluar el rendimiento de tecnologías de asistencia eólica, como los rotores Flettner, en diferentes rutas marítimas.
- Comparar los distintos escenarios en términos de emisiones contaminantes, índice EEDI, inversión inicial, costes operativos y retorno económico.

4.3 *METODOLOGÍA*

El enfoque metodológico adoptado se articula en cinco fases principales:

- Revisión normativa y bibliográfica: se realiza un análisis de las normativas internacionales vigentes y de las tecnologías emergentes que se están incorporando para solucionar este problema.
- Estudio técnico del buque base: se selecciona un portacontenedores representativo de tamaño medio, sobre el cual se calculan parámetros hidrodinámicos clave, resistencia al avance, potencia propulsiva requerida y emisiones en condiciones operativas estándar. Esta es la base comparativa del estudio.
- Simulación de escenarios alternativos: se diseñan distintos escenarios tecnológicos y se estiman el rendimiento energético, la reducción de emisiones, y el coste de instalación de la tecnología.
- Evaluación comparativa de los resultados: se comparan los distintos resultados obtenidos en cada escenario, desde puntos de vista tanto ambientales como económicos.

- **Análisis de viabilidad:** se identifican las combinaciones tecnológicas más eficientes y viables.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

5.1 ELECCIÓN DEL BUQUE DE REFERENCIA

Para llevar a cabo el análisis comparativo de la eficiencia energética y las emisiones, se ha seleccionado como caso base un buque portacontenedores de tamaño medio.

La elección de este buque se basa en que el portacontenedores es uno de los más usados y con mayor volumen de tráfico a nivel mundial. En él recae una parte significativa del consumo de combustible del transporte oceánico total.

Además, existe gran variedad de estudios técnicos y bases de datos que documentan con precisión las características operativas del buque, así como consumos y emisiones típicas, lo que permite desarrollar un análisis riguroso y sólido como base de las comparativas posteriores. Asimismo, estos buques funcionan con rutas regulares establecidas, con tiempos prolongados a velocidad de servicio continua, lo que lo hace idóneo para evaluar el impacto que diferentes estrategias de mejora tendrían en el consumo, como el uso de combustibles alternativos, la optimización hidrodinámica del casco o la incorporación de sistemas de propulsión secundarios.

Por estos motivos, se ha escogido el buque portacontenedores como referencia base, al considerarse representativo y adecuado para la comparación de las distintas innovaciones que se estudiarán a continuación en los apartados siguientes de este capítulo.

A continuación, se resumen las principales características estructurales y operativas del buque seleccionado, que servirán como base para los cálculos técnicos desarrollados en los siguientes apartados.

Parámetro	Valor	Unidad
-----------	-------	--------

Eslora (L)	294	m
Manga (B)	32	m
Calado (T)	12	m
Capacidad nominal	5.000	TEU
Peso muerto (DWT)	70.000	Toneladas
Velocidad de servicio	20	nudos

Para cuantificar la capacidad de carga en un buque portacontenedores, se suele usar la medida de TEU (Twenty-foot Equivalent Unit), unidad estándar que representa el espacio ocupado por un contenedor de 20 pies. Es decir, un buque de 5.000 TEU puede transportar hasta 5.000 contenedores de 20 pies. Se ha escogido esta capacidad nominal por el siguiente motivo: este tamaño corresponde a un buque portacontenedores intermedio, muy común tanto en rutas transoceánicas como en servicios de conexión de medio alcance. Esto hace que este muy documentada, permitiendo obtener referencias fiables para los valores requeridos para realizar los cálculos.

A partir de esta capacidad nominal de referencia, se han escogido las otras dimensiones características basándose en las proporciones típicas de este tipo de buques: una eslora de 294 metros, una manga de 32 y un calado de 12. El peso muerto (DWT) se ha estimado en 70.000 toneladas, ya que el valor DWT promedio de portacontenedores entre 5.000-7.999 TEU es de 80.503, al estar en el límite inferior, se ha escogido un valor menor. [35]

Estos valores constituyen la base de los cálculos que se desarrollarán en los apartados siguientes, tanto para el escenario base como para las distintas alternativas tecnológicas consideradas. Todos los cálculos se realizan bajo condiciones estándar de diseño y navegación: velocidad de servicio constante, mar en calma, y la carga correspondiente al

peso muerto máximo (DWT). Se parte +de los parámetros estructurales del buque detallados en el apartado anterior y se incorporan progresivamente los parámetros derivados.

5.2 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL AL AVANCE (R_t)

La resistencia total al avance es la fuerza hidrodinámica que se opone al movimiento del buque por el agua. Es un parámetro crucial, directamente relacionado con la potencia propulsiva necesaria del buque, y, por tanto, el consumo de combustible y las emisiones generadas.

La resistencia total al avance es la suma resultante de diferentes componentes:

$$R_t = R_f + R_w + R_b + R_a + R_{otros}$$

Donde R_f representa la resistencia por fricción, es decir, el rozamiento del agua sobre el casco; R_w representa la resistencia por formación de olas, causada por la energía que se pierde para formar las olas alrededor del casco; R_b es la resistencia de forma, asociadas a las pérdidas de presión debido a la geometría del buque; R_a es la resistencia por aire, provocada por la obra muerta del buque; y R_{otros} resistencias adicionales, como inducida por apéndices, por mala mar o vibraciones.

Sin embargo, en estudios preliminares es común adoptar una formulación más simplificada. Todas las componentes, excepto la resistencia por fricción, se agrupan bajo un término residual:

$$R_t = R_f + R_r$$

Esta simplificación permite desarrollar estimaciones razonablemente precisas partiendo de las dimensiones principales del buque, sin necesidad de simulaciones CFD o ensayos en canal.

La resistencia por fricción viscosa se calcula a partir de los valores de superficie mojada, velocidad del buque y el coeficiente de fricción:

$$R_f = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_f$$

La resistencia residual, formada por la suma de todas las componentes de efectos no viscosos, se expresa simplificada como:

$$R_r = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_r$$

Sacando factor común, la resistencia total queda finalmente expresada así:

$$R_t = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * (C_f + C_r)$$

A continuación, se procede al cálculo de cada uno de los parámetros que intervienen en la resistencia total.

5.2.1 SUPERFICIE MOJADA DEL CASCO (S)

La superficie mojada (S) es el área del casco en contacto directo con el agua, es decir, el área de la obra viva. Este parámetro está directamente relacionado con la resistencia del buque.

Para su estimación, en fases de diseño preliminar se aproxima mediante la siguiente fórmula [36]:

$$S = L * (2 * T + B) * \sqrt{C_b} * k$$

El coeficiente de bloque (C_b) es un parámetro adimensional que relaciona el volumen del buque sumergido con el volumen del prisma rectangular formado por la eslora, la manga y el calado.

$$C_b = \frac{V}{L * B * T}$$

Donde L, B y T representan las medidas estructurales del buque, y V el volumen de desplazamiento, es decir, el volumen de agua que desplaza el buque al avanzar, medido en metros cúbicos.

El volumen de desplazamiento (V) se puede calcular con relación al desplazamiento total (A):

$$A = \rho * V$$

El valor de A se aproxima en base al DWT y la relación entre desplazamiento total y peso en rosca (lightweight). El peso en rosca es el peso del buque completamente equipado pero vacío de carga, combustible, provisiones, tripulación...

Kristensen (2012) y Lutzen & Kristensen (2013) [37] Por este motivo:

$$\frac{A-lightweight}{A} = \frac{DWT}{A} = (1-0,25)=0,75;$$

$$A = \frac{70.000}{0,75} = 93.333 t;$$

Para buques mercantes, el peso en rosca se calcula de la siguiente manera:

$$Lightweight = Clw \cdot L \cdot B \cdot D$$

Siendo el Clw un coeficiente empírico, que, para buques similares, tipo Panamax, es de 0,103. El resto de los valores son estructurales del barco. La D, es la distancia desde la quilla hasta la cubierta principal, que se puede estimar como un 1,5 del calado. Por tanto:

$$Lightweight = 0,103 * 294 * 32 * 1,5 * 12 = 17.442t$$

Siendo la densidad de agua de mar: $\rho \approx 1,025t/m^3$.

$$V = \frac{93.333}{1,025} = 91.056,6$$

Por tanto:

$$C_b = \frac{91.056,6}{294 * 32 * 12} = 0,807$$

Coefficiente K

El coeficiente K, conocido como factor empírico de corrección, es un parámetro sin dimensión. Este coeficiente ajusta el valor calculado teniendo en cuenta aspectos geométricos y constructivos no contemplados en los parámetros principales. El valor de k depende del tipo de buque y si se incluyen o no los apéndices (timón, bulbo...). En estudios más detallados, este se obtiene a través de CFDs o pruebas empíricas. El rango típico recomendado para estudios preliminares es entre 0,85 y 0,95. En el caso de estudio, se empleará un valor de k de 0,95 [36], coherente para un buque portacontenedores moderno sin apéndices.

Finalmente, la expresión de la superficie mojada se ve así:

$$S = L * (2 * T + B) * \sqrt{C_b} * k = 294 * (2 * 12 + 32) * \sqrt{0,807} * 0,95 = 14.051 m^2$$

5.2.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN (C_f)

El coeficiente de fricción es un parámetro adimensional que representa la fricción generada entre el casco del buque y el agua. Se calcula usando la fórmula empírica del ITTC-1957 (International Towing Tank Conference), que depende del número de Reynolds (Re):

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2}$$

El número de Reynolds (Re)

Es fundamental para obtener el coeficiente de fricción, ya que indica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas del fluido.

Siendo V la velocidad del buque, L la eslora y ν la viscosidad cinemática del agua, que depende de la temperatura. Para agua de mar a 15°C (temperatura media del océano Atlántico), se toma el valor medio según ITTC:

$$\nu = 1,19 * 10^{-6} m^2/s$$

Además, la velocidad de servicio del buque es de 20 nudos. Dado que un nudo son 0,5144 m/s, la velocidad, en metros por segundos:

$$V = 20 * 0,5133 = 10,29 m/s$$

Por lo tanto:

$$Re = \frac{V * L}{\nu} = \frac{10,29 * 294}{1,19 * 10^{-6}} = 2,54 * 10^9$$

Volviendo al cálculo de C_f , queda así:

$$(\log_{10}(2,54 * 10^9)) \approx 9,40;$$

$$C_f = \frac{0,075}{(9,40 - 2)^2} \approx 0,00137$$

5.2.3 COEFICIENTE RESIDUAL (C_r)

El coeficiente residual representa la parte de la resistencia total que no se explica por la fricción del agua sobre el casco, abarcando, entre otras, la resistencia por generación de olas, la resistencia de forma, la inducida por apéndices, la aerodinámica...

El valor de C_r aumenta proporcionalmente al volumen del casco, debido principalmente a la mayor resistencia de forma y generación de ola. Para buques con cascos más finos, típicamente se estima en 0,0017. En el caso de estudio, el portacontenedores tiene un casco más voluminoso, con un coeficiente de bloque (C_b) mayor que 0,8, se aproxima el coeficiente de bloque a 0,002.

Una vez evaluadas todas las componentes principales de la resistencia al avance, se obtiene una resistencia total para el buque portacontenedores de:

$$R_t = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * (C_f + C_r) = \frac{1}{2} * 1.025 * 10,29^2 * 14.051 * (0,00137 + 0,002) \\ = 2.569,6 \text{ kN} \approx 2,57 \text{ MN}$$

La resistencia total se encuentra dentro de los valores típicos para estos casos, en el rango de 2-3 MN.

De la resistencia total, la resistencia generada por la fricción es de 1,04 MN (40,6%), mientras que la de residual, es decir, no friccional, es de 1,52 MN (59,4%). Por tanto, se puede concluir que la mayor parte de la resistencia que enfrenta el buque proviene de fenómenos no relacionados con el rozamiento superficial del agua.

Aunque en la mayoría de los casos la resistencia residual representa en torno a un 40% de la resistencia total, en el presente estudio alcanza un 59,4% del total. Esto se debe a la geometría del buque y la alta velocidad de servicio, que aumentan significativamente la resistencia de forma y de olas.

5.3 ESCENARIO BASE

En este apartado se analiza la potencia que tiene que generar un motor para lograr vencer la resistencia total e imponer la velocidad establecida. Se estudiará el rendimiento en cada fase de un motor de HFO, con el fin de conocer la cantidad de combustible que necesita el motor para generar la potencia necesaria.

Este caso será la base del análisis comparativo de este capítulo.

5.3.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA

En este apartado se estudia la potencia que tiene que transmitir el motor, analizando el efecto e importancia de las eficiencias en los diferentes procesos de funcionamiento del motor.

Potencia efectiva efectiva (P_e)

La potencia efectiva es la cantidad de potencia que necesita el buque para vencer a la resistencia total y lograr la velocidad de servicio de forma constante, en condiciones ideales. Esta potencia es la energía útil transferida por el sistema de propulsión como final del ciclo, es decir, transferida al agua y transformada en velocidad.

Se define mediante la siguiente expresión:

$$P_e = R_t * V$$

Por los cálculos del apartado anterior:

$$R_t = 2,57MN; V = 10,29m/s;$$

$$P_e = 2,57 * 10^6 * 10,29 \approx 26,45MW$$

Potencia entregada al eje de hélice (P_{eje})

Una vez conocida la potencia efectiva, el siguiente paso es determinar cuanta potencia necesita transmitir el motor al eje de la hélice para que, tras las pérdidas hidrodinámicas del sistema propulsivo, se genere la energía útil necesaria.

$$P_{eje} = \frac{P_e}{\eta_d}$$

La eficiencia propulsiva total (η_d) se define como el producto entre tres eficiencias individuales, la eficiencia del casco (η_h), la eficiencia de hélice en agua abierta (η_o) y la eficiencia rotacional relativa (η_r).

$$\eta_d = \eta_h * \eta_o * \eta_r$$

Para obtener estos datos de eficiencia, hace falta recurrir a CFDs o ensayos en tanque. En este caso, se han estimado los porcentajes mediante valores típicos para portacontenedores con hélice convencional de paso fijo, recogidos en manuales técnicos. [36]

$$\eta_d = \eta_h * \eta_o * \eta_r = 0,97 \cdot 0,65 \cdot 1,03 = 0,648$$

Por tanto, el cálculo de la potencia en el eje es así:

$$P_{eje} = \frac{26,45MW}{0,648} = 40,82MW$$

Elección del sistema propulsivo

Para el escenario base de este análisis se ha seleccionado un sistema de propulsión convencional habitual en buques portacontenedores de tamaño medio, el motor diésel marino de dos tiempos y baja velocidad.

No se ha logrado encontrar información detallada de eficiencias específicas para un motor suficientemente potente como para transferir la potencia necesaria al eje. Como referencia, se utilizará el motor MAN B&W 6S50MC, ampliamente instalado en buques portacontenedores de tamaño medio, entre 4000 y 6000 TEU, aun siendo su potencia menor,

para analizar la pérdida de eficiencia del motor en el proceso de combustión. Su elección permite disponer de datos técnicos fiables y presentes en muchos estudios.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los parámetros y eficiencias clave que se emplearán para los siguientes cálculos. La explicación de cada uno se realizará a continuación.

Antes de continuar: en la documentación técnica del motor, el término “potencia efectiva” hace referencia a la potencia que llega al eje del motor. En este trabajo, sin embargo, se utiliza el término de “potencia efectiva” para referirse a la potencia útil se transfiere al agua, para lograr mantener una velocidad constante venciendo la resistencia total. En resumen, lo que el fabricante denomina “potencia efectiva” se corresponde aquí con potencia en el eje (Ph), siguiendo la terminología usada en muchos textos técnicos navales.

Tabla 14 - Datos específicos del motor MAN B&W 6S50MC [38]

Carga del motor (% MCR)	Potencia efectiva (kW)	Eficiencia mecánica (%)	Eficiencia indicada (%)	Eficiencia efectiva (%)	Consumo específico (g/kWh)
25%	2142	89,21	50,67	45,21	186,83
50%	4099	93,03	52,23	48,61	173,99
75%	6160	93,61	52,70	49,34	171,18
93,5%	7667	93,84	52,38	48,38	172,0
100%	8182	94,52	51,16	48,36	174,66

Todos los valores están en base al MCR (Maximum Continuous Rating), que es la potencia máxima continua a la que un motor puede trabajar de manera segura y eficiente.

Potencia indicada (P_i)

La potencia indicada es toda la energía obtenida tras la combustión, antes de sufrir las pérdidas por fricción y transmisión mecánica al eje, es decir, la potencia desarrollada dentro de los cilindros del motor. Su valor depende directamente de la eficiencia mecánica del motor:

$$P_i = \frac{P_{eje}}{\eta_{mec}}$$

Siguiendo la Tabla 14 - Datos específicos del motor MAN B&W 6S50MC , y considerando una carga del 75% MCR, el valor de la eficiencia mecánica es de:

$$P_{eje} = 40,82MW; \eta_{mec} = 94,52\%;$$

$$P_i = \frac{40,82MW}{0,9452} = 43,19MW$$

Energía útil del combustible

El siguiente paso es calcular la energía contenida en el combustible que se transforma en trabajo mecánico dentro de los cilindros.

Este valor se obtiene a partir de la potencia y la eficiencia indicadas del motor:

$$P_{comb} = \frac{P_i}{\eta_{ind}}$$

Siendo:

$$P_i = 43,19MW; \eta_{ind} = 51,16\%$$

$$P_{comb} = \frac{P_i 43,19MW}{0,5116} = 84,42MW$$

Consumo de combustible

Una vez obtenida la potencia que proviene del combustible, para calcular el consumo de combustible del motor, hace falta previamente calcular el flujo másico de combustible (\dot{m}_f), que mide la cantidad de combustible consumido por hora.

Para obtener el flujo másico, es necesario conocer el Poder Calorífico Inferior (PCI) del combustible. El PCI representa la cantidad de energía útil liberada al quemar un kilogramo de combustible, se mide en kilojulios por kilogramo (kJ/kg). Además, se multiplica por 3600 para pasar de kilovatios a energía consumida por hora en kilojulios (3600s/h). [39]

$$\dot{m}_f = P_{comb} * \frac{3600}{PCI};$$

$$P_{comb} = 84,42MW; PCI_{HFO} = 42400kJ/kg;$$

Por tanto:

$$\dot{m}_f = 84,42MW * \frac{3600}{42400} = 7164,19kg/h$$

Es flujo másico calculado representa el consumo de combustible por hora para generar la potencia indicada.

Para evaluar la eficiencia del motor, con este dato se puede calcular el consumo específico de combustible (SFOC), que relaciona la cantidad de combustible consumida con la potencia entregada al eje por unidad de tiempo, se mide en g/kWh:

$$SFOC = \frac{\dot{m}_f}{P_{eje}}$$

Con los valores obtenidos anteriormente:

$$\dot{m}_f = 7164,19 \text{ kg/h}; P_{eje} = 40,82 \text{ MW};$$

$$SFOC = \frac{7164,19 \text{ kg/h}}{40,82 \text{ MW}} = 175,5 \text{ g/kWh}$$

A continuación, se presenta un diagrama de Sankey que resume el flujo energético desde el combustible hasta la potencia útil transferida al agua, indicando las principales pérdidas en cada etapa:

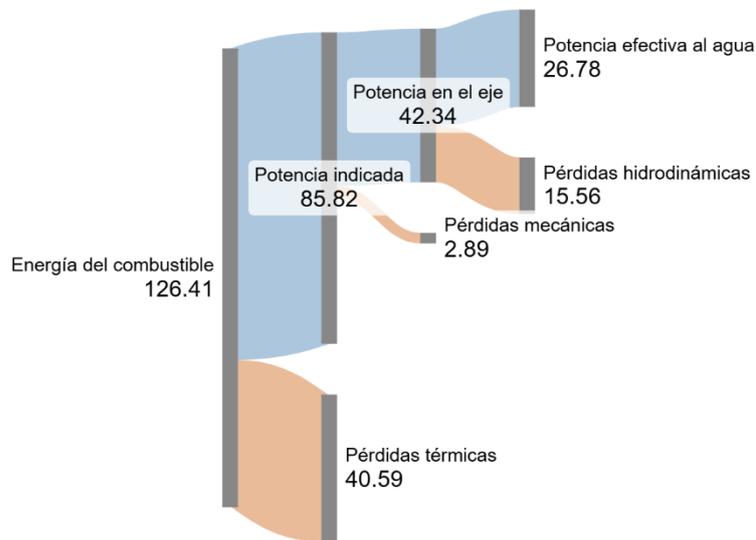


Figura 24 - Diagrama de Sankey de eficiencia interna del motor

La eficiencia total del motor estudiado es de 33,48% hasta el eje del motor. Y solamente el 21,19% de la energía que aporta el combustible se transforma finalmente en movimiento.

En este trabajo, el SFOC calculado para el motor seleccionado es aproximadamente 175,5 g/kWh, ligeramente superior al rango típico. Esta diferencia puede deberse a las condiciones

específicas del buque y a la extrapolación de datos desde un motor con potencia nominal inferior.

Para reducir el error de las estimaciones anteriores, se sustituye el valor del SFOC calculado por el de un motor adecuado para dar la potencia requerida en el caso. Por falta de datos, no se ha cambiado anteriormente. Sin embargo, para los cálculos posteriores, se realizarán en base al motor MAN B&W G90ME-C10.5, de 7 cilindros, que presenta una potencia nominal de 43,68MW.

A continuación, se especifica los diferentes SFOC dependiendo de la potencia máxima continua:

Tabla 15 - SFOC del motor MAN B&W G90ME-C10.5 a diferentes MCR [40]

%MCR	Potencia (MW)	SFOC high-load	SFOC part-load	SFOC low-load
50%	21,84	161.5	159.5	157.5
75%	32,76	160.5	159	160
100%	43,68	165	167.5	167.5

Dado que la potencia en el eje es de 40,82MW, la carga en este caso es cercana al 100% (96,9%). Además, el buque está trabajando con la carga máxima (high-load tuning). Por tanto, el SFOC es de 165g/kWh.

El flujo másico para los cálculos posteriores es de:

$$\dot{m}_f = P_{eje} * SFOC = 40,82MW * 165g/kWh = 6735,3 kg/h$$

5.3.2 EMISIONES DEL ESCENARIO BASE

La estimación de las emisiones atmosféricas se ha calculado mediante factores de emisión de Tank-To-Wake (TTW), es decir, considerando las emisiones generadas desde la quema de combustible a bordo hasta que sale por el escape.

Las emisiones de CO_2 presentan un factor de emisión de $3,114 g_{CO_2}/g_{HFO}$. [41]

En el caso de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), dado que el motor de referencia fue ampliamente usado entre el año 2000 y 2010, se ha asumido el cumplimiento del Anexo VI del Convenio MARPOL, aplicando los límites correspondientes al Tier I. Como aparece en la Tabla 2 - Límite de emisiones de NO_x , para este tipo de motor ($n < 130$ rpm), el límite de emisiones es de $17,0 g NO_x/kWh$.

Además, las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y material particulado fino se estiman en función del contenido de azufre en el combustible. Según la IMO, el HFO convencional tiene un contenido de azufre del 2.7%.

Para el cálculo de las emisiones de dióxido de azufre (SO_2), se ha asumido que todo el azufre presente se oxida durante la combustión. Esta aproximación ha sido comúnmente aceptada, y se calcula a partir de una conversión estequiométrica del SO_2 en el proceso de combustión mediante la siguiente relación: [42]

$$\text{Emisión de } SO_2 \text{ (g/g}_{comb}) = S * \frac{M_{SO_2}}{M_S}$$

Donde S es el contenido en azufre, M_{SO_2} y M_S son la masa molar del dióxido de azufre (64,06g/mol) y del azufre (32,06g/mol), respectivamente. Simplificando:

$$\text{Emisión de } SO_2 \text{ (g/g}_{comb}) = 2 * S$$

Aunque el SO_x está formado también por otros óxidos, como el SO₃, se asume que las emisiones de SO_x están compuestas solamente por SO₂, dado que es el óxido principal. Para el HFO en cuestión, se obtiene un factor de emisión de:

$$SO_x \approx SO_2 = 0,027 * 2 = 0,054g/g_{comb}$$

Para calcular las emisiones de materia particulada fina (PM_{2.5}), se ha aplicado la fórmula empírica, ampliamente utilizada, que se basa en la evidencia de que el material particulado proviene de la formación de sulfatos durante la combustión. [42]

$$Emisión\ de\ PM_{2.5}\ \left(\frac{g}{kWh}\right) = 0,2 + 0,6 * S = 0,2 + 0,6 * 0,027 = 0,2161g/kWh$$

Por último, las estimaciones de las emisiones horarias de cada contaminante se hacen en base a la potencia que le llega al eje, que es de 40,82MW y en base al flujo másico, de 6531,2kg/h, dependiendo de si el contaminante está relacionado con la energía generada o la cantidad de combustible consumido:

Las emisiones por hora de CO₂ y del SO_x se calculan mediante el flujo másico:

$$Emisión\ de\ CO_2 = 3,114g/g_{comb} * 6735,3\ kg/h = 20.973,72kg/h$$

$$Emisión\ de\ SO_x = 0,054g/g_{comb} * 6735,3\ kg/h = 363,71\ kg/h$$

Las emisiones por hora del NO_x y de PM_{2.5} se calculan en base a Peje:

$$Emisión\ de\ NO_x = 17g\ NO_x/kWh * 40,82MW = 693,94\ kg/h$$

$$Emisión\ de\ PM_{2.5} = 0,2162gPM/kWh * 40,82MW = 8,825\ kg/h$$

Tabla 16 - Emisiones Caso Base

Contaminante	Emisión (kg/h)
--------------	----------------

CO ₂	20.973,72
SO _x	363,71
NO _x	693,94
PM2.5	8,825

5.3.3 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (EEDI)

A partir de los datos anteriores, se calcula el EEDI siguiendo la metodología explicada en el capítulo de regulaciones. Se emplea la siguiente fórmula:

$$EEDI = \frac{P_{eje} * SFOC * CF}{Capacidad * V}$$

Donde los valores han sido ya anteriormente dispuestos:

$$P_{eje} = 40,82MW; SFOC = 165g/kWh; CF = 3,114g_{CO_2}/g_{HFO};$$

$$Capacidad = 70.000DWT; V = 20 nudos;$$

$$EEDI = \frac{40,82MW * 165g/kWh * 3,114g_{CO_2}/g_{HFO}}{70.000DWT * 20 nudos} = 14,98g_{CO_2} / t * nm$$

Para comparar este resultado con la regulación, se calcula el EEDI de referencia:

$$EEDI_{requerido} = \frac{100 - X}{100} * valor de nivel de referencia$$

Siendo el valor de nivel de referencia:

$$\text{Valor de referencia} = a * b^{-c}$$

En el caso de un portacontenedores, los valores son los siguientes:

Tabla 17 - Valores cálculo de valor de referencia. [43]

Tipo de buque	a	b	c
Portacontenedores	174,22	DWT	0,201

Por tanto, queda así:

$$\text{valor de referencia} = a * b^{-c} = 174,22 * 70.000^{-0,201} = 18,5 \text{ g CO}_2 / t * nm$$

Con el paso del tiempo, el EEDI requerido ha ido disminuyendo, haciéndose cada vez más exigente. En el caso del portacontenedores del estudio, la Tabla 18 - Reducción de índice EEDI según tamaño de buque portacontenedores refleja el avance del valor correctivo (X), dependiendo del DWT del buque:

Tabla 18 - Reducción de índice EEDI según tamaño de buque portacontenedores [43]

Tamaño	Fase 0 01/01/2013- 31/12/2014	Fase 1 01/01/2015- 31/12/2019	Fase 2 01/01/2020- 31/12/2024	Fase 3 01/04/2022- hoy
DWT ≥ 200.0000	0	10	20	50
120.000 ≤ DWT < 200.000	0	10	20	45

80.000 ≤ DWT < 120.000	0	10	20	40
40.000 ≤ DWT < 80.000	0	10	20	35
15.000 ≤ DWT < 40.000	0	10	20	30

En la tabla a continuación se muestra la variación del EEDI requerido con el paso del tiempo para el buque estudiado, con un DWT de 70.000:

Tabla 19 - EEDI requerido para el portacontenedores estudiado en cada fase

Fase	Reducción (%)	EEDI requerido (g CO ₂ / t·nm)
Fase 0	0%	18,5
Fase 1	10%	16,5
Fase 2	20%	14,8
Fase 3	35%	12,03

En conjunto, este valor sirve como línea base para el análisis. A partir de aquí se evaluará el impacto de distintas estrategias de mejora, como el empleo de combustibles alternativos (metanol), la optimización hidrodinámica del buque y el uso de sistemas de propulsión complementaria (asistencia eólica), cuyos efectos se estudiarán en los escenarios posteriores.

5.3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se parte de un buque convencional, por lo que no se tiene en cuenta el costo de construcción inicial del buque ni el motor, ya instalado.

El costo del HFO medio en 2024 fue de 500USD/t, es decir, unos 460€/t. [44]

Tabla 20 - Estimación de coste del caso base

Inversión inicial (€)	0 (base)
Coste combustible	460€/t

5.4 ESCENARIO 1: METANOL COMO COMBUSTIBLE

En este apartado se analiza un segundo escenario, en el que se mantiene el mismo buque de referencia del apartado anterior con la diferencia del tipo de combustible: en lugar de emplear fuelóleo pesado (HFO), se emplea metanol como combustible. Este análisis se realiza con el objetivo de evaluar el efecto del cambio de combustible individualmente. Por ello, se mantienen las condiciones y medidas del buque del apartado anterior, motivo por el cual la resistencia total al avance no se ve alterada.

La elección del metanol como combustible alternativo, frente a otras opciones como el hidrógeno o el amoníaco, se debe a su mayor viabilidad y uso actual. A diferencia de otros combustibles alternativos, el metanol presenta menor complejidad en el almacenamiento y manipulación, facilitando su implementación a corto plazo. Es por ello por lo que ya existen motores marinos diseñados específicamente para funcionar con metanol, permitiendo hacer una evaluación más realista del caso.

Tabla 21 - Comparación del uso de combustibles entre 2021 y 2024 [45]

Fuel	Operating Ships			Ships Under Contract		
	2021	2024	Δ	2021	2024	Δ
Fossil Fuel*	98.80%	98.00%	-0.80%	78.90%	72.90%	-6.00%
LNG	0.82%	1.05%	0.23%	10.77%	13.83%	3.06%
LPG	0.02%	0.12%	0.10%	1.15%	1.60%	0.45%
Battery/Hybrid	0.35%	0.80%	0.45%	8.41%	7.20%	-1.21%
Methanol	0.01%	0.03%	0.02%	0.71%	3.89%	3.18%
Hydrogen	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.17%	0.11%
Ammonia	0.0%	0.00%	0.00%	0.00%	0.42%	0.42%

* Fossil fuel includes HFO, VLSFO, MDO and MGO.

Para integrar el metanol como combustible principal, se plantea una reforma del motor inicial. Este retrofit ya ha sido implementado en buques comerciales de un porte similar al estudiado, asegurando un uso acumulado de más de 600.000 horas operativas con metanol [46]. El principio de funcionamiento se basa en inyección directa de metanol líquido con encendido piloto con fuelóleo (HFO).

5.4.1 CÁLCULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Para el motor en cuestión, que parte de una remodelación del motor del caso anterior, se calcula el SFOC a un 100% de MCR aproximadamente mediante la diferencia de poder calorífico entre el HFO (42,7 MJ/kg) y del metanol (19,9 MJ/kg) [47]:

$$SFOC_{\text{metanol}} \approx SFOC_{\text{diésel}} \times (42,7 / 19,9) \approx 165 \times 2,15 \approx 355 \text{ g/kWh}$$

A partir de este dato, se puede calcular el flujo másico de combustible de la siguiente forma:

$$\dot{m}_f = SFOC * P_{eje};$$

$$P_{eje} = 40,82 \text{ MW};$$

$$\dot{m}_f = 335,7 \text{ g/kWh} * 40,82 \text{ MW} = 13.703,3 \text{ kg/h};$$

Calculando el flujo másico por separado:

$$\dot{m}_{f_{CH_3OH}} = 322,4g/kWh * 40,82MW = 13.160,4 kg/h$$

$$\dot{m}_{f_{HFO}} = 13,3g/kWh * 40,82MW = 542,9 kg/h$$

En consecuencia, el uso de metanol implica un aumento considerable en el volumen de combustible necesario a bordo para mantener la misma autonomía, lo que representa un desafío importante tanto para el diseño de nuevos buques como para la reconversión de unidades existentes.

5.4.2 EMISIONES CON METANOL COMO COMBUSTIBLE

A la hora de calcular las emisiones, hay que tener en cuenta la composición del combustible. El motor en cuestión trabaja con un encendido piloto de HFO, que puede llegar a ser hasta del 5%. Para el estudio, se valorará como un 4%, por lo que el SFOC total es:

Escriba aquí la ecuación.

$$SFOC_{tot} = 1,04 * 355 = 369,2$$

A continuación, en la Tabla 22 - Factores de emisión según porcentaje de metanol y diésel presente en el combustible. Los datos de la tabla pertenecen a un estudio de un buque de pasajeros. Estos datos pueden extrapolarse a este estudio ya que la potencia de ambos buques es similar y los valores están expresados en gramos por energía generada, asegurando un margen de precisión aceptable.

Tabla 22 - Factores de emisión según porcentaje de metanol y diésel [48]

Methanol%	Diesel%	EF CO ₂	EF NO _x	EF SO _x	EF PM
0	100	589.904	17	0.359731	0.26913
10	90	556.2136	15.547	0.323758	0.242217
20	80	522.5232	14.094	0.287785	0.215304
30	70	488.8328	12.641	0.251812	0.188391
40	60	455.1424	11.188	0.215839	0.161478
45	55	438.2972	10.4615	0.197852	0.148022
50	50	421.452	9.735	0.179866	0.134565
60	40	387.7616	8.282	0.143892	0.107652
70	30	354.0712	6.829	0.107919	0.080739
80	20	320.3808	5.376	0.071946	0.053826
90	10	286.6904	3.923	0.035973	0.026913
100	0	253	2.47	0	0

Para el caso de estudio, se usará la fórmula del factor de emisión combinado:

$$EF_{tot} = X_{CH3OH} * EF_{CH3OH} + X_{HFO} * EF_{HFO}$$

Donde el X_f (metanol) es del 0,96 y el X_{pf} (HFO) es de 0,04. El factor de emisión según esta mezcla de combustible para cada contaminante queda así:

CO₂:

$$EF_{totCO2} = 0,96 * 253 + 0,04 * 589.9 = 269,85 \text{ g/kWh}$$

NO_x:

$$EF_{totNOx} = 0,96 * 2,47 + 0,04 * 17 = 3,197 \text{ g/kWh}$$

SO_x:

$$EF_{totSOx} = 0,96 * 0 + 0,04 * 0,3597 = 0,017985 \text{ g/kWh}$$

PM:

$$EF_{totPM} = 0,96 * 0 + 0,04 * 0,269 = 0,01345 \text{ g/kWh}$$

Para calcular las emisiones por hora, se hace uso de la potencia propulsiva. Como se calcula en el caso base, la potencia en el eje es de 40,82MW. Por lo tanto:

CO₂:

$$\text{Emisión de CO}_2 = 269,85 \text{ g/kWh} * 40,82\text{MW} = 11.015,3 \text{ kg/h}$$

NO_x:

$$\text{Emisión de NO}_x = 3,197 \text{ g/kWh} * 40,82\text{MW} = 130,5 \text{ kg/h}$$

SO_x:

$$\text{Emisión de SO}_x = 0,017985 \text{ g/kWh} * 40,82\text{MW} = 0,73 \text{ kg/h}$$

PM:

$$\text{Emisión de PM} = 0,01345 \text{ g/kWh} * 40,82\text{MW} = 0,55 \text{ kg/h}$$

Tabla 23 - Emisiones con Metanol

Contaminante	Emisión (kg/h)
CO ₂	11.015,3
NO _x	130,5
SO _x	0,73
PM	0,55

5.4.3 CÁLCULO ÍNDICE EEDI

Para calcular el EEDI, hace falta calcular primero el factor de emisión;

$$CF_{metanol} = 1,375g_{CO_2}/g_{metanol}; [49]$$

$$CF_{comb} = 0,96 * 1,375g_{CO_2}/g_{metanol} + 0,04 * 3,114g_{CO_2}/g_{HFO} = 1,4446g_{CO_2}/g_{comb};$$

A partir de estos datos, obtenemos el nuevo índice EEDI:

$$P_{eje} = 40,82MW; SFOC = 369,2g/kWh; CF = 1,4446 g_{CO_2}/g_{comb};$$

$$\text{Capacidad} = 70.000DWT; V = 20 \text{ nudos};$$

$$EEDI = \frac{40,82MW * 369,2g_{comb}/kWh * 1,4446 g_{CO_2}/g_{comb}}{70.000DWT * 20 \text{ nudos}} = 15,55g_{CO_2}/t * nm$$

El EEDI requerido es el mismo que el apartado anterior, Tabla 19 - EEDI requerido para el portacontenedores estudiado en cada fase.

5.4.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

El retrofit del motor para que pueda funcionar con metanol se estima en torno a 328USD/kW, por tanto: [50]

$$Retrofit = 328USD/kW * 40,82MW = 13.388.960USD = 12.317.843€$$

Además, haría falta una ampliación de los tanques para que el buque mantuviera su autonomía. El volumen típico de los tanques de portacontenedores de las características estudiadas, está en torno a 1250 metros cúbicos, como no hacen falta tanques criogénicos o presurizados [51], pero necesitan ser de acero al carbono con recubrimiento epoxi. El coste de modificación e instalación se estima en 110 USD/kW. Para el motor en cuestión, con un MCR máximo de 40,82MW, el coste de la reforma es de 4.490.200 USD, es decir, 4.130.984 €. [56]

El coste de producción del metanol gris es de menos de 200 USD, sin embargo, en Europa asciende a 300USD. Por otro lado, el precio del metanol verde es todavía incierto. Se estima

el coste de biometanol de 600 USD/t, aunque si procede de biogás reformado es algo más barato, de 450USD/t, esto es a medio-largo plazo, siempre que se aproveche la economía de escala; el e-metanol se estima en torno a los 1.000USD/t. [56] Para este estudio, se considera el precio actual del biometanol en 700USD/t y del e-metanol de 1000USD/t

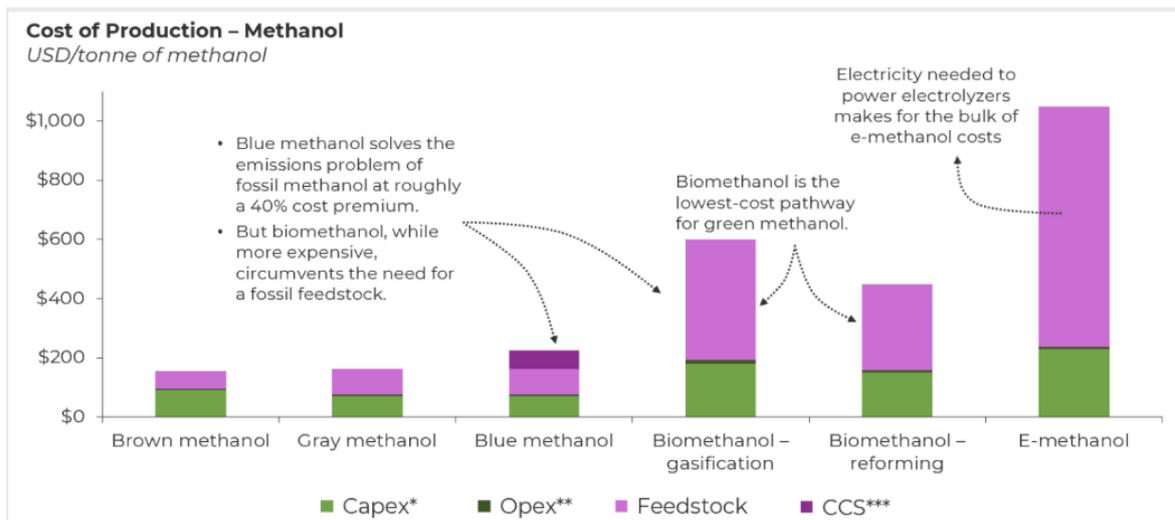


Figura 25 - Comparación del coste de metanol según producción

Retrofit motor (€)	12.317.843
Tanques adicionales (€)	4.130.984
Coste combustible	Biometanol: 644€/t E-metanol: 920 €/t

5.5 ESCENARIO 2: PROA CON BULBO OPTIMIZADO

En este escenario se analiza el efecto de añadir un bulbo optimizado en la proa, manteniendo la eslora, manga y calado del buque de referencia. El objetivo es reducir la resistencia por formación de olas y mejorar la eficiencia energética sin modificar significativamente la arquitectura general del buque.

Se evaluará el rendimiento hidrodinámico utilizando ambos combustibles: HFO y metanol, con el fin de comparar de forma cruzada la influencia del diseño y el tipo de combustible.

Para una evaluación precisa de su impacto se requieren simulaciones CFD o ensayos en canal. Estas herramientas no están disponibles para este trabajo. Es por ello por lo que, para evaluar el efecto de añadir un bulbo optimizado, se basarán los cálculos en correlaciones de otros ensayos y teorías validadas, ya sea por CFD o de manera empírica.

5.5.1 VARIACIONES HIDRODINÁMICAS

El análisis se fundamenta en el trabajo de Denev (2023) [52]. En este estudio se analiza la variación de los coeficientes hidrodinámicos clave al instalar un bulbo.

Para comprobar que estos datos se pueden extrapolar a nuestro estudio se compara el número de Froude en cada caso. Se calcula con la siguiente fórmula:

En el caso presente:

$$V = 10,29m/s; g = 9,81m/s^2; L = 294m;$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * L}} = \frac{10,29m/s}{\sqrt{9,81m/s^2 * 294m}} = 0,192$$

Dado que el del buque analizado en el estudio es muy similar ($Fr \approx 0,18$), se considera que ambos cascos están dentro del mismo régimen de formación de olas. Por tanto, los datos obtenidos en este trabajo se pueden aplicar al portacontenedores estudiado.

Se comparan tres escenarios: proa original sin bulbo, bulbo estándar y bulbo optimizado. Las variaciones se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 24 - Variación de principales coeficientes hidrodinámicos con la incorporación de bulbo de proa [52]

	VAR1	VAR2	VAR3
C _b	0.78	0.76	0.76
C _p	0.78	0.77	0.76
C _m	0.99	0.99	0.99
C _w	0.90	0.89	0.87
Δ, m ³	10518.34	10518.64	10518.80

Para el análisis del efecto del bulbo, se supondrá que ha sido previamente optimizado, por lo que se emplearan los resultados de la VAR3.

En primer lugar, el coeficiente de fricción (C_f) se mantiene constante. Esto se debe a que el desplazamiento no varía prácticamente, por tanto, la superficie mojada y el número de Reynolds se consideran constantes. Esto implica que la resistencia por fricción se mantiene la misma que en el caso base.

En segundo lugar, el coeficiente de resistencia residual es una función de todos los coeficientes restantes de la tabla y del número de Froude. Por tanto: una reducción del 2,5% del coeficiente de bloque (C_b) implica un casco mas eficiente, optimizando mas el volumen del barco; una reducción del 2,5% del coeficiente prismático (C_p) indica una entrada y salida del fluido mas ordenadas, reduciendo la amplitud de las ondas; una reducción del 3,3% del coeficiente de flotación (C_w) indica una mejor interacción de la proa con la superficie del fluido, es decir, menor generación de ola incidente. Por último, el coeficiente medio de sección (C_m) no se ve alterado, asegurando que no se aumenta la sección transversal máxima del buque, evitando que se aumente la resistencia por presión.

Las reducciones combinadas de tres coeficientes justifican una disminución significativa del C_r . Sin embargo, el estudio base no indica un C_r concreto.

Sin embargo, en base al estudio de Sharma y Sha (2005) [53], la incorporación de un bulbo optimizado genera una reducción del coeficiente de potencia residual de entre el 35% y el 45%, para buques con coeficientes de bloque entre 0,675 y 0,725 y números de Froude entre 0,20 y 0,26. Se da por válida aplicar estos datos a nuestro caso, que presenta con un $C_b=0,7$ y un $Fr=0,195$.

Dado que la potencia residual está directamente relacionada con la resistencia residual:

$$P_r = R_r * V$$

Una reducción del 35-45% del P_r implica una reducción proporcional del R_r , siempre que la velocidad se mantenga constante. Para el estudio, se aplicará una reducción de la resistencia residual intermedia, del 40%. [53]

5.5.2 CÁLCULO DE RESISTENCIA

Partiendo de los cálculos desarrollados en el caso base, se reduce la resistencia residual un 40%:

$$R_r = 1.524,97 * \frac{1 - 0,4}{1} = 914,98 \text{ kN}$$

La resistencia total será la suma de la resistencia por fricción, que es la misma que en el caso base, y la resistencia residual reducida:

$$R_t = R_f + R_r = 1.044,6 \text{ kN} + 914,98 \text{ kN} = 1.959,58 \text{ kN}$$

Potencia efectiva requerida (Pe)

Por lo tanto, la nueva potencia efectiva requerida es de:

$$R_t = 1.959,58 \text{ kN}; V = 10,29 \text{ m/s};$$

$$P_e = R_t * V = 1.959,58 \text{ kN} * 10,29 \text{ m/s} \approx 20,16 \text{ MW}$$

Potencia entregada al eje de hélice (P_{eje})

Una vez conocida la potencia efectiva, el siguiente paso es determinar cuanta potencia necesita transmitir el motor al eje de la hélice para que, tras las pérdidas hidrodinámicas del sistema propulsivo, se genere la energía útil necesaria. Ya que la eficiencia propulsiva depende de factores externos al motor empleado, se supone la misma eficiencia.

$$P_{eje} = \frac{Pe}{\eta_d} = \frac{20,28MW}{0,648} = 31,3MW;$$

Motores

Dado el motor del caso inicial, con una potencia nominal de 43,68MW, a esta nueva potencia necesaria en el eje, el MCR al que trabajará el motor será de:

$$\%MCR = \frac{31,3MW}{43,68MW} * 100 = 71,7\%$$

Por la cercanía al 75%, y según la Tabla 15 - SFOC del motor MAN B&W G90ME-C10.5 a diferentes MCR, el SFOC del motor a esta carga es de 160,5g/kWh. Por lo tanto, el flujo másico es de:

$$\dot{m}_f = P_{eje} * SFOC = 31,3MW * 160,5g/kWh = 5.023,65 kg/h$$

Emisiones

- Motor HFO

Los factores de emisión, especificados en el caso base, relaciona las emisiones contaminantes que surgen de producir la potencia requerida en el eje usando como combustible HFO.

Las emisiones por hora de CO₂ y del SO_x se calculan mediante el flujo másico:

$$\text{Emisión de CO}_2 = 3,114g_{\text{CO}_2}/g_{\text{comb}} * 5.023,65kg/h = 15.641,65 \text{ kg/h}$$

$$\text{Emisión de SO}_x = 0,054g_{\text{SO}_x}/g_{\text{comb}} * 5.058,96kg/h = 363,27 \text{ kg/h}$$

Las emisiones por hora del NO_x y de $\text{PM}_{2.5}$ se calculan en base a Peje:

$$\text{Emisión de NO}_x = 17g_{\text{NO}_x}/\text{kWh} * 31,3\text{MW} = 535,24 \text{ kg/h}$$

$$\text{Emisión de PM}_{2.5} = 0,2162g_{\text{PM}}/\text{kWh} * 31,3\text{MW} = 6,805 \text{ kg/h}$$

Tabla 25 - Emisiones con bulbo y HFO

Contaminante	Emisión (kg/h)
CO ₂	15.641,65
NO _x	363,27
SO _x	535,84
PM	6,805

5.5.3 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (EEDI)

Como se explica en el apartado del caso base, se calcula el EEDI a partir de los valores obtenidos tras el estudio de la incorporación del bulbo optimizado:

$$EEDI = \frac{P_{eje} * SFOC * CF}{\text{Capacidad} * V}$$

Donde los valores han sido ya anteriormente dispuestos:

$$P_{eje} = 31,3 \text{ MW}; SFOC = 160,5g_{\text{HFO}}/\text{kWh}; CF = 3,114g_{\text{CO}_2}/g_{\text{HFO}};$$

Capacidad = 70.000DWT; V = 20 nudos;

$$EEDI = \frac{31,52MW * 160,5g_{HFO}/kWh * 3,114g_{CO_2}/g_{HFO}}{70.000DWT * 20 nudos} = 11,17 gCO_2 / t * nm$$

Para compararlo, el EEDI requerido es el mismo calculado en el caso inicial, dado que depende del tipo de buque y características base. Los datos se encuentran en la Tabla 19 - EEDI requerido para el portacontenedores estudiado en cada fase, dependiendo de la fase de reducción.

Motor metanol

A continuación, se analiza la combinación del segundo y tercer escenario.

CO₂:

$$Emisión de CO_2 = 269,85 g/kWh * 31,52 MW = 8.505,67 kg/h$$

NO_x:

$$Emisión de NO_x = 3,197 g/kWh * 31,52 MW = 100,77 kg/h$$

SO_x:

$$Emisión de SO_x = 0,017985 g/kWh * 31,52 MW = 0,567 kg/h$$

PM:

$$Emisión de PM = 0,01345 g/kWh * 31,52 MW = 0,434 kg/h$$

Tabla 26 - Emisiones con bulbo y metanol

Contaminante	Emisión (kg/h)
CO ₂	8.505,67
NO _x	100,77
SO _x	0,567
PM	0,434

EEDI

$$P_{eje} = 31,52MW; SFOC = 335,7g/kWh; CF = 1,4446 g_{CO_2}/g_{comb};$$

$$\text{Capacidad} = 70.000DWT; V = 20 \text{ nudos};$$

$$EEDI = \frac{31,52MW * 335,7g/kWh * 1,4446 g_{CO_2}/g_{comb}}{70.000DWT * 20 \text{ nudos}} = 10,92g_{CO_2}/t * nm$$

5.5.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

El coste de implementación del bulbo de proa optimizado se calcula a partir del acero necesario para construirlo y la mano de obra.

En el estudio, se analiza los costes de implantar un bulbo en un buque de 120 metros. En comparación, el buque de este estudio es de 294 metros, un 145% más. Por este motivo, para calcular la cantidad de acero necesaria, se han aumentado la longitud y el radio del bulbo el mismo porcentaje. Por tanto, el bulbo es de 7,35 metros de longitud con un radio de 4,90 metros.

La forma del bulbo se asemeja a un elipsoide en revolución. Al ser una estructura hueca, se calcula el aumento de área, que será proporcional al cuadrado del aumento de eslora:

$$294/120=2,45 \text{ --- } \text{área prop a } l*r- 2,45^2 = \text{área superficial 6 veces mas}$$

En el estudio referenciado, el aumento de peso al añadir el bulbo resultó de 59 toneladas, por lo tanto, en este estudio será seis veces más, es decir, 354 t.

Además, el coste del acero, incluyendo mano de obra, consumibles y energía, está entre 1.000 y 1.500€/t. Además, hay que añadir costes adicionales, que suelen ser entre un 20 y un 30% del coste base, de diseño, ingeniería, certificación, etc. Por lo tanto, aplicando el coste medio [54]:

$$\text{Coste total}=354*1.250 *1,25= 553.125\text{€}$$

El coste de mantenimiento por año es relativamente bajo, se estima en el 1% del coste de implementación, es decir, 5.531,25€

5.6 ESCENARIO 3: TECNOLOGÍAS DE LUBRICACIÓN POR AIRE

En este escenario se estudia el efecto de aplicar tecnologías de lubricación por aire al casco del buque. Al añadir una capa de aire entre el casco y el agua, el objetivo es reducir la resistencia por fricción.

De las formas que se puede aplicar esta tecnología, se deduce que la reducción de resistencia por capa de aire (ALDR) es la más adecuada para portacontenedores de gran tamaño, ya que tienen un casco de fondo plano. Esta elección se justifica por la capacidad del buque de mantener en el fondo del casco una capa de aire. [55]

Para maximizar la reducción de resistencia, se necesita un diseño óptimo. Según el estudio de An, H. (2022) [56], basado en buques cisterna y modelos genéricos, para lograr un diseño óptimo, se necesitan boquillas ranuradas con orificios de 2 mm, distribuidos

longitudinalmente, con un flujo de aire entre boquillas de proa y de popa de 30% y 70%, respectivamente. El espesor de capa a lograr está en torno a los 10mm.

Además, los resultados obtenidos por este estudio se basan en buques generales y buques cisterna, coincidiendo con los portacontenedores en la velocidad de operación, lo que conlleva un Reynolds similar; y el fondo plano del casco.

En el estudio, comparan tres configuraciones diferentes de esta tecnología:

Tabla 27 - Reducción del coeficiente de fricción según la configuración de sistema de lubricación por aire [56]

Configuración del sistema	Reducción de Cf
ALDR sin placas laterales	21%
ALDR con placas laterales	32,3%
ACDR con placas laterales	38,7%

Reduciendo el valor del caso inicial, el coeficiente de fricción en cada caso es de:

ALDR sin placas laterales

$$C_f = 0,00137 * (1 - 0,21) = 0,00108$$

ALDR con placas laterales

$$C_f = 0,00137 * (1 - 0,323) = 0,000927$$

ACDR con placas laterales

$$C_f = 0,00137 * (1 - 0,387) = 0,00084$$

Esta reducción tiene un efecto en la resistencia total de:

ALDR sin placas laterales

$$R_t = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * (C_f + C_r) = \frac{1}{2} * 1.025 * 10,29^2 * 14.051 * (0,00108 + 0,002) \\ = 2,35 \text{ MN}$$

Por tanto, reduce la resistencia total un 8,56%.

ALDR con placas laterales

$$R_t = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * (C_f + C_r) \\ = \frac{1}{2} * 1.025 * 10,29^2 * 14.051 * (0,000927 + 0,002) = 2,23 \text{ MN}$$

Por tanto, reduce la resistencia total un 13,23%.

ACDR con placas laterales

$$R_t = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * (C_f + C_r) = \frac{1}{2} * 1.025 * 10,29^2 * 14.051 * (0,00084 + 0,002) \\ = 2,17 \text{ MN}$$

Por tanto, reduce la resistencia total un 15,56%.

5.6.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Los costes de implementación de esta tecnología, tanto como para la instalación como para el mantenimiento anual, se desglosa en la Tabla 28 - Rango de costes de instalación y mantenimiento de los sistemas de lubricación. Como parte de equipos del sistema, se incluyen compresores, boquillas, tuberías, controladores y software.

Tabla 28 - Rango de costes de instalación y mantenimiento de los sistemas de lubricación [57]

Componente	Rango estimado de coste (USD)
Equipos del sistema	250.000-750.000
Instalación y mano de obra	100.000-300.000
Ingeniería y diseño personalizado	50.000-150.000
Formación tripulación	5.000-10.000
Total inicial (CAPEX)	500.000-1,3M
Mantenimiento anual	20.000-50.000
Costes operativos (energía)	10.000-30.000
Costes anuales (OPEX)	30.000-80.000

La referencia que proporciona la tabla estudia buques de hasta 200 metros de eslora. Por lo que, ajustándolo al caso de estudio, un portacontenedores de gran porte, con necesidad de sistemas más potentes, se aproximan los costos a:

Tabla 29 - Estimación del coste de instalación de los sistemas de lubricación aplicados al caso de estudio

Componente	Rango estimado de coste (USD)
Equipos del sistema	900.000
Instalación y mano de obra	350.000
Ingeniería y diseño personalizado	150.000
Formación tripulación	10.000

Total inicial	1.410.000
Mantenimiento anual	60.000
Costes operativos (energía)	50.000
Costes anuales	110.000

Por tanto, el coste total de instalación de las tecnologías de ALDR, es, de instalación inicial de 1.297.200 € y el coste anual de 101.200 €.

El coste de añadir a esta instalación placas laterales, el material tiene un coste del 30-50% del coste del equipamiento (900.000), es decir, entre 270.000 y 360.000 USD. Además, el coste de instalación es de un 10-20% del coste de las placas. [57] Estimando un coste medio, añadir placas supone 365.000 USD, es decir, 335.800 €. Por otro lado, el coste de mantenimiento de las placas es de unos 10.000 € más.

Añadir cavidades en la obra viva del buque requiere modificación profunda del casco, con refuerzos estructurales, por lo que requiere un nivel de ingeniería complejo. No se especifica en los estudios una cifra exacta, pero se estima en un 50% extra del coste, por tanto, el costo estimado es de 2.662.500 USD [58].

Tabla 30 - Comparación reducción de resistencia total y coste de la tecnología

Configuración del sistema	Reducción de R_t (%)	Estimación de coste (€)
ALDR sin placas laterales	8,56%	1.297.200
ALDR con placas laterales	13,23%	1.633.000
ALDR con cavidad + placas	15,56%	2.449.500

Entre las diferentes configuraciones de sistemas ALDR, la versión con placas laterales ofrece una mejora significativa de rendimiento con un coste relativamente aceptable. La opción con cavidades supone un aumento de coste importante y no ofrece mejoras hidrodinámicas que justifiquen el aumento de inversión. Por tanto, para las comparaciones posteriores se tomará como referencia la configuración con placas laterales.

5.7 ESCENARIO 4: ROTOR SAILS

En este apartado se analiza el efecto de instalar rotores Flettner como sistema de propulsión asistida por viento (Wind-Assisted Ship Propulsion, WASP) para el portacontenedores definido anteriormente.

La elección de esta tecnología dentro de las diferentes tecnologías WASP se basa en diferentes factores: tiene una eficiencia en el uso de superficie para generar empuje muy superior a otras tecnologías; no interfieren significativamente en operaciones carga y descarga, al ser diseños verticales y de planta fina; se puede instalar sin tener que hacer grandes cambios en la estructura del buque.

Como se explica en el capítulo anterior, los rotores Flettner funcionan por el efecto Magnus. Este efecto logra generar una fuerza de empuje complementaria, y reducir la fuerza que necesita generar el motor a base de combustible. Como se justifica en el capítulo anterior, para optimizar el funcionamiento de este sistema, obteniendo el máximo empuje sin aumentar desmesuradamente la resistencia por escora, es necesario buscar un equilibrio entre la fuerza propulsiva (Thrust, T) y la fuerza de escora (Heel force, H). Por este motivo, hace falta realizar un estudio de las múltiples variables que afectan al rendimiento de los rotores para poder instalar estas tecnologías de forma óptima.

Las principales variables son: el número de rotores, la dimensión del rotor, la velocidad de giro del rotor, la posición en la cubierta del barco y la separación entre rotores.

Selección del número de rotores

Para determinar el número óptimo de rotores, se ha recurrido a casos reales:

Tabla 31 - Configuraciones de diferentes casos reales [32]

Ship's name	Performance parameters	Ship type	Routes
Afros	4 rotor sails 16m×2m	64000DWT Ultra Large Bulk Carrier	Nantong to Vancouver
Axios	4 rotor sails 25.4m×3.5m	82,000DWT Kamsarmax bulk carrier	Kamara jar to Paranagua
Estraden	2 rotor sails 18m×3m	9000 DWT Cargo Ship	Netherlands to United Kingdom
Timberwolf	2 rotor sails 30m×5m	110,000DWT tanker	Tanjung Pelepas to Ain Sukhna
SC Connector	2 rotor sails 35m×5m	8843DWT Ro-Ro vessel	Risavika to Aarhus

Dado que el buque de estudio es de 70.000DWT y que se trata de un portacontenedores con espacio limitado, se propone la instalación de tres rotores Flettner, como una opción equilibrada entre rendimiento y espacio disponible.

Dimensiones geométricas del rotor

Una vez definido el número, hace falta establecer las medidas. La relación altura/diámetro recomendado es en torno a 6, como equilibrio entre empuje y resistencia. [33] Analizando los casos reales de la, se tomará como referencia el buque *SC Connector*. Estableciendo las medidas de los rotores en 35 metros de altura y 5 metros de diámetro, con una relación A/D de 7.

Disposición en cubierta

La localización de los rotores en cubierta es crucial para garantizar estabilidad y evitar interferencias entre el funcionamiento hidrodinámico de los rotores. Para ello, se recomienda una separación entre 1,2 y 1,5 veces el diámetro [33]. Además, los tres motores se instalarán en la línea de crujía (línea imaginaria que va de proa a popa y separa el barco en dos mitades iguales).

Para compatibilizar esta disposición con las operaciones de carga y descarga del buque, se prevé la instalación de un sistema de desplazamiento lateral, basado en railes. Este

mecanismo permite mover hacia un lado los rotores mientras las operaciones de puerto de forma sencilla y rápida. [59]

Spin ratio

El rendimiento del rotor depende directamente de la velocidad angular que se le aplique. El spin ratio relaciona la velocidad tangencial en la superficie del rotor y la velocidad del viento aparente:

$$\text{Spin Ratio} = \frac{\omega * R}{V_a}$$

El rendimiento óptimo se alcanza cuando el spin ratio está entre 2 y 3. [33]. Lo que se traduce en una velocidad angular de entre 150 y 150 rpm (157-262rad/s), dependiendo de las condiciones meteorológicas dadas.

5.7.1 CÁLCULOS

La fuerza de empuje (T), así como la de fuerza de inclinación (H) se calculan a partir de las siguientes ecuaciones, ya explicadas en el capítulo anterior:

$$T = C_T * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S$$

$$H = C_H * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S$$

A su vez, los coeficientes de thrust (Ct) y de heel (Ch), son producto de los coeficientes de sustentación (Cl) y de arrastre (Cd) dimensionados en los ejes del buque:

$$C_T = C_L * \sin \alpha - C_D * \cos \alpha$$

$$C_H = C_L * \cos \alpha - C_D * \sin \alpha$$

Estos coeficientes dependen directamente del spin ratio. Como no se dispone de una fórmula universal para calcular Cl y Cd, que son normalmente obtenidos a través de CFD y de

ensayos, se ha aproximado los valores obtenidos a partir del estudio numérico de S.J Karabelas et al. (2011), que estudia el comportamiento de un cilindro giratorio [60]. Para aplicar dicho estudio, se han comparado las condiciones a partir del número de Reynolds. Dado que ambos son elevados y los Spin Ratio están en torno a los analizados en el trabajo, se considera en condiciones similares.

$$Re = \frac{U * D}{\nu}$$

Según el estudio, los coeficientes varían así según el spin ratio (denominados por alpha, en el estudio) para Reynolds de entre $5 \cdot 10^5$ y $5 \cdot 10^6$.

Figura 26 - Variación del Cl según el Spin Ratio [60]

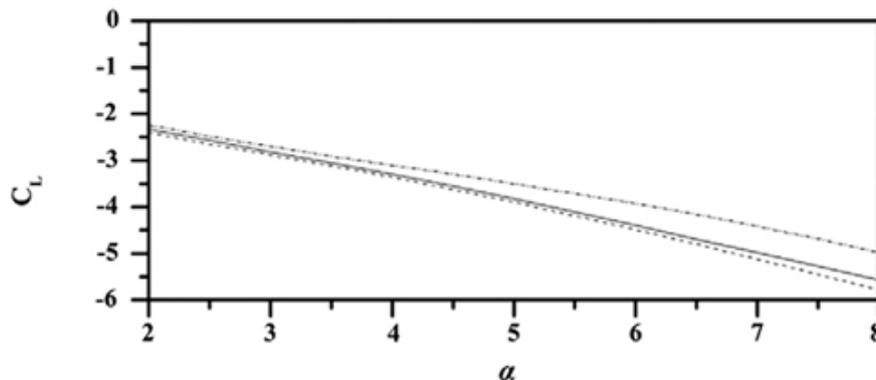
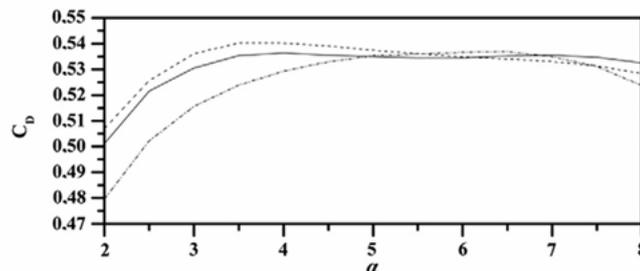


Figura 27 - Variación del Cd según el Spin Ratio [60]



Como no se determina ninguna función que relacione el spin ratio con los coeficientes directamente y los Spin Ratio obtenidos son superiores a 4, se aproximarán ambas rectas a una función lineal.

En el caso de C_L , seleccionando los puntos (2;-2,4) y (8;-5,6), la recta que contiene ambos es la siguiente:

$$C_L = -\frac{8}{15} * SR - \frac{3}{4} = -0,53 * SR - 0,75$$

En el caso de C_D , seleccionando los puntos (4;0,537) y (8;0,525) la recta que contiene los dos puntos es aproximadamente:

$$C_D = 0,003 * SR + 0,52$$

Se adopta el convenio estándar de giro positivo (antihorario), y la fuerza de empuje obtenida es positiva siempre que sea a favor del buque, y negativa en caso contrario.

5.7.2 METODOLOGÍA USADA PARA CÁLCULOS GENERALES

A la hora de evaluar la potencia proporcionada por los rotores, dada la dependencia de los cálculos a las condiciones atmosféricas en cada caso, se estudia este caso para diferentes rutas marítimas con diferentes situaciones meteorológicas.

Para realizar dicho cálculo, en primer lugar, se recopilaron los datos meteorológicos a lo largo de cada ruta marítima, extraídos del portal Copernicus Maritime Service, que proporciona observaciones horarias de viento global. [61]

Los datos descargados son la componente norte del viento, la componente este del viento y la densidad del aire. Los datos se recogieron con 0,25° de resolución ($\approx 11,7$ km). Aunque la intención inicial era analizar los datos de todo un año, las limitaciones de software impidieron manejar esa cantidad de datos. Por ello, se eligieron los registros de las 23h (UTC) del 28 y 29 de julio de 2025.

Estos datos se importaron a Excel, donde se organizaron por distancia, y se calculó la media de los valores de las dos fechas en cada punto.

Una vez recogidos los datos, se calculó la velocidad y dirección de viento real para cada momento registrado, mediante las siguientes fórmulas:

$$|V| = \sqrt{V_n^2 + V_e^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_e}{V_n}\right)$$

Posteriormente, se calcula tanto el viento aparente como el ángulo aparente. Para ello, se calcula para cada ruta el rumbo principal que sigue el buque y se tiene en cuenta la velocidad de este.

De esta forma, se obtiene la intensidad del viento aparente y el ángulo, partiendo de la base de que 0° indique viento de popa y 180° de proa, mientras que 90° y 270° vientos de estribor y babor, respectivamente.

Después se calculó el spin ratio en cada caso:

$$SR = \frac{\omega * R}{V_a}$$

El radio del rotor de 2,5 metros y la altura de 35 metros y la velocidad de giro se definirá en función del viento aparente.

El SR óptimo está en torno a 3,5. Este valor permite un equilibrio entre empuje útil, estabilidad del buque y consumo energético, necesitado para dar el momento necesario al rotor. [62]

En las rutas estudiadas, los valores de intensidad y ángulo de viento aparente varían considerablemente. Para fijar una velocidad de giro del rotor fija durante toda la travesía, se calculó el SR en cada punto de la travesía para cada SR, y se consideró que la velocidad de giro debería proporcionar un SR en un rango entre 2 y 5 de SR como mínimo el 80% de la travesía. Lo cual nos estableció para cada caso una velocidad angular ajustada.

A partir de estos datos se estimaron los coeficientes de sustentación y de resistencia con la aproximación lineal que se especifica anteriormente.

Una vez obtenidos estos coeficientes se calculan el coeficiente de empuje y de escora proyectando los coeficientes obtenidos anteriormente en los ejes del buque:

$$C_T = C_L \cdot \sin(\alpha) - C_D \cdot \cos(\alpha)$$

$$C_H = C_L \cdot \cos(\alpha) + C_D \cdot \sin(\alpha)$$

Siendo alfa el ángulo del viento aparente respecto al buque.

Por último, se clacula las fuerzas de empuje y escora para cada dato recopilado, incluyendo también la densidad del aire registrada y el área en contacto con el fluido, es decir, el área de la superficie lateral del cilindro (S):

$$S = \pi * d * h = \pi * 5 * 35 = 549,78m^2$$

$$T = 0,5 * \rho * V^2 * S * C_T$$

$$H = 0,5 * \rho * V^2 * S * C_H$$

Finalmente, se estimó una fuerza promedio haciendo la media de todas las fuerzas calculadas en cada punto de la travesía.

Además, para saber la eficiencia de esta tecnología, hay que calcular la potencia que consume el barco para darle el momento necesario al rotor, que se define así:

$$P_{rotor} = M_m * \omega$$

El par resistente causado por la fricción del aire sobre la superficie del cilindro liso, es decir, el par motor, se expresa como:

$$M_m = C_m * \frac{1}{2} * \rho * V_a^2 * D^2 * H$$

Siendo C_m el coeficiente de momento. Para Reynolds altos y un Spin Ratio en torno a 3, el coeficiente de momento es de 0,018-0,023, por lo que se puede estimar de 0,02.

5.7.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

El coste de implementar un rotor Flettner, de dimensiones algo menores a las del estudio, es de aproximadamente 500.000 USD, incluyendo ensamblaje y componentes avanzados. En el caso presente, se ajusta el coste a 600.000 USD, por ser rotores con 5 metros más de altura y un buque de mayores dimensiones. Además, el coste en dique seco para instalarlo es de 110.000 USD por rotor. [63]

$$\begin{aligned} \text{Inversión inicial} &= 3 * (600.000 + 110.000) = 2 - 2.130.000 \text{ USD} \\ &= 1.959.600 \text{ EUR} \end{aligned}$$

No se tiene en cuenta el tiempo que el buque no está en servicio, que es de aproximadamente 20 días.

Por otro lado, el mantenimiento de cada rotor es de aproximadamente 50.000 USD/año.

$$\text{Mantenimiento} = 3 * 50.000 = 150.000 \text{ USD} = 144.000 \text{ €}$$

No se añaden aquí la energía eléctrica absorbida por los rotores, que se tendrá en cuenta posteriormente.

Tabla 32 - Coste de instalación de los rotores Flettner

Instalación de 3 Flettner rotors	1.959.600 €
Mantenimiento anual	144.000 €

42.238

5.7.4 RUTAS

Debido a la dependencia de la eficiencia de esta tecnología a casos específicos, se han considerado diferentes rutas.

5.7.4.1 Ciudad del Cabo (Sudáfrica) – Buenos Aires (Argentina)

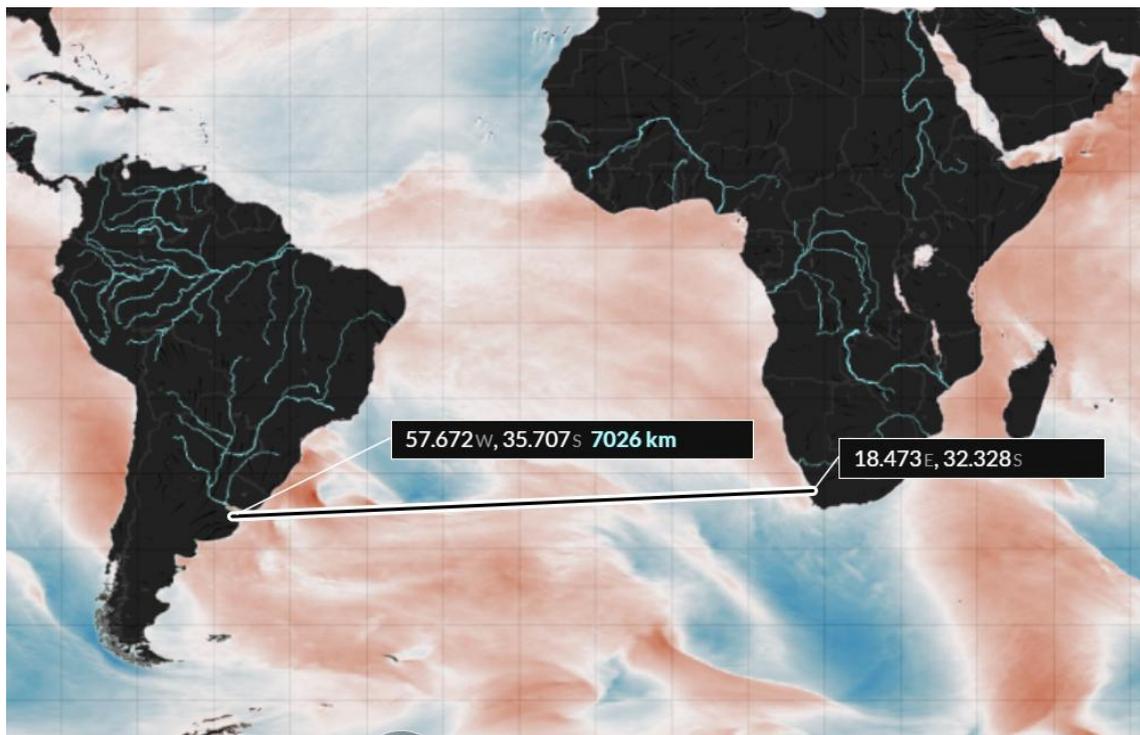


Figura 28 - Mapa de ruta CC-BA. Fuente: Copernicus.

A continuación, se expresan en los gráficos las variaciones del viento de norte, de este y la densidad del aire:



Figura 29 - Variación de viento de norte a lo largo de la ruta CC-BA

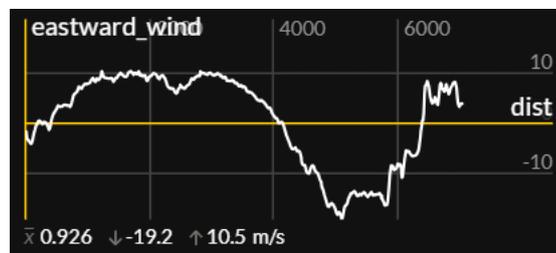


Figura 30 - Variación de viento de este a lo largo de la ruta CC-BA. Fuente: Copernicus.



Figura 31 - Variación de densidad del aire a lo largo de la ruta CC-BA. Fuente: Copernicus.

Tras realizar los cálculos descritos anteriormente en un documento de Excel, la velocidad de giro de los rotores óptima para este caso es de 180 rpm (18,85rad/s) en sentido horario.

Para esa velocidad de giro, se obtienen los siguientes resultados:

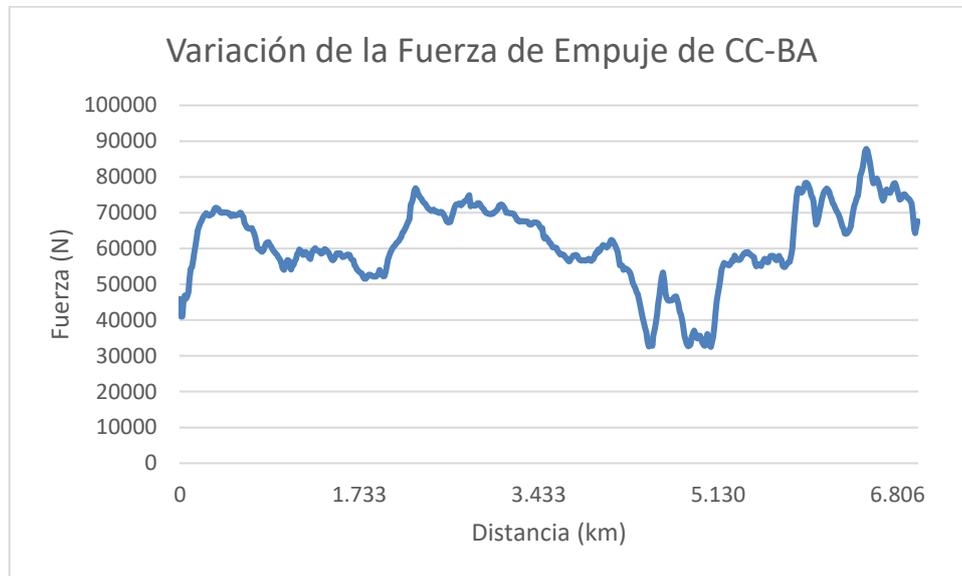


Figura 32 - Variación de la fuerza de empuje de CC-BA

Las fuerzas generadas son las siguientes:

$$F_e \text{ media por rotor} = 61,87 \text{ kN}$$

$$F_h \text{ media por rotor} = 41,37 \text{ kN}$$

Por tanto, la fuerza total generada a partir de los 3 rotores:

$$F_e \text{ media total} = 185,61 \text{ kN}$$

$$F_h \text{ media total} = 124,1 \text{ kN}$$

Debido al ajuste de la velocidad de giro para un buen balance entre fuerza de empuje y de escora, se considera que la fuerza de escora no genera un aumento significativo en la resistencia.

Por otro lado, la potencia eléctrica que necesita el rotor se calcula en base al par resistente medio obtenido a lo largo de la ruta, de 2270,37 y la velocidad de giro:

$$P_{rot \text{ media}} = M_m * \omega = 2270,37 * 18,85 = 42,8 \text{ kW}$$

Para evaluar la eficiencia de la tecnología, se compara la potencia que se ahorra el motor en transferir a los ejes gracias a esta instalación y la potencia necesaria para los rotores.

$$F_e = 185,61 \text{ kN}; R_t = 2,57 \text{ MN}; V = 10,29 \text{ m/s}; \eta_d = 0,648$$

Sin rotores:

$$P_{eje} = \frac{2,57 * 10,29}{0,648} \approx 40,82 \text{ MW}$$

Con rotores:

$$P_{eje} = \frac{(2,57 * 10^6 - 185,61 * 10^3) * 10,29}{0,648} \approx 37,86 \text{ MW}$$

En conclusión, se logra que el motor transfiera 2,96 MW menos de potencia en el eje, que es empuje que proviene de los rotores. Por otro lado, tiene que alimentar a los rotores con una potencia de 42,8 kW. Por tanto, la potencia neta ahorrada es de 2,917 MW.

5.7.4.2 Rotterdam (Países Bajos) – Nueva York (EEUU)

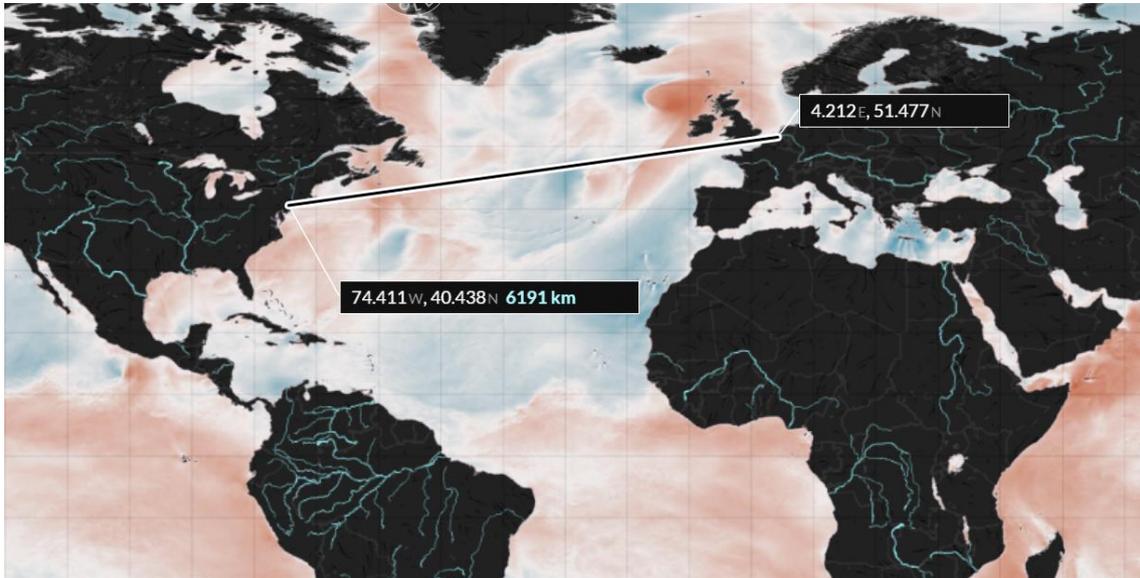


Figura 33 - Mapa de ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.



Figura 34 - Variación de viento de norte a lo largo de la ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.



Figura 35 - Variación de viento de este a lo largo de la ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.

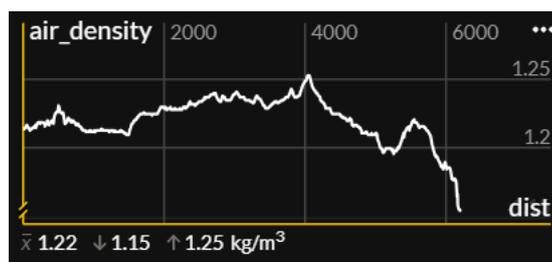


Figura 36 - Variación de densidad del aire a lo largo de la ruta RTM-NYC. Fuente: Copernicus.

En este caso, tras realizar los cálculos descritos anteriormente en un documento de Excel, la velocidad de giro de los rotores óptima para este caso es también de 180 rpm (18,85rad/s) en sentido horario. Las fuerzas generadas son las siguientes:

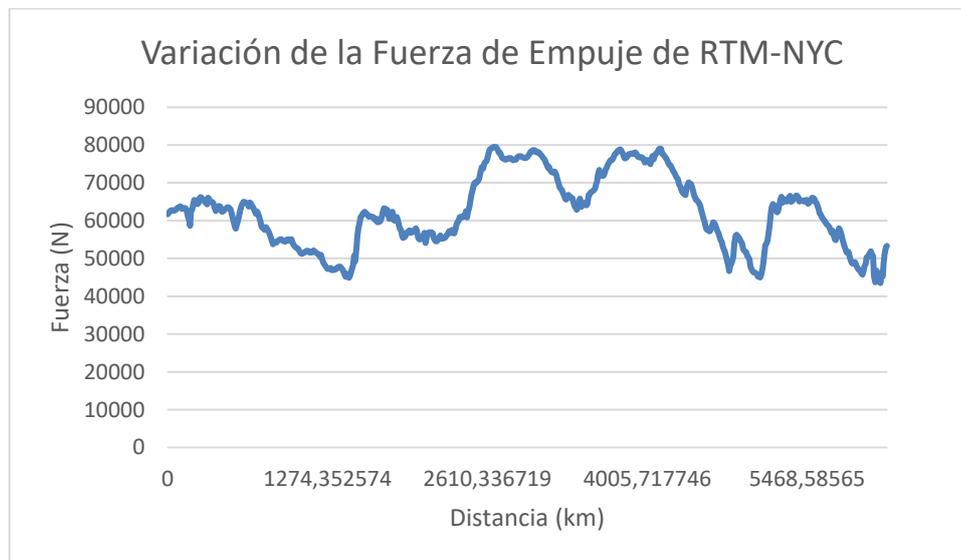


Figura 37 - Variación de la fuerza de empuje de RTM-NY

$$F_e \text{ media por rotor} = 62,26 \text{ kN}$$

$$F_h \text{ media por rotor} = 31,44 \text{ kN}$$

Por tanto, la fuerza total generada a partir de los 3 rotores:

$$F_e \text{ media total} = 186,78 \text{ kN}$$

$$F_h \text{ media total} = 94,32 \text{ kN}$$

Debido al ajuste de la velocidad de giro para un buen balance entre fuerza de empuje y de escora, se considera que la fuerza de escora no genera un aumento significativo en la resistencia.

Por otro lado, la potencia eléctrica que necesita el rotor se calcula en base al par resistente medio obtenido a lo largo de la ruta, de 1834,09 N y la velocidad de giro:

$$P_{rot\ media} = M_m * \omega = 1834,09 * 18,85 = 34,571kW$$

Para evaluar la eficiencia de la tecnología, se compara la potencia que se ahorra el motor en transferir a los ejes gracias a esta instalación y la potencia necesaria para los rotores.

$$F_e = 186,78\ kN; R_t = 2,57MN; V = 10,29m/s; \eta_d = 0,648$$

Sin rotores:

$$P_{eje} = \frac{2,57 * 10,29}{0,648} \approx 40,82MW$$

Con rotores:

$$P_{eje} = \frac{(2,57 * 10^6 - 186,78 * 10^3) * 10,29}{0,648} \approx 37,84\ MW$$

En conclusión, se logra que el motor transfiera 2,98 MW menos de potencia en el eje, muy similar al caso anterior. Por otro lado, tiene que alimentar a los rotores con una potencia de 34,57 kW. Por tanto, la potencia neta ahorrada es de 2,945 MW.

5.7.4.3 *Shanghái (China) – Los Ángeles (EEUU)*

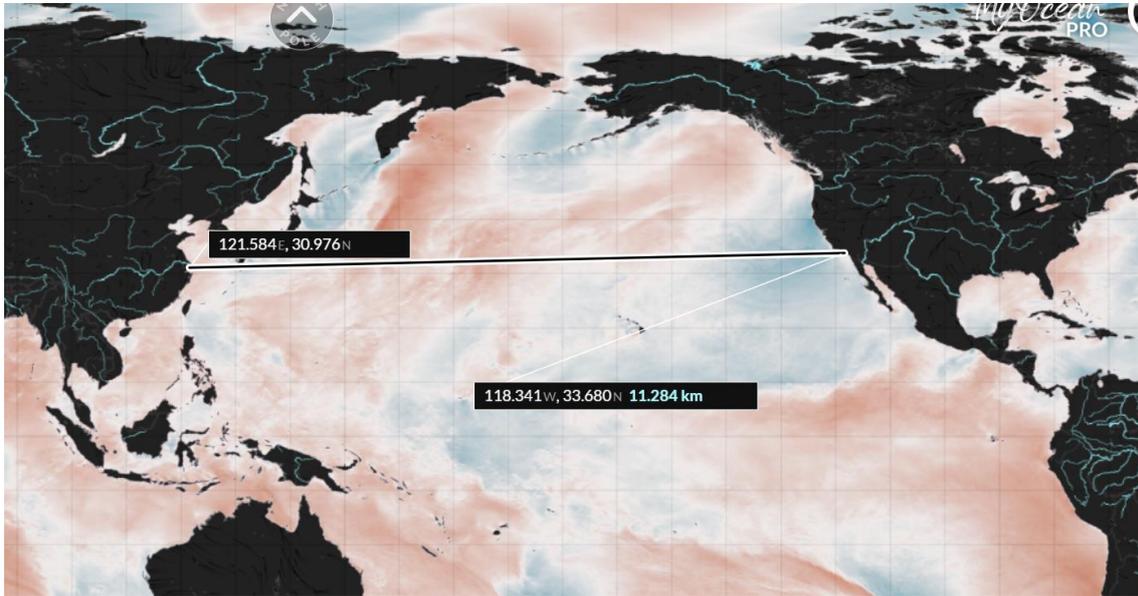


Figura 38 - Mapa de ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.



Figura 39 - Variación de viento de norte a lo largo de la ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.

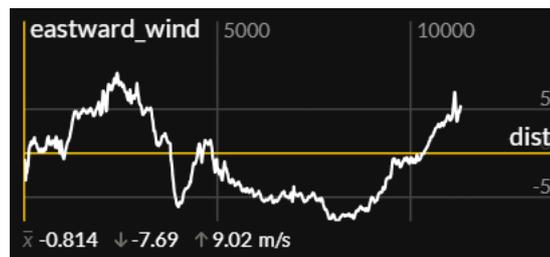


Figura 40 - Variación de viento de este a lo largo de la ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.



Figura 41 - Variación de densidad del aire a lo largo de la ruta SHA-LAX. Fuente: Copernicus.

Por último, en este caso, tras realizar los cálculos descritos anteriormente en un documento de Excel, la velocidad de giro de los rotores óptima para este caso es también de 170 rpm (17,8 rad/s) en sentido horario. Las fuerzas generadas son las siguientes:

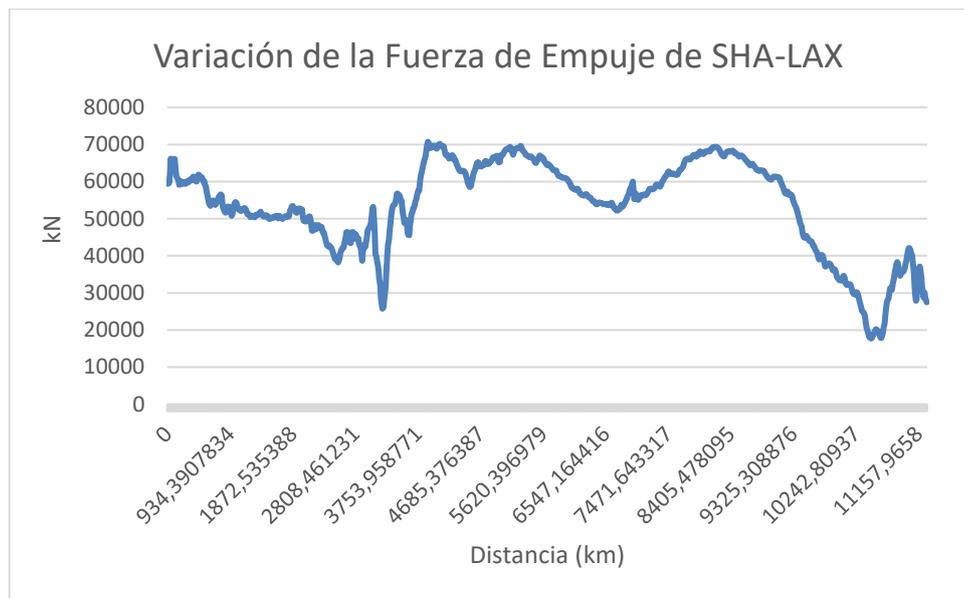


Figura 42 - Variación de la fuerza de empuje de SHA-LAX

$$F_e \text{ media por rotor} = 53,64 \text{ kN}$$

$$F_h \text{ media por rotor} = 24,92 \text{ kN}$$

Por tanto, la fuerza total generada a partir de los 3 rotores:

$$F_e \text{ media total} = 160,92 \text{ kN}$$

$$F_h \text{ media total} = 74,761 \text{ kN}$$

Debido al ajuste de la velocidad de giro para un buen balance entre fuerza de empuje y de escora, se considera que la fuerza de escora no genera un aumento significativo en la resistencia.

Por otro lado, la potencia eléctrica que necesita el rotor se calcula en base al par resistente medio obtenido a lo largo de la ruta, de 1505,72 N y la velocidad de giro:

$$P_{rot\ media} = M_m * \omega = 1505,72 * 17,8 = 26,801\ kW$$

Para evaluar la eficiencia de la tecnología, se compara la potencia que se ahorra el motor en transferir a los ejes gracias a esta instalación y la potencia necesaria para los rotores.

$$F_e = 160,92\ kN; R_t = 2,57\ MN; V = 10,29\ m/s; \eta_d = 0,648$$

Sin rotores:

$$P_{eje} = \frac{2,57 * 10,29}{0,648} \approx 40,82\ MW$$

Con rotores:

$$P_{eje} = \frac{(2,57 * 10^6 - 160,92 * 10^3) * 10,29}{0,648} \approx 38,26\ MW$$

En conclusión, se logra que el motor transfiera 2,56 MW menos de potencia en el eje, muy similar al caso anterior. Por otro lado, tiene que alimentar a los rotores con una potencia de 26,801 kW. Por tanto, la potencia neta ahorrada es de 2,533 MW.

5.7.5 CONCLUSIONES DEL ESCENARIO

Tabla 33 - Comparación de la eficiencia de los Rotor Sails en cada ruta

Ruta	F_e (kN)	Fh (kN)	P_{eje} (MW)	Prot (kW)
CC-BA	185,61	124,1	37,86 (-7,23%)	42,8

Rot-NY	186,78	94,32	37,84 (-7,28%)	34,57
Sh-LA	160,92	74,76	38,26 (-6,28%)	26,81

En los tres escenarios, los rotores consumen menos del 1,5 % del ahorro que generan, lo que confirma su altísima eficiencia energética como sistema de apoyo a la propulsión principal. Su rendimiento se mantiene estable entre rutas, aunque ligeramente condicionado por la orientación e intensidad del viento transversal. Esto refuerza la viabilidad técnica del sistema, sobre todo en trayectos con buen potencial eólico.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 COMPARACIÓN COMBUSTIBLES

Tabla 34 - Comparación de las emisiones entre HFO y Metanol

Escenario	0: Base (HFO)	1: Metanol
Emisión CO₂ (kg/h)	20.973,72	11.015,3
Emisión SO_x (kg/h)	363,71	130,5
Emisión NO_x (kg/h)	693,94	0,73
Emisión PM (kg/h)	8,825	0,55

En cuanto al impacto ambiental directo, el metanol muestra claros beneficios: reduce las emisiones de SO_x en un 64 %, NO_x en un 99,9 % y material particulado (PM) en un 94 % respecto al combustible convencional. Aunque en menor medida, las emisiones directas de CO₂ también se ven significativamente reducidas, con una caída del 47 %.

Sin embargo, al realizar el análisis, cabe destacar una limitación del índice EEDI. A pesar de la mejora ambiental, el EEDI empeora ligeramente al pasar de 14,98 a 15,55 g CO₂/t*nm. Esto sucede porque el índice mide la eficiencia energética por tonelada transportada. En el caso del metanol, el SFOC es elevado, debido a su bajo poder calorífico, lo que compensa la menor cantidad de carbono por kilo e incluso provoca un incremento del índice.

6.2 COMPARACIÓN MEJORAS HIDRODINÁMICAS

Tabla 35 - Comparación de las mejoras hidrodinámicas vs. las diferentes resistencia

Escenario	0: Base	3: Bulbo	4: ALDR + placas	Escenario 3+4
Resistencia friccional (kN)	1.044,6	1.044,6	706,82 (-32,36%)	706,82 (-32,36%)
Resistencia residual (kN)	1.524,97	926,63 (-39,23%)	1.524,97	926,63 (-39,23%)
Resistencia total (kN)	2.569,6	1.971,23 (-23,28%)	2.231,8 (-13,13%)	1633,15 (-36,45%)

Con el fin de añadir a la comparación la instalación de los rotores, dada la dependencia de esta tecnología a la ruta en cuestión, se escoge la ruta Rotterdam – Nueva York como ruta representativa.

No es posible calcular el ROI ya que solo se han tomado los datos del trayecto de ida, el de vuelta podría tener un rendimiento diferente. Sin embargo, ahorrando 43.238 €os por trayecto, en 50 trayectos se recupera la inversión, teniendo en cuenta los gastos de mantenimiento.

6.3 COMPARACIÓN MEDIDAS REGULATORIAS

- **EEDI**

El EEDI requerido para el caso del buque de estudio, dependiendo del factor de reducción, se especificó en el capítulo 5: Tabla 19 - EEDI requerido para el portacontenedores estudiado en cada fase. Hoy en día, el EEDI requerido para el buque en cuestión es de 12,03

Los Rotor Sails no se han incluido en esta parte ya que están muy condicionados por la ruta operativa.

Para cada mejora, se obtiene el siguiente EEDI:

Tabla 36 - Comparación EEDI obtenido en cada escenario

Escenario base (HFO)	14,98
Escenario 1: metanol	15,55
Escenario 2: bulbo	11,17
Escenario 3: lubricación por aire	13
Escenario 2+3	9,517

- **CII**

Según las tablas proporcionadas en el Anexo VI para el cálculo del CII, para un buque portacontenedores, el CII de referencia, según el factor de reducción, es el siguiente:

Tabla 37 - CII requerido para cada fase de reducción

Año	Factor de reducción (Z)	CII Requerido (g CO ₂ /t·mn)
2023	5%	8,64
2024	7%	8,45

2025	9%	8,27
2026	11%	8,09

Entonces, según los vectores d para portacontenedores de Tabla 8 - Vector d para cada buque, quedan las calificaciones según los siguientes rangos:

Tabla 38 - Rango de CII específico del portacontenedores para cada calificación

Año	CII Requerido (g CO ₂ /t·mn)	A	B	C	D	E
2023	8,64	≤ 7,17	(7,17; 8,12)	(8,12; 9,24)	(9,24;10,28)	> 10,28
2024	8,45	≤ 7,01	(7,01; 7,94)	(7,94; 7,94)	(7,94; 10,05)	> 10,05
2025	8,27	≤ 6,86	(6,86; 7,78)	(7,78; 8,85)	(8,85; 9,83)	> 9,83
2026	8,09	≤ 6,71	(6,71;7,61)	(7,61; 8,66)	(8,66; 9,62)	> 9,62

Por tanto, se estiman condiciones operativas de 20 trayectos (solo ida) de Rotterdam a Nueva York al año. Al ser aproximadamente 3.800 millas náuticas, a 20 nudos resulta en 3.800 horas reales de navegación al año. Por tanto, incluyendo las calificaciones impuestas para 2026:

Tabla 39 - Comparación de CII en cada escenario

CII (g CO ₂ / t·nm)	Escenario base (HFO)	Escenario 1: metanol
Escenario base	14,98 (E)	7,87 (C)
Escenario 2: bulbo	11,49 (E)	6,04 (A)
Escenario 3: ALDR + placas	13,01 (E)	6,83 (A)
Escenario 4: Rotor Sails	13,89 (E)	7,30 (B)
Escenario 2+3	9,52 (D)	5,00 (A)
Escenario 2+4	10,66 (E)	5,60 (A)
Escenario 3+4	12,07 (E)	6,34 (A)
Escenario 2+3+4	8,83 (C)	4,64 (A)

En el caso de los Rotor Sails, se ha tenido en cuenta la potencia necesaria para hacer rotar la vela: el trayecto es de aproximadamente 3.800nm, que, a 20 nudos, son 190 horas. Esto supone que la energía total que van a emplear los rotores es de:

$$E = 34,57kW * 190h = 6.568kWh$$

Se supone que la energía proviene del HFO. Aproximando el SFOC del generador auxiliar igual al del generador principal (165g/kWh), se necesitan 1.087,7 kg de HFO.

6.4 COMPARACIÓN ECONÓMICA

Tabla 40 - Coste de uso de metanol como combustible

€	Coste de instalación	Coste combustible

Escenario base	-	460 €/t
Escenario 1: metanol	16.448.827	Biometanol: 644€/t E-metanol: 920 €/t

Tabla 41 - Comparación de costes entre tecnologías

€	Coste de instalación (€)	Coste de mantenimiento (€/año)
Escenario 2: bulbo	553.125	5.531
Escenario 3: ALDR + placas	1.775.000	111.200
Escenario 4: Rotor Sails	1.959.600	144.000

El Retorno de Inversión (ROI) se mide calculando el ahorro de combustible que te genera la nueva tecnología implantada, y se estima el tiempo que tarda ese coste en devolver la inversión. Se mide en base a un año. Para la estimación, se supone el coste del combustible medio en 2024, de 500USD/t, es decir, 460 €/t. Además, se ha aproximado linealmente el ahorro de combustible a la reducción de resistencia total.

No se ha añadido el uso de metanol porque tanto el combustible como la reforma del motor tienen un precio mayor al del HFO, por lo que nunca se recuperaría la inversión.

Tabla 42 - Comparación de ROI para cada escenario

Escenario base	-
Escenario 2: bulbo	0,55

Escenario 3: ALDR + placas	1,23
Escenario 4: Rotor Sails	2,72
Escenario 2+3	0,95
Escenario 2+4	1,46
Escenario 3+4	1,72
Escenario 2+3+4	1,35

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este trabajo se ha llevado a cabo un análisis técnico y económico de distintas tecnologías orientadas a la mejora de la sostenibilidad del transporte marítimo, evaluando tanto soluciones hidrodinámicas como emplear otros combustibles. Las principales conclusiones obtenidas se resumen a continuación:

7.1 EL BULBO OPTIMIZADO: LA MEJORA MÁS EFICAZ

La instalación de un bulbo de proa rediseñado ha demostrado ser la solución más eficiente tanto desde el punto de vista hidrodinámico como económico. Con una reducción de la resistencia residual del 39,2% y de la resistencia total del 23,3%, esta medida permite disminuir significativamente el consumo energético del buque.

Desde el punto de vista económico, presenta un retorno de la inversión (ROI) muy favorable de 0,55 años, lo que implica que la inversión se recupera en poco más de medio año de operación. Además, esta sola mejora permite que el buque cumpla el valor EEDI establecido desde 2022 hasta hoy, lo que la convierte en una solución técnicamente viable y económicamente asequible a corto plazo.

7.2 SISTEMAS DE LUBRICACIÓN POR AIRE Y PLACAS REDUCTORAS

Los sistemas de lubricación por aire combinados con placas reductoras reducen un 32,4% la resistencia friccional, lo que los posiciona como una mejora hidrodinámica muy interesante. Aún así, tiene un menor impacto en la eficiencia del buque, e implementar únicamente esta mejora no logra cumplir con el EEDI establecido hoy en día. Además, se necesita una instalación mucho más compleja y costosa a comparación con el bulbo optimizado, con un retorno de inversión de 1,23 años, aunque aún se considera dentro de los márgenes razonables de amortización.

7.3 COMBINACIÓN DE BULBO + SISTEMAS DE LUBRICACIÓN POR AIRE Y PLACAS REDUCTORAS

Una combinación de las dos tecnologías anteriores, se obtiene un resultado de mejora muy significativa. Se logra reducir la resistencia total un 36,5%. Esta combinación no solo permite cumplir con los objetivos de eficiencia energética del EEDI, sino que también resulta económicamente viable, con un ROI de 0,95 años.

7.4 ROTOR SAILS

El uso del viento como fuerza complementaria al motor puede llegar a ser muy útil. En las rutas seleccionadas, se ha observado que proporcionan entre el 6% y el 8% de la potencia que necesita el buque. En situaciones óptimas, puede ser considerablemente mayor.

Sin embargo, es una medida muy costosa de implementar, con un ROI de 2,72 años, lo que implica una recuperación lenta de la inversión inicial frente a otras mejoras estudiadas.

Por tanto, para implementar esta tecnología, previamente debe evaluarse al caso específico de la ruta operativa, ya que depende en gran medida de la intensidad, dirección y estabilidad del viento. También es recomendable estudiar una optimización de la planificación de las rutas para sacar el máximo provecho las velas.

Una posible limitación de las estimaciones de este estudio es que no se ha llevado un análisis estacional completo, por lo que no se tienen en cuenta variaciones que pueden suceder a lo largo del año, lo que podría alterar significativamente los resultados obtenidos. Además, se ha impuesto una velocidad de giro constante, cuando en casos reales se puede ajustar en cada momento a la intensidad del viento.

7.5 IMPACTO DEL COMBUSTIBLE SOBRE EL CII

En el análisis del índice de intensidad de carbono (CII), los resultados obtenidos indican que las mejoras hidrodinámicas no son suficientes por sí solas para cumplir con los estándares ambientales si se continúa utilizando fuelóleo pesado (HFO). Incluso en el escenario más optimizado (combinación de bulbo y ALDR), la calificación obtenida bajo uso de HFO es de D o E, lo que implica un incumplimiento de la normativa vigente, y una necesidad de cambio futura.

Sin embargo, el cambio a metanol como combustible principal mejora automáticamente la calificación del CII a B, incluso sin aplicar ninguna mejora hidrodinámica adicional. Este hallazgo demuestra que la elección del combustible es un factor determinante en la sostenibilidad ambiental del buque.

7.6 EL METANOL COMO COMBUSTIBLE

Los combustibles alternativos, en general, permiten reducir de forma sustancial las emisiones contaminantes del transporte marítimo. En el caso del metanol, reduce prácticamente a cero las emisiones de NOx y de partículas, además de reducir casi un tercio las emisiones de SOx y prácticamente a la mitad las de CO2.

Se ha estudiado el metanol por ser el combustible más viable a corto plazo, como su menor complejidad en almacenamiento y conversión de los motores existentes. Sin embargo, el análisis económico realizado en el presente estudio pone de manifiesto barreras importantes que limitan su aplicación inmediata a gran escala:

- El coste de conversión a metanol para un buque como el analizado se estima en torno a 16,5 millones de euros, una inversión considerable que requiere amortización a medio-largo plazo.

- El precio actual del metanol, ya sea biometanol p e-metanol, es sensiblemente superior al del HFO, lo que complica alcanzar retornos de inversión positivos en condiciones operativas normales.

Aunque el uso de este combustible reciba ayudas económicas, el costo actual es tan alto que es prácticamente inviable a corto plazo. Siendo este el más fácil de adaptar, se llega a la conclusión de que, aunque los combustibles alternativos resultan tecnológicamente prometedores y medioambientalmente muy beneficiosos, su aplicación práctica hoy en día está muy lejos de ser suficientemente maduras para su adopción generalizada.

Además, el metanol presenta un mayor EEDI que el HFO. Sin embargo, el alcance de este índice se limita exclusivamente a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de carga transportada por milla náutica. Este enfoque no contempla la reducción de otros contaminantes atmosféricos relevantes, como los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) o partículas (PM), cuyo impacto ambiental es significativo, especialmente en zonas costeras o áreas ECA.

En este sentido, combustibles alternativos como el metanol pueden presentar valores de EEDI menos favorables que los del fuelóleo pesado (HFO) debido a su mayor consumo específico (SFOC) y menor poder calorífico, lo que implica una mayor cantidad de CO₂ emitida por unidad de carga transportada. Además, si su origen es renovable (como el e-metanol o biometanol), las emisiones netas de CO₂ a lo largo del ciclo de vida pueden ser considerablemente menores.

Por tanto, una posible limitación del EEDI, al centrarse únicamente en el CO₂ directo, es que no captura el verdadero potencial ambiental de los combustibles limpios. Por este motivo, otros indicadores que consideren múltiples variables de impacto (como emisiones well-to-wake) podrían ser más útiles en un futuro.

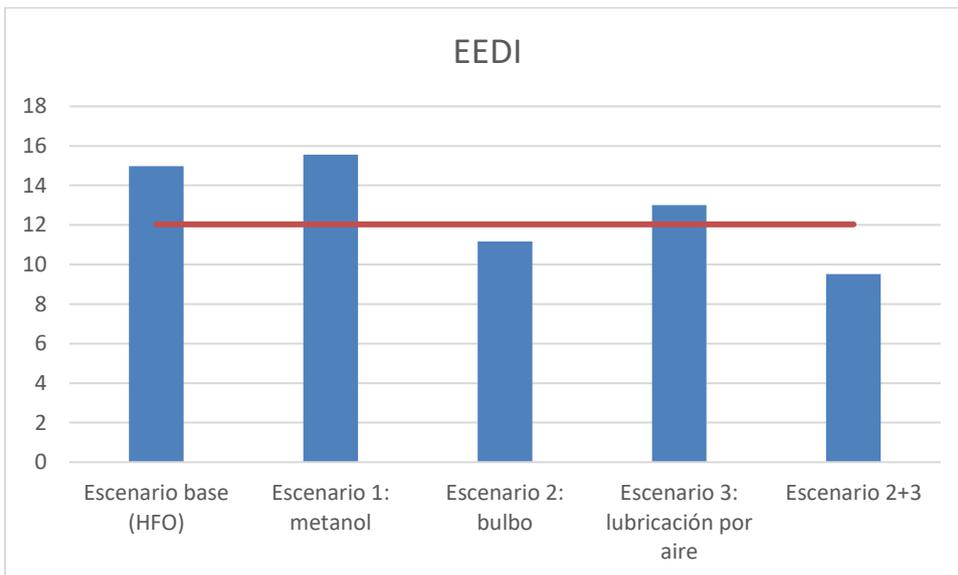
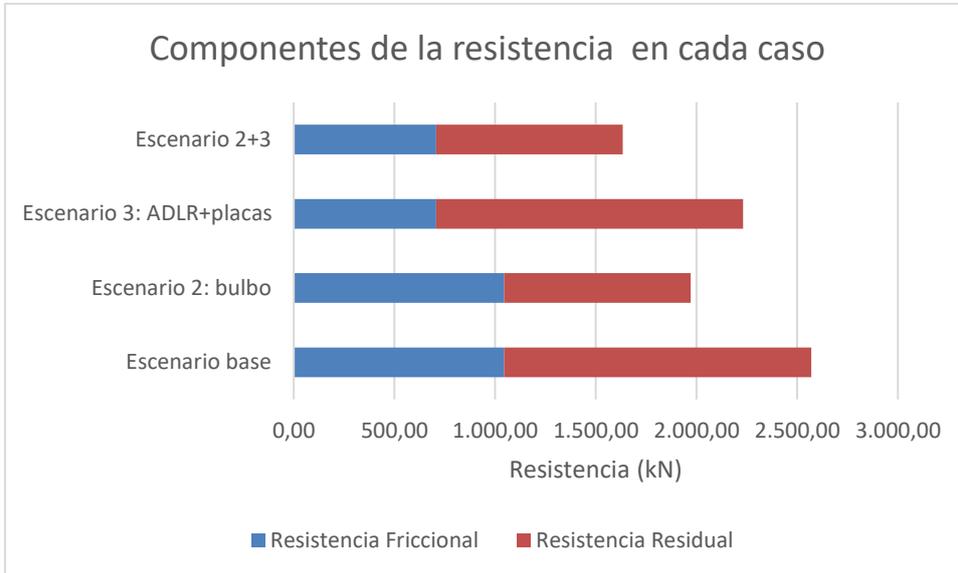
7.7 TRABAJOS FUTUROS

7.7.1 GNL

Ante la necesidad actual impuesta por exigencias regulatorias como el EEDI y el CII de reducir emisiones, se propone que futuros estudios exploren con mayor profundidad soluciones de transición como el gas natural licuado (GNL). Esta alternativa ya está siendo implementada por muchas navieras, presenta un coste de implementación inferior al del metanol y ofrece una reducción significativa de emisiones respecto al HFO, aunque no alcance la neutralidad climática. A corto plazo, el GNL puede representar una solución factible para cumplir con los requisitos ambientales mientras se continúa avanzando hacia la adopción masiva de combustibles verdaderamente sostenibles.

7.7.2 ROTOR SAILS

Simular de manera mas detallada las condiciones atmosféricas y el efecto de ellas en la tecnología. Futuras investigaciones podrían incluir datos meteorológicos históricos completos, como dirección e intensidad del viento, oleaje o temperatura, para realizar simulaciones más realistas. Evaluar variaciones horarias, estacionales o anuales de vientos para estudiar la eficiencia propulsiva y consumo. Aplicar modelos de optimización de ruta (weather routing) para maximizar el rendimiento de tecnologías como las velas de rotor. calculando rutas optimizadas y una velocidad de giro efectiva



Bibliografía

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Infopuertos, «La OMI aprueba una nueva Zona de Control de Emisiones en el Atlántico Norte,» *infopuertos*, 2025. <https://infopuertos.com/omi-nueva-zona-control-emisiones-atlantico-norte/>
- [2] Organización Marítima Internacional (OMI). “Nitrogen oxides (NO_x) – Regulation 13“. Página web institucional. IMO. s.f. [https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx)
- [3]
- [4] V. Nautical, «EEDI & EEXI,» Veson Nautical.
- [5] J. Barreiro, S. Zaragoza y V. Diaz-Casas, «Review of ship energy efficiency,» *Ocean Engineering*, 2022.
- [6] O. M. I. (OMI), «“Resolution MEPC.353(78) – 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2)”,» IMO, 2022 .
- [7] A. Gray, « “Cinco gráficos que explican el Acuerdo de París sobre el clima“,» *Foro Económico Mundial – Foro Agenda*, 2016.
- [8] C. Eopea, « Delivering the Eopean Green Deal.,» Comisión Eopea. [En línea]. [Último acceso: 2025 04 10].

- [9] P. Eoepo, «“Avances de la UE en la lucha contra el cambio climático“,» Eoepan Parliament, Estrasburgo, Francia, 2018.
- [10] E. C. -. D.-G. f. M. a. Transport, «“Decarbonising maritime transport – FuelEU Maritime“,» Comisión Eoepa, Bruselas, Bélgica.
- [11] E. C. -. D.-G. f. C. Action, «“EU Emissions Trading System (EU ETS)“,» *Comisión Eoepa*.
- [12] O. M. I. (OMI), «“Reducing greenhouse gas emissions from ships“,» IMO, Londres.
- [13] C. G. M. Products, «“Everything You Need To Know About Marine Fuels“,» Chevron Global Marine Products, 2021.
- [14] J. H. Evans, “Basic Design Concepts“, Naval Engineers Journal, 1959.
- [15] S. Logistic, «“Gigantismo en los buques portacontenedores: tendencias y retos en el futuro“,» Stock Logistic, 2022.
- [16] J. Charchalis, «“Ship design parameters: An analysis“,» *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, 2018.
- [17] M. Insight, «“Understanding Block Coefficient of a Ship“,» Marine Insight.
- [18] K. Lehtoranta, N. Kuittinen, H. Vesala y P. Koponen, «“Methane emissions from a state-of-the-art LNG-powered vessel“,» *Atmosphere*, 2023.
- [19] T. Grönholm, T. Mäkelä, J. Hatakka, J.-P. Jalkanen, J. Kuula, T. Laurila, L. Laakso y J. Kukkonen, «“Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station“,» *Environmental Science & Technology*, 2021.

- [20] SEA-LNG, «“Methane slip being eliminated as LNG uptake accelerates“,» SEA-LNG, 2024.
- [21] M. p. l. T. E. y. e. R. D. (MITECO), « “Hidrógeno“,» MITECO, España.
- [22] L. Van Hoecke, L. Jablonka, S. Krishnamurthy, J. Schwartzenberg, J.-L. Reymond y A. Aspuru-Guzik, « “Machine learning–accelerated high-throughput materials discovery for clean energy generation and storage“,» Energy & Environmental Science, 2021.
- [23] I. R. E. A. (IRENA), « “Green hydrogen: A guide to policy making“,» IRENA, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, 2020.
- [24] I. R. E. A. (IRENA), « “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal“,» IRENA, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unido, 2020.
- [25] V. Zhaka y B. Samuelsson, «“Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production to propulsion“,» Energy Reports, 2024.
- [26] T. Elammas, «“Hydrogen fuel cells for marine applications: Challenges and opportunities“,» International Journal of Advanced Research, 2023.
- [27] A. Chavando, V. Silva, J. Cardoso y D. Eusebio, «“Advancements and Challenges of Ammonia as a Sustainable Fuel for the Maritime Industry“,» Energies, 2024.
- [28] H. Moon, M. Alnajideen, H. Shi, W. Northrop, D. Emberson, S. Kane, P. Czyzewski, M. Alnaeli, S. Mashruk, K. Rouwenhorst, C. Yu, S. Eckart y A. Valera-Medina, «“Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review“,» Carbon Neutrality, 2024.

- [29] A. Panchuk, M. Panchuk, A. Śładkowski, S. Krysh-topā y L. Krysh-topa, «Methanol Potential as an Environmentally Friendly Fuel for Ships,» Naše more, 2024.
- [30] T. E. Handbook, «Ship Form Coefficients,» The Engineering Handbook.
- [31] R. Pieper, «“Bulbous bow analysis”,» 2023.
- [32] F. Pérez y J. Suárez Suárez, «“Geometric modelling of bulbous bows with the use of non-uniform rational B-spline surfaces“,» Journal of Marine Science and Technology, 2007.
- [33] N. Hazarika, «“Resistance comparison of container ship with bulbous bow & without bulbous bow”,» 2018.
- [34] T. Le, T. Tran, L. Kian, H. Chua y K. Shah, «"Effects of a Bulbous Bow Shape on Added Resistance Acting on the Hull of a Ship in Regular Head Wave”,» Journal of Marine Science and Engineering, 2021.
- [35] W. Corporation, «“Rotor Sail Technology”».
- [36] N. Kühn, «“Efficient numerical quantification of Flettner rotor installations”,» arXiv, 2025.
- [37] Y. Z. J. Wang, W. Li, Y. Zhang y Y. Ma, «“Analysis on the Development of Wind-assisted Ship Propulsion Technology and Contribution to Emission Reduction”,» IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022.
- [38] R. Lu y J. W. Ringsberg, «“Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology”,» Taylor & Francis (Ships and Offshore Structures), 2020.

- [39] J. Jiao y S. Huang, «“CFD-based numerical simulation and investigation of hydrodynamic behavior of wave-piercing monohulls”,» Ship Building of China, 2021.
- [40] I. M. O. (IMO), «“Fourth IMO GHG Study 2020 – Full report and annexes”,» IMO, Londres, 2020.
- [41] V. Bertram, «“Practical Ship Hydrodynamics“,» Butterworth-Heinemann , Oxford, 2012.
- [42]
- [43] V. Mrzljak, B. Žarković y J. Prpić-Oršić, «Marine slow speed two-stroke diesel engine – numerical analysis of efficiencies and important operating parameters“,» International Scientific Journal, 2017.
- [44] M. Services, «“Physical and thermal properties for various fuels and substances“,» EnergyFaculty.
- [45] M. E. Solutions, «“Marine Engine Programme 2019“,» MAN Energy Solutions, 2019.
- [46] B. Comer y L. Osipova, «“Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies“,» International Council on Clean Transportation Briefing, 2021.
- [47] F. Dettner y S. Hilpert, «“Emission Inventory for Maritime Shipping Emissions in the North and Baltic Sea“,» vol. 8, 2023.
- [48] O. M. I. (OMI), «Amendments to MARPOL Annex VI (Procedures for sampling and verification of the sulphur content of fuel oil and the Energy Efficiency Design Index (EEDI))”,» Resolución MEPC.324(75), Londres, 2020.

- [49] S. & Bunker, « “Annual average bunker price at key hubs mostly flat in 2024“,» Ship & Bunker, 2025.
- [50] J. Mahía-Prados, I. Arias-Fernández, M. Romero Gómez y S. Pereira, «“Feasibility Analysis of the New Generation of Fuels in the Maritime Sector”,» Fuels, 2025.
- [51] M. E. Solutions, «“Methanol fuel for the maritime industry”,» MAN Energy Solutions , Augsburg, Alemania.
- [52] M. Institute, «“Marine Methanol: Future-Proof Shipping Fuel”,» Methanol Institute, 2023 .
- [53] S. Khaled, I. Seddiek y M. M. Elgohary, «“Methanol as an Eco-Environmental Alternative Fuel for Ships: A Case Study”,» Journal of Marine Science and Technology, 2023.
- [54] M. Bortnowska, «Projected Reductions in CO2 Emissions by Using Alternative Methanol Fuel to Power a Service Operation Vessel,» Energies, 2023.
- [55] Y. Wang y L. A. Wright, «“A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation”,» World (MDPI), 2021.
- [56] M. E. Solutions, «The methanol-fuelled MAN B&W LGIM engine,» Copenhagen, Dinamarca.
- [57] Y. Denev, «Retrofitting the bow of a general cargo vessel and evaluating Energy Efficiency Operational Index,» *Polish Maritime Research*, vol. 30, nº 1 (117), 2023.
- [58] O. P. S. R. Sharma, «Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships,» *Naval Engineers Journal*, 2008.

- [59] J. M. Gordo, «Hull's manufacturing cost structure,» *Brodogradnja*, 2017.
- [60] S. S. Youngrong Kim, «Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships,» *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2023.
- [61] H. An, H. Pan y P. Yang, «Research Progress of Air Lubrication Drag Reduction Technology for Ships,» *Fluids (MDPI)*, 2022.
- [62] S. Universe, «Cost/Install Breakdown: Air Lubrication Systems,» 2024.
- [63] K. D. (. E. N. F. (. E. C. W. B. Matthew Bell (Frontier Economics), A. Chase y C. Lewis, «Economic Opportunities for Low and Zero Emission Shipping: Technical and Economic Analysis,» *StudyLib*, 2019.
- [64] A. M. Technologies, «Anemoi Rotor Sails – Wind Propulsion for Commercial Shipping,» 2024.
- [65] B. K. C. A. N. M. S.J. Karabelas, «High Reynolds number turbulent flow past a rotating cylinder,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 32, nº 1, 2011.
- [66] C. M. E. M. Service, «Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model (WIND_GLO_PHY_L4_NRT_012_004)».
- [67] P. G. C. W. A. B. A. F. P. S. R. W. Michael Traut, «Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes,» *Energy*, vol. 73, p. 404–414, 2013.
- [68] S. M. M. B. G. Angelini, «A Techno-Economic Analysis of a Cargo Ship Using Flettner Rotors,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, nº 1, 2023.
- [69]

[70]

[71]

[72]

[73]

[74]

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Infopuertos, «La OMI aprueba una nueva Zona de Control de Emisiones en el Atlántico Norte,» *infopuertos*, 2025. <https://infopuertos.com/omi-nueva-zona-control-emisiones-atlantico-norte/>
- [2] Organización Marítima Internacional (OMI). “Nitrogen oxides (NO_x) – Regulation 13“. Página web institucional. IMO. s.f. [https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx)
- [3] Organización Marítima Internacional (OMI). “Amendments to MARPOL Annex VI (Procedures for sampling and verification of the sulphur content of fuel oil and the Energy Efficiency Design Index (EEDI))“. Resolución MEPC.324(75). Noviembre, 2020. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.324\(75\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.324(75).pdf)
- [4] Veson Nautical. “EEDI & EEXI“. Página web institucional. s.f. <https://help.veson.com/vesselsvalue/eedi-eexi>
- [5] J. Barreiro, S. Zaragoza y V. Diaz-Casas, «Review of ship energy efficiency,» *Ocean Engineering*, 2022.
- [6] Organización Marítima Internacional (OMI), «“Resolution MEPC.353(78) – 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2)”», IMO, 2022 . [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.353\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.353(78).pdf)

- [7] A. Gray, « “Cinco gráficos que explican el Acuerdo de París sobre el clima“,» *Foro Económico Mundial – Foro Agenda*, 2016.
<https://es.weforum.org/stories/2016/11/cinco-graficos-que-explican-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-clima/>
- [8] C. Europea, « Delivering the European Green Deal.,» Comisión Europea. [En línea]. [Último acceso: 2025 04 10].
- [9] P. Europeo, «“Avances de la UE en la lucha contra el cambio climático“,» European Parliament, Estrasburgo, Francia, 2018.
- [1 E. C. – D.-G. f. M. a. Transport, «“Decarbonising maritime transport – FuelEU
0] Maritime“,» Comisión Europea, Bruselas, Bélgica.
- [1 E. C. – D.-G. f. C. Action, «“EU Emissions Trading System (EU ETS)“,» *Comisión
1] Europea*.
- [1 O. M. I. (OMI), «“Reducing greenhouse gas emissions from ships“,» IMO, Londres.
2]
- [1 C. G. M. Products, «“Everything You Need To Know About Marine Fuels“,» Chevron
3] Global Marine Products, 2021.
- [1 J. H. Evans, “Basic Design Concepts“, *Naval Engineers Journal*, 1959.
4]
- [1 S. Logistic, «“Gigantismo en los buques portacontenedores: tendencias y retos en el
5] futuro“,» *Stock Logistic*, 2022.
- [1 J. Charchalis, «"Ship design parameters: An analysis“,» *Scientific Journal of Polish
6] Naval Academy*, 2018.

- [1 M. Insight, «“Understanding Block Coefficient of a Ship“,» Marine Insight.
7]
- [1 K. Lehtoranta, N. Kuittinen, H. Vesala y P. Koponen, «“Methane emissions from a
8] state-of-the-art LNG-powered vessel“,» Atmosphere, 2023.
- [1 T. Grönholm, T. Mäkelä, J. Hatakka, J.-P. Jalkanen, J. Kuula, T. Laurila, L. Laakso y J.
9] Kukkonen, «“Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on
the measurements at a remote marine station“,» Environmental Science & Technology,
2021.
- [2 SEA-LNG, «“Methane slip being eliminated as LNG uptake accelerates“,» SEA-LNG,
0] 2024.
- [2 M. p. l. T. E. y. e. R. D. (MITECO), « “Hidrógeno“,» MITECO, España.
1]
- [2 L. Van Hoecke, L. Jablonka, S. Krishnamurthy, J. Schwartzberg, J.-L. Reymond y A.
2] Aspuru-Guzik, « “Machine learning–accelerated high-throughput materials discovery
for clean energy generation and storage“,» Energy & Environmental Science, 2021.
- [2 I. R. E. A. (IRENA), « “Green hydrogen: A guide to policy making“,» IRENA, Abu
3] Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, 2020.
- [2 I. R. E. A. (IRENA), « “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to
4] Meet the 1.5°C Climate Goal“,» IRENA, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unido, 2020.
- [2 V. Zhaka y B. Samuelsson, «“Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production
5] to propulsion“,» Energy Reports, 2024.

- [2 T. Elammas, «“Hydrogen fuel cells for marine applications: Challenges and
6] opportunities“,» International Journal of Advanced Research, 2023.
- [2 A. Chavando, V. Silva, J. Cardoso y D. Eusebio, «“Advancements and Challenges of
7] Ammonia as a Sustainable Fuel for the Maritime Industry“,» Energies, 2024.
- [2 H. Moon, M. Alnajideen, H. Shi, W. Northrop, D. Emberson, S. Kane, P. Czyzewski,
8] M. Alnaeli, S. Mashruk, K. Rouwenhorst, C. Yu, S. Eckart y A. Valera-Medina,
«“Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review“,» Carbon
Neutrality, 2024.
- [2 A. Panchuk, M. Panchuk, A. Śładkowski, S. Kryshtopā y L. Kryshtopa, «Methanol
9] Potential as an Environmentally Friendly Fuel for Ships,» Naše more, 2024.
- [3 T. E. Handbook, «Ship Form Coefficients,» The Engineering Handbook.
0]
- [3 R. Pieper, «“Bulbous bow analysis”,» 2023.
1]
- [3 F. Pérez y J. Suárez Suárez, «“Geometric modelling of bulbous bows with the use of
2] non-uniform rational B-spline surfaces“,» Journal of Marine Science and Technology,
2007.
- [3 N. Hazarika, «“Resistance comparison of container ship with bulbous bow & without
3] bulbous bow”,» 2018.
- [3 T. Le, T. Tran, L. Kian, H. Chua y K. Shah, «"Effects of a Bulbous Bow Shape on
4] Added Resistance Acting on the Hull of a Ship in Regular Head Wave”,» Journal of
Marine Science and Engineering, 2021.

- [3 W. Corporation, «“Rotor Sail Technology”».
5]
- [3 N. Kühl, «“Efficient numerical quantification of Flettner rotor installations”,» arXiv,
6] 2025.
- [3 Y. Z. J. Wang, W. Li, Y. Zhang y Y. Ma, «“Analysis on the Development of Wind-
7] assisted Ship Propulsion Technology and Contribution to Emission Reduction”,» IOP
Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022.
- [3 R. Lu y J. W. Ringsberg, «“Ship energy performance study of three wind-assisted ship
8] propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology”,»
Taylor & Francis (Ships and Offshore Structures), 2020.
- [3 J. Jiao y S. Huang, «“CFD-based numerical simulation and investigation of
9] hydrodynamic behavior of wave-piercing monohulls”,» Ship Building of China, 2021.
- [4 I. M. O. (IMO), «“Fourth IMO GHG Study 2020 – Full report and annexes”,» IMO,
0] Londres, 2020.
- [4 V. Bertram, «“Practical Ship Hydrodynamics» Butterworth-Heinemann , Oxford, 2012.
1]
- [4
2]
- [4 V. Mrzljak, B. Žarković y J. Prpić-Oršić, «Marine slow speed two-stroke diesel engine
3] – numerical analysis of efficiencies and important operating parameters“,» International
Scientific Journa, 2017.

- [4 M. Services, «“Physical and thermal properties for various fuels and substances“,»
4] EnergyFaculty.
- [4 M. E. Solutions, «“Marine Engine Programme 2019“,» MAN Energy Solutions, 2019.
5]
- [4 B. Comer y L. Osipova, «“Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent
6] emissions in maritime transportation climate policies“,» International Council on Clean
Transportation Briefing, 2021.
- [4 F. Dettner y S. Hilpert, «“Emission Inventory for Maritime Shipping Emissions in the
7] North and Baltic Sea“,» vol. 8, 2023.
- [4 O. M. I. (OMI), «“Amendments to MARPOL Annex VI (Procedures for sampling and
8] verification of the sulphur content of fuel oil and the Energy Efficiency Design Index
(EEDI)”,» Resolución MEPC.324(75), Londres, 2020.
- [4 S. & Bunker, « “Annual average bunker price at key hubs mostly flat in 2024“,» Ship
9] & Bunker, 2025.
- [5 J. Mahía-Prados, I. Arias-Fernández, M. Romero Gómez y S. Pereira, «“Feasibility
0] Analysis of the New Generation of Fuels in the Maritime Sector”,» Fuels, 2025.
- [5 M. E. Solutions, «“Methanol fuel for the maritime industry”,» MAN Energy Solutions
1] , Augsburg, Alemania.
- [5 M. Institute, «“Marine Methanol: Future-Proof Shipping Fuel”,» Methanol Institute,
2] 2023 .

- [5 S. Khaled, I. Seddiek y M. M. Elgohary, «“Methanol as an Eco-Environmental
3] Alternative Fuel for Ships: A Case Study”,» *Journal of Marine Science and Technology*,
2023.
- [5 M. Bortnowska, «Projected Reductions in CO2 Emissions by Using Alternative
4] Methanol Fuel to Power a Service Operation Vessel,» *Energies*, 2023.
- [5 Y. Wang y L. A. Wright, «“A Comparative Review of Alternative Fuels for the
5] Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy
Implementation”,» *World (MDPI)*, 2021.
- [5 M. E. Solutions, «The methanol-fuelled MAN B&W LGIM engine,» Copenhagen,
6] Dinamarca.
- [5 Y. Denev, «Retrofitting the bow of a general cargo vessel and evaluating Energy
7] Efficiency Operational Index,» *Polish Maritime Research*, vol. 30, nº 1 (117), 2023.
- [5 O. P. S. R. Sharma, «Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships,»
8] *Naval Engineers Journal*, 2008.
- [5 J. M. Gordo, «Hull’s manufacturing cost structure,» *Brodogradnja*, 2017.
9]
- [6 S. S. Youngrong Kim, «Potential energy savings of air lubrication technology on
0] merchant ships,» *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*,
2023.
- [6 H. An, H. Pan y P. Yang, «Research Progress of Air Lubrication Drag Reduction
1] Technology for Ships,» *Fluids (MDPI)*, 2022.

- [6 S. Universe, «Cost/Install Breakdown: Air Lubrication Systems,» 2024.
2]
- [6 K. D. (. E. N. F. (. E. C. W. B. Matthew Bell (Frontier Economics), A. Chase y C. Lewis,
3] «Economic Opportunities for Low and Zero Emission Shipping: Technical and
Economic Analysis,» StudyLib, 2019.
- [6 A. M. Technologies, «Anemoi Rotor Sails – Wind Propulsion for Commercial
4] Shipping,» 2024.
- [6 B. K. C. A. N. M. S.J. Karabelas, «High Reynolds number turbulent flow past a rotating
5] cylinder,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 32, nº 1, 2011.
- [6 C. M. E. M. Service, «Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from
6] Scatterometer and Model (WIND_GLO_PHY_L4_NRT_012_004)».
- [6 P. G. C. W. A. B. A. F. P. S. R. W. Michael Traut, «Propulsive power contribution of a
7] kite and a Flettner rotor on selected shipping routes,» *Energy*, vol. 73, p. 404–414, 2013.
- [6 S. M. M. B. G. Angelini, «A Techno-Economic Analysis of a Cargo Ship Using Flettner
8] Rotors,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, nº 1, 2023.
- [6
9]
- [7
0]
- [7
1]

[7

2]

[7

3]

[7

4]

- [1] Infopuertos. “La OMI aprueba una nueva Zona de Control de Emisiones en el Atlántico Norte“. Artículo de periódico digital. Infopuertos. Mayo, 2025.
<https://infopuertos.com/omi-nueva-zona-control-emisiones-atlantico-norte/>
- [2] Organización Marítima Internacional (OMI). “Nitrogen oxides (NOx) – Regulation 13“. Página web institucional. IMO. s.f.
[https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- [3] Organización Marítima Internacional (OMI). “Amendments to MARPOL Annex VI (Procedures for sampling and verification of the sulphur content of fuel oil and the Energy Efficiency Design Index (EEDI))“. Resolución MEPC.324(75). Noviembre, 2020.
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.324\(75\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.324(75).pdf)

- [4] Veson Nautical. “EEDI & EEXI“. Página web institucional. s.f.
<https://help.veson.com/vesselsvalue/eedi-eexi>
- [5] Organización Marítima Internacional (OMI). “Resolution MEPC.353(78) – 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2)“. Resolución adoptada el 10 junio 2022.
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.353\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.353(78).pdf)
- [6] Gray, A. “Cinco gráficos que explican el Acuerdo de París sobre el clima“. Foro Económico Mundial – Foro Agenda. 9 noviembre, 2016.
<https://es.weforum.org/stories/2016/11/cinco-graficos-que-explican-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-clima/>
- [7] Parlamento Europeo. “Avances de la UE en la lucha contra el cambio climático“. European Parliament. 9 julio 2018 (actualizado 20 noviembre 2024).
https://www.eoparl.europa.eu/resources/library/images/20241118PHT25469/20241118PHT25469_original.png
- [8] European Commission – Directorate-General for Mobility and Transport. “Decarbonising maritime transport – FuelEU Maritime“. Página web institucional. s.f.
https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en
- [9] European Commission – Directorate-General for Climate Action. “EU Emissions Trading System (EU ETS)“. Página web institucional. s.f. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- [10] Organización Marítima Internacional (OMI). “Reducing greenhouse gas emissions from ships“. Página web institucional. s.f.
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [11] Chevron Global Marine Products. “Everything You Need To Know About Marine Fuels“. Publicado agosto, 2021. <https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels.pdf>
- [12] Evans, J. Harvey. “Basic Design Concepts“. Naval Engineers Journal, noviembre, 1959, pp. 671–678.

- [13] Charchalis, J.O. “Ship design parameters: An analysis“. Scientific Journal of Polish Naval Academy, Vol. 25, No. 2, 2018, pp. 75–80. https://kones.eu/ep/2018/vol25/no2/75-80_J_O_KONES_2018_NO.2_VOL.25_ISSN_1231-4005_Charchalis.pdf
- [14] Marine Insight. “Understanding Block Coefficient of a Ship“. Página web institucional. s.f. <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-block-coefficient-of-a-ship/>
- [15] Lehtoranta, K.; Kuittinen, N.; Vesala, H.; Koponen, P. “Methane emissions from a state-of-the-art LNG-powered vessel“. *Atmosphere*, Vol. 14, No. 5, 2023, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/atmos14050825>
- [16] Grönholm, T.; Mäkelä, T.; Hatakka, J.; Jalkanen, J.-P.; Kuula, J.; Laurila, T.; Laakso, L.; Kukkonen, J. “Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station“. *Environmental Science & Technology*, Vol. 55, 2021, pp. 13677–13686. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04006>
- [17] SEA-LNG. “Methane slip being eliminated as LNG uptake accelerates“. *SEA-LNG*, agosto de 2024. <https://sea-lng.org/2024/08/methane-slip-being-eliminated-as-lng-uptake-accelerates/>
- [18] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). “Hidrógeno“. Página web institucional. s.f. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html#:~:text=Hidr%C3%B3geno%20gris%3A%20hidr%C3%B3geno%20producido%20a,Espe%C3%B1a%20es%20de%20este%20tipo.>
- [19] Van Hoecke, L.; Jablonka, L.; Krishnamurthy, S.; Schwartzberg, J.; Reymond, J.-L.; Aspuru-Guzik, A. “Machine learning–accelerated high-throughput materials discovery for clean energy generation and storage“. *Energy & Environmental Science*, Vol. 14, 2021, pp. 2334–2347. <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>
- [20] International Renewable Energy Agency (IRENA). “Green hydrogen: A guide to policy making“. IRENA: Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, 2020.
- [21] International Renewable Energy Agency (IRENA). “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal“. IRENA: Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, 2020. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/%202020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_reduction_2020.pdf

- [22] **Zhaka, V.; Samuelsson, B.** “Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production to propulsion”. *Energy Reports*, 2024, 12, 5249–5267.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.111>
- [23] **Elammas, T.** “Hydrogen fuel cells for marine applications: Challenges and opportunities”. *International Journal of Advanced Research*, 2023, 9(1), 38–43.
<https://doi.org/10.21474/IJAR01/16923>
- [24] Chavando, A.; Silva, V.; Cardoso, J.; Eusebio, D. “Advancements and Challenges of Ammonia as a Sustainable Fuel for the Maritime Industry”. *Energies*, Vol. 17, 2024, Art. 3183. <https://doi.org/10.3390/en17133183>
- [25] Moon, H.; Alnajideen, M.; Shi, H.; Northrop, W.; Emberson, D.; Kane, S.; Czyzewski, P.; Alnaeli, M.; Mashruk, S.; Rouwenhorst, K.; Yu, C.; Eckart, S.; Valera-Medina, A. “Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review”. *Carbon Neutrality*, Vol. 3, Art. 13, 2024. <https://doi.org/10.1007/s43979-024-00088-6>
- [26] Pieper, R. “Bulbous bow analysis”. 2023 <https://rafaelpieper.com/bulbous-bow-analysis>
- [27] Pérez, F.; Suárez Suárez, J.A. “Geometric modelling of bulbous bows with the use of non-uniform rational B-spline surfaces”. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 12, No. 2, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00773-006-0225-6>
- [28] **Hazarika, N.** “Resistance comparison of container ship with bulbous bow & without bulbous bow”. Bachelor of Engineering Thesis, Naval Architecture & Offshore Engineering, Mayo 2018.
- [29] Le, T.H.; Tran, T.N.; Kian, L.S.; Chua, H.C.; Shah, K.W. (2021). “Effects of a Bulbous Bow Shape on Added Resistance Acting on the Hull of a Ship in Regular Head Wave”. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 559.
<https://doi.org/10.3390/jmse9060559>
- [30] Wärtsilä Corporation. “Rotor Sail Technology”. Página web institucional. s.f.
<https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/energy-saving-technology/rotor-sail>
- [31] Grönholm, T.; Mäkelä, T.; Hatakka, J.; Jalkanen, J.-P.; Kuula, J.; Laurila, T.; Laakso, L.; Kukkonen, J. “Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station”. *Environmental Science & Technology*, Vol. 55, 2021, pp. 13677–13686. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04006>

- [32] Samuel, S.; Iqbal, M.; Utama, I. K. A. P. “An investigation into the resistance components of converting a traditional monohull fishing vessel into catamaran form”. *International Journal of Technology*, Vol. 6, No. 3, 2015, pp. 432–441.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i3.940>
- [33] Wang, Y.; Zhang, J.; Li, W.; Zhang, Y.; Ma, Y. “Analysis on the development of wind-assisted ship propulsion technology and contribution to emission reduction”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 966, 2022, 012012.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/966/1/012012>
- [34] Jiao, J.; Huang, S. “CFD-based numerical simulation and investigation of hydrodynamic behavior of wave-piercing monohulls”. *Ship Building of China*, June 2021.
- [35] International Maritime Organization (IMO). “Fourth IMO GHG Study 2020 – Full report and annexes”. IMO: Londres, Reino Unido, 2020.
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>
- [36] **Schneekluth, H.; Bertram, V.** “Ship design for efficiency and economy“. *Ship Design for Efficiency and Economy* (2.^a ed.), Oxford–Boston: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [37]
- [38] Bertram, V. “Practical Ship Hydrodynamics“. *Butterworth-Heinemann (Elsevier)*, 2.^a edición, 2012. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68326-X>
- [39] **Mrzljak, V., Žarković, B., & Prpić-Oršić, J.** (2017). *Marine slow speed two-stroke diesel engine – numerical analysis of efficiencies and important operating parameters*. **International Scientific Journal “Machines. Technologies. Materials”**, Issue 10, pp. 481–484. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2017/10/481.full.pdf>
- [40] MB&D Services. “Physical and thermal properties for various fuels and substances”. *EnergyFaculty.com*. s.f. <https://energyfaculty.com/physical-and-thermal-properties/?utm>
- [41] MAN Energy Solutions. “Marine Engine Programme 2019”. MAN Energy Solutions: Augsburg, Alemania, 2019. <https://korindo-energy.com/wp-content/uploads/2020/03/Marine-Engine-Programme-2019-2.pdf>
- [42] Comer, B.; Osipova, L. “Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies”. *International Council on Clean Transportation Briefing*, Washington DC, 29 marzo 2021.
<https://theicct.org/publication/accounting-for-well-to-wake-carbon-dioxide-equivalent-emissions-in-maritime-transportation-climate-policies/>

ANEXO I

9.1.1 CONFIGURACIONES HIDRODINÁMICAS ALTERNATIVAS (NO APLICABLES A PORTACONTENEDORES)